

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μοντελοποίηση και Βέλτιστος Σχεδιασμός μέσω
ASPEN Plus και Homer Pro Συστήματος Παραγωγής
"Πράσινου" Υδρογόνου με Χρήση Φωτοβολταϊκών**

Ιωάννης Ζαφείρης

AM : 02118096

ΑΘΗΝΑ 2024

Επιβλέπων: Τζιβανίδης Χρήστος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλω να εκφράσω ένα θερμό και μεγάλο ευχαριστώ προς τον καθηγητή κ. Χρήστο Τζιβανίδη για την ανάθεση αυτού του τόσο ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και την καθοδήγηση και πολύτιμη επικουρία του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Σε αυτήν την πολυετή προσπάθεια, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου, Παναγιώτη Ζαφείρη και Αναστασία Λάσκου και τον αδερφό μου Αθανάσιο Ζαφείρη, οι οποίοι μου παρείχαν όλα τα απαραίτητα εφόδια και στάθηκαν πλάι μου καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας και όχι μόνο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους καλούς μου φίλους, εντός και εκτός σχολής, για την ενθάρρυνση και την υποστήριξη τους.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

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.

Ζαφείρης Ιωάννης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου, υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας σε μία απομακρυσμένη περιοχή, εκτός της κάλυψης του ηλεκτροδοτικού δικτύου. Το σύστημα που αναλύεται επικεντρώνεται στην παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ για την ολική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μίας κατοικίας. Το σύστημα απαρτίζεται από φωτοβολταϊκά πάνελ, συστοιχίες μπαταριών, ηλεκτρολύτη, κυψέλη καυσίμου και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου. Παρουσιάζονται η ιστορία, τα βασικά χαρακτηριστικά και μία βιβλιογραφική ανασκόπηση της κάθε τεχνολογίας που συνιστά το σύστημα. Κάθε υποσύστημα αναλύεται εκτενώς σε ξεχωριστά κεφάλαια, με τη μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Το ηλεκτρολυτικό σύστημα, εκτός αυτής της μαθηματικής προσέγγισης, αναλύεται και προσομοιώνεται μέσω του λογισμικού ASPEN Plus και συγκρίνεται με τη μαθηματική διαμόρφωση που προηγήθηκε. Τέλος, με απώτερο σκοπό το βέλτιστο σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος βάσει των συνθηκών που επικρατούν σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, γίνεται χρήση του λογισμικού HOMERPro, το οποίο ενσωματώνει τεχνοοικονομικά μοντέλα ειδικά σχεδιασμένα για τέτοιου είδους ενεργειακές εφαρμογές ανανεώσιμης φύσης και υποδεικνύει τη βιωσιμότητα ή μη της εκάστοτε διαμόρφωσης του επιχειρηματικού εγχειρήματος.

ABSTRACT

The contents of this thesis deal with the modelling, the simulation and the optimization of a autonomous, hybrid energy production system in a remote area, which is not connected with the electric grid. The system in question focuses on the production of green hydrogen using solar panels for the complete support of the energy demands coming from a housing establishment. The system consists of PV panels, battery packs, an electrolyzer, a fuel cell and a hydrogen storage tank. An overview of the history, the basic characteristics and features and a bibliographic retrospect are provided for each technology that plays a role in the operation of the installation. Each subsystem is analyzed thoroughly in separate chapters, with the concepts and applications of mathematical modelling and simulation playing a significant role. The electrolysis system, apart from this mathematical approach, is analyzed and simulated through the ASPEN Plus software and it is then compared to the mathematical configuration which preceded. Finally, with the ultimate goal of achieving a sufficiently optimized form and function of such a system, under specific circumstances of an indicated geographical location, the HOMERPro software is used. This program embeds techno – economic models, specifically designed for these kinds of green energy applications and indicates whether or not a selected system configuration proves to be a viable investment venture.

Πίνακας Περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ.....	13
2.1	Φωτοβολταϊκά.....	13
2.1.1	Ιστορία.....	13
2.1.2	Βασικά Στοιχεία, Φαινόμενα και Χαρακτηριστικά.....	14
2.1.3	Στόχοι και Πρωτοβουλίες	18
2.2	Υδρογόνο	19
2.2.1	Ιστορία.....	19
2.2.2	Βασικά Στοιχεία, Φαινόμενα και Χαρακτηριστικά.....	20
2.2.3	Στόχοι και Πρωτοβουλίες	28
3	ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	31
3.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	31
3.2	Περιγραφή Ολοκληρωμένου Συστήματος	33
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	36
4.1	Εισαγωγικά	36
4.2	Φωτοβολταϊκά.....	36
4.2.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	36
4.2.2	Μετεωρολογικό Μοντέλο.....	39
4.2.3	Ηλεκτρικό Μοντέλο	43
4.2.4	Προσομοίωση Ηλεκτρικού Μοντέλου	46
4.3	Μπαταρίες.....	51
4.3.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	51
4.3.2	Μαθηματική Μοντελοποίηση.....	53
4.3.3	Προσομοίωση Μπαταρίας	59
4.4	Ηλεκτρολύτης.....	62
4.4.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	63
4.4.2	Μαθηματική Μοντελοποίηση.....	64
4.4.3	Προσομοίωση Μαθηματικού Μοντέλου	71
4.4.4	Μοντελοποίηση ASPEN Plus	77
4.4.5	Αναλυτική Περιγραφή Διαδικασίας Μοντελοποίησης ASPEN Plus	80
4.4.6	Προσομοίωση Μοντέλου ASPEN Plus.....	104
4.5	Δεξαμενή Αποθήκευσης.....	111
4.5.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	112
4.5.2	Μαθηματική Μοντελοποίηση.....	113

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.5.3	Προσομοίωση Μαθηματικού Μοντέλου	114
4.6	Κυψέλη Καυσίμου	116
4.6.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	117
4.6.2	Μαθηματική Μοντελοποίηση	119
4.6.3	Προσομοίωση Μαθηματικού Μοντέλου	123
5	ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	132
5.1	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	132
5.2	Καθορισμός Βασικών Παραμέτρων HOMERPro	134
5.3	Μοντελοποίηση Βασικού Συστήματος με HOMERPro	136
5.4	Αναλυτική Περιγραφή Μοντελοποίησης Βασικού Συστήματος	137
5.5	Προσομοίωση Βασικού Συστήματος με HOMERPro	147
5.6	Μοντελοποίηση Βελτιστοποιημένου Συστήματος με HOMERPro	154
5.7	Προσομοίωση Βελτιστοποιημένου Συστήματος με HOMERPro	155
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	165
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	166

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος ανέκαθεν είχε την τάση να δημιουργεί νέες τεχνολογίες και να εξελίσει την καθημερινότητά του. Μία συνεχής περιέργεια πάντοτε παρέμενε, έπειτα από κάθε τεχνολογικό επίτευγμα, γεγονός το οποίο τον οδηγούσε εν συνεχεία στον περαιτέρω εκσυγχρονισμό και στην παραγωγή ρηξικέλευθων ιδεών και εφευρέσεων. Ο ηλεκτρισμός, οι ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα των μεταφορών (αυτοκίνητα, φορτηγά, καράβια, αεροπλάνα κλπ.) αλλά και η ανάγκη για θέρμανση και ψύξη οδήγησαν σε χρήση μορφών ενέργειας όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Ωστόσο, τις τελευταίες δεκαετίες, με τη συνεχή αύξηση του πληθυσμού, τις αλληπάλληλες οικονομικές διακυμάνσεις αλλά και τη δικαιολογημένη απαίτηση ενός αξιοπρεπούς βιοτικού επιπέδου, παρατηρείται μία ραγδαία αύξηση όσον αφορά την κατανάλωση των παγκόσμιων ενεργειακών αποθεμάτων [1]. Επί πρόσθετα, οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για το 2022 παρουσίασαν αύξηση συγκριτικά με το 2021 [2], ως απότοκο του πολέμου μεταξύ Ρωσίας και Ουκρανίας και κατά συνέπεια, της περιορισμένης παροχής καυσίμων και της αυξανόμενης προσφυγής των χωρών σε καύσιμα όπως ο λιγνίτης για την κάλυψη των απαραίτητων ενεργειακών αναγκών τους.

Στον αντίποδα μίας χρονιάς γεμάτη απρόοπτες συγκρούσεις, απaráμιλλα πλήγματα του οικονομικού ιστού και πρωτόγνωρο πληθωρισμό, οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ δεν αυξήθηκαν τόσο δραστικά όσο τα διάφορα σενάρια και μαθηματικά μοντέλα διατείνονταν, χάρη στην ύπαρξη και την εντυπωσιακή ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα, των φωτοβολταϊκών, με τα οποία θα ασχοληθούμε εκτενώς παρακάτω. Αυτή η τεχνολογία μηδενικών εκπομπών κατάφερε να αποτρέψει την παραγωγή 230 Mt CO₂ στη διάρκεια του 2022. Αυτό το νούμερο μπορεί να μην εντυπωσιάζει όταν το συγκρίνουμε με τις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές CO₂ του ενεργειακού τομέα που κυμαίνονται στους 36,8 Gt, όμως άλλες ανανεώσιμες πηγές όπως οι ανεμογεννήτριες και τα υδροηλεκτρικά έργα αλλά και μεταρρυθμίσεις στον ενεργειακό τομέα όπως η παρουσίαση νέων, πιο εξελιγμένων ηλεκτρικών οχημάτων διαδραματίζουν πρωταρχικό ρόλο που μειώνει περαιτέρω τις προβλεπόμενες εκπομπές [2].

Συνεχίζοντας την αναφορά επί της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών, πέραν της μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο, επιτυγχάνουν τη συλλογή και αξιοποίηση της «πράσινης» ενέργειας που παρέχεται από τον ήλιο, η οποία και υπάρχει άφθονη και παρέχεται δίχως τίμημα. Αποτελούν μία πολύ ευέλικτη τεχνολογική εφαρμογή, η οποία μπορεί να καλύψει από τις ενεργειακές ανάγκες ολόκληρων βιομηχανικών

εγκαταστάσεων μέχρι αυτές ενός οικιακού περιβάλλοντος και παρέχουν μία εξαιρετικά βιώσιμη λύση για όλους όσους θέλουν να ξεφύγουν από τις αυξημένες τιμές ηλεκτρισμού, παρά το αυξήσεις στον εξοπλισμό και στην εγκατάσταση τους. Επιπλέον, το μέλλον των ηλιακών φωτοβολταϊκών διαφαίνεται τουλάχιστον «λαμπρό», αφού η ηλεκτροπαραγωγή από αυτήν την τεχνολογία αυξήθηκε κατά 270 TWh το 2022, φτάνοντας τις 1300 TWh, παρουσιάζοντας τη μεγαλύτερη άνοδο συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές. Αυτή η εξέλιξη ταυτίζεται με τα επίπεδα ανάπτυξης της τεχνολογίας από το 2023 μέχρι το 2030, σύμφωνα με το Net Zero Emissions by 2050 Scenario και επικροτεί την περαιτέρω νομοθετική διευκόλυνση εξάπλωσης των φωτοβολταϊκών στην Κίνα, στις ΗΠΑ, στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ινδία. Παράλληλα, με αυτά τα αναπτυξιακά δεδομένα, η ικανότητα παραγωγής ενέργειας των φωτοβολταϊκών θα ξεπεράσει αυτήν του λιγνίτη το 2027 αλλά και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μόνο των φωτοβολταϊκών θα φτάσει τις 8255 TWh το 2030, ενώ εν έτει 2022 οι 8500 TWh (30% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας) αποτελούσαν όλη την ηλεκτροπαραγωγή από ανανεώσιμες πηγές γενικώς [3].

Πέραν των παραπάνω ενθαρρυντικών προσδοκιών και αποτελεσμάτων της προσπάθειάς μας για ένα πιο «πράσινο» και βιώσιμο μέλλον, ορισμένες ερευνητικές ομάδες κατάφεραν πρόσφατα να ξεπεράσουν το άνω ποσοστιαίο όριο μετατροπής της ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργειας 29% των συμβατικών φωτοβολταϊκών που φέρουν ημιαγωγούς πυριτίου. Πιο συγκεκριμένα, η τοποθέτηση ενός στρώματος περοβσκίτη – ενός άλλου τύπου ημιαγωγού – επί του ήδη υπάρχοντος στρώματος πυριτίου ενεργοποιεί τη «φυλάκιση» του μπλε φωτός από το ορατό φάσμα από το στρώμα περοβσκίτη, ενώ το στρώμα πυριτίου «φυλακίζει» το κόκκινο φως. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η συνολική ποσότητα φωτός που προσπίπτει και συλλέγεται από ένα κελί του φωτοβολταϊκού και φτάνει και ξεπερνάει τον ποσοστιαίο βαθμό απόδοσης του 30%, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος της ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής και να γίνει η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας τάχιστα. Ενώ όλα αυτά τα στοιχεία ανοίγουν το δρόμο για μια νέα γενιά φωτοβολταϊκής τεχνολογίας που μπορεί να είναι έτοιμη για εφαρμογή σε ευρεία κλίμακα ακόμη και στα επόμενα 5 χρόνια, οι ερευνητές και οι επιστήμονες πιστεύουν πως το πρακτικό άνω όριο του βαθμού απόδοσης αυτών των φωτοβολταϊκών είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του 35% [4].

Ωστόσο, ακόμη και με όλες αυτές τις πρωτοπορίες και προόδους όσον αφορά την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών, η τεχνολογίες αυτές είναι άκρως εξαρτώμενες από την ύπαρξη ηλιακής ενέργειας για να λειτουργήσουν και να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες μας. Επιπλέον, για να μπορέσουμε να επεκτείνουμε την κάλυψη αυτής της τεχνολογίας και πέρα από τα όρια

του ηλεκτροπαραγωγικού ιστού θα χρειαστεί να συνδυάσουμε αυτήν την τεχνολογία με μία άλλη πρωτοποριακή τεχνολογία που θα είναι ικανή να αποθηκεύει την πλεονάζουσα ενέργεια για τις χρονικές περιόδους που η ηλιακή ενέργεια δε θα δύνανται να καλύψει τις ανάγκες για ενέργεια. Το υδρογόνο, ένα ιδιαίτερος ευέλικτο και ενεργειακά «πυκνό» καύσιμο, είναι ικανό να καλύψει όποιες ενεργειακές ανάγκες προκύψουν, όταν συνδυαστεί με τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία συλλογής ενέργειας.

Δυστυχώς, τα τελευταία χρόνια, η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την κατεξοχήν παραγωγή υδρογόνου προέρχεται, κατά κύριο λόγο, από ορυκτά καύσιμα, με περίπου το 1/6 αυτής της παγκόσμιας παραγωγής να προκύπτει ως παραπροϊόν διαδικασιών της πετρελαϊκής βιομηχανίας. Το 2022, το 70% των ενεργειακών απαιτήσεων για την παραγωγή υδρογόνου καλύφθηκε με χρήση φυσικού αερίου και το υπόλοιπο 30% από το λιγνίτη (κυρίως από την Κίνα) [5]. Επί πρόσθετα, οι εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν λιγότερο από το 1% της παγκόσμιας παραγωγής για το 2022, παρά της αύξησης των νέων επενδύσεων και προώθησης αυτών των υβριδικών τεχνολογιών ΑΠΕ και υδρογόνου.

Έχοντας ως εφελτήριο λοιπόν τα παραπάνω στοιχεία και το περιβάλλον σε πρώτη μοίρα, ιδίως την περίοδο αυτή που ο κόσμος πλήττεται από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και του φαινομένου του θερμοκηπίου, η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μοντελοποίηση και το σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος, όπως αναφέραμε, παραγωγής «πράσινου» υδρογόνου με την επικουρία φωτοβολταϊκών πάνελ, αφού αυτή η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αποτελεί την πιο ταιριαστή τεχνολογία για την περιοχή μας και για τη διαμόρφωση μίας πιο «πράσινης» μελλοντικής βιομηχανίας παραγωγής ενέργειας.

Συγκεκριμένα, το υβριδικό σύστημα που μελετάται διαθέτει ως βασικό κομμάτι τα φωτοβολταϊκά ως συσκευές εκμετάλλευσης της ανανεώσιμης ηλιακής ενέργειας, τα οποία με τη σειρά τους συνδέονται και παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου με χρήση μίας δεξαμενής ηλεκτρόλυσης, η οποία με την επικουρία του ηλεκτρικού ρεύματος δύναται να διασπάσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω της χημικής διεργασίας της ηλεκτρόλυσης. Έπειτα, για την αποθήκευση του παραγόμενου υδρογόνου και τη διευκόλυνση της μελλοντικής του χρήσης θα γίνει χρήση φιαλών υψηλής πίεσης.

Το 2^ο κεφάλαιο συνιστάται από μία πιο ενδελεχή «ματιά» όσον αφορά τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και της παραγωγής υδρογόνου, την προέλευση τους, τα βασικά φαινόμενα και χαρακτηριστικά που τις συνιστούν αλλά και τούς νέους στόχους τους στον τομέα

παραγωγής ενέργειας σε ορισμένες περιοχές υψηλής σημασίας και τις προόδους όσον αφορά τις πρωτοβουλίες που παρατηρούνται. Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται πιο αναλυτικά η λειτουργία του συνολικού συστήματος που μελετήθηκε, καθώς και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών που το απαρτίζουν. Στο 4^ο κεφάλαιο παρατίθενται εκτενώς ο τρόπος μοντελοποίησης των επιμέρους συστημάτων, οι εξισώσεις και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι συνθήκες, όπως τα μετεωρολογικά στοιχεία για διάρκεια ενός έτους, που λήφθηκαν υπόψιν κατά τη διαδικασία της διαμόρφωσης του υβριδικού συστήματος που μελετήθηκε. Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, καθώς και τα συμπεράσματα που δύνανται να προκύψουν από μία τεχνοοικονομική ανάλυση και σύγκριση του εν λόγω συστήματος με άλλα αντιστοίχως αυτόνομα. Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο περιγράφονται, εν συντομία, τα βασικά στοιχεία και συμπεράσματα που προκύπτουν από το σύνολο αυτής της εργασίας και αποτελούν ορμητήριο για την επιτυχή υλοποίηση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

2.1 Φωτοβολταϊκά

2.1.1 Ιστορία

Η αξιοποίηση του ηλίου αποτελεί μία από τις πρακτικές που οι Αρχαίοι Έλληνες πρώτοι εφάρμοσαν και εξέλιξαν 2500 χρόνια πριν. Έκτοτε, οι άνθρωποι της Αρχαίας Ρώμης, οι Ιθαγενείς της Αμερικής, οι πρώτοι Ευρωπαίοι άποικοι της Αμερικής αλλά και όσοι επέζησαν τις φρικαλεότητες του Πρώτου και Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου μόχθησαν - η κάθε εποχή με το δικό της τρόπο – για την περαιτέρω εξέλιξη αυτής της πρακτικής.

Ωστόσο, όλες αυτές οι εξελίξεις προς την αξιοποίηση του ηλίου είχαν ως στόχο τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών μετατρέπει αυτήν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, έχοντας ως απαρχή την ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Alexandre – Edmond Becquerel το 1839, με μία πρακτική εφαρμογή αυτής της θεωρίας να παρουσιάζεται πολλά χρόνια αργότερα, με ονόματα όπως ο Charles Fritts, ο Albert Einstein και ο William Grylls Adams να συνεισφέρουν στην ανάπτυξη των πρώτων φωτοβολταϊκών σε πειραματικό επίπεδο, τα οποία βασίστηκαν στο υλικό σελήνιο και είχαν πολύ χαμηλό βαθμό απόδοσης στα τελέ του 19^{ου} με αρχές του 20^{ου} αιώνα.

Αρκετές δεκαετίες αργότερα, το 1954, οι ερευνητές των Bell Labs έφτασαν στην επαναστατική ανάπτυξη του πρώτου φωτοβολταϊκού κυττάρου πυριτίου που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές. Αυτό το κύτταρο που είχε ένα βαθμό απόδοσης περίπου 6% αποτέλεσε μία σημαντική βελτίωση των προηγούμενων πειραματικών εκδοχών και έθεσε τις βάσεις για τη μοντέρνα φωτοβολταϊκή τεχνολογία που γνωρίζουμε. Έκτοτε, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στο διάστημα του 50 και του 60 για διαστημικές εφαρμογές από τις ΗΠΑ για την παροχή ενέργειας στα διαστημόπλοια και σε δορυφόρους, ενώ στο διάστημα 1970 με 1990 οι επίγειες εγκαταστάσεις για παραγωγή ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές και στον τομέα των τηλεπικοινωνιών είδαν μία έντονη άνθιση, με μία ταυτόχρονη μείωση του κόστους της τεχνολογίας. Περαιτέρω πρόοδοι παρατηρούνται από τη δεκαετία του 80 έως το 2000 με συνεχή έρευνα να εντείνει τις προσπάθειες για έναν πιο αυξημένο βαθμό απόδοσης και μείωση κόστους μέσω χρήσης πολλαπλών επαφών στα κύτταρα και τεχνολογίες λεπτών στρώσεων υλικού και με μετέπειτα στάδιο τη διασύνδεση των πάνελ στον ηλεκτροπαραγωγικό ιστό, με εγκαταστάσεις σε οικιακό και βιομηχανικό επίπεδο, με απώτερο σκοπό τη μείωση της τιμής των παγίων.

Από το 2000 λοιπόν μέχρι και σήμερα, πρωταρχικός στόχος των ερευνητικών εγχειρημάτων συνιστά η περαιτέρω εξάπλωση και υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας αλλά και η δημιουργία ενός πιο «πράσινου» ενεργειακού μείγματος, μέσω νομοθετικής υποστήριξης και αυξανόμενης περιβαλλοντικής συνείδησης, ανταγωνισμού μεταξύ των παραγωγών – εταιρειών και συνεχόμενης πτώσης του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης.



Εικόνα 1 Ένας μηχανικός κρατά στα χέρια του το Vanguard 1, τον πρώτο δορυφόρο που έκανε χρήση φωτοβολταϊκών. Από τα αρχεία Perlin/Butti

2.1.2 Βασικά Στοιχεία, Φαινόμενα και Χαρακτηριστικά

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών βασίζεται, πρώτα από όλα, στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους των μετάλλων, όπως του πυριτίου Si που είναι το πιο ευρέως σε χρήση υλικό για την κατασκευή ημιαγωγών στις εφαρμογές ηλιακών κυττάρων, διεγείρονται με την έκθεση τους στο φως από τα φωτόνια και μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας, λόγω της ενέργειας που προσέλαβαν, όπου δύνανται να κινηθούν ελεύθερα μεταξύ διαφορετικών ατόμων. Η απόσταση μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας ονομάζεται απαγορευμένη ζώνη (forbidden band) και η ενέργεια που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας ονομάζεται ενέργεια κενού (gap energy) και έχει ως μονάδα μέτρησης το electron – Volt (eV) και ορίζεται ως η ενέργεια που δόθηκε σε ένα ηλεκτρόνιο για να αυξηθεί η τάση του κατά 1 V (1 eV = 1.6 × 10⁻¹⁹ J – 1.12 eV για το πυρίτιο σε ημιαγωγούς στους 25°C) [6].

Από την άλλη μεριά, τα φωτόνια χαρακτηρίζονται από τη συχνότητα ή από το μήκος κύματος, καθώς και από την ενέργεια τους, μέσω του παρακάτω τύπου:

$$c = \lambda * \nu$$

Όπου το c είναι η ταχύτητα του φωτός ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s), το ν για τη συχνότητα σε Hz και το λ για το μήκος κύματος σε m. Επιπρόσθετα:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Όπου E είναι η ενέργεια του φωτονίου (σε Joule, J) και h η σταθερά του Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Js).

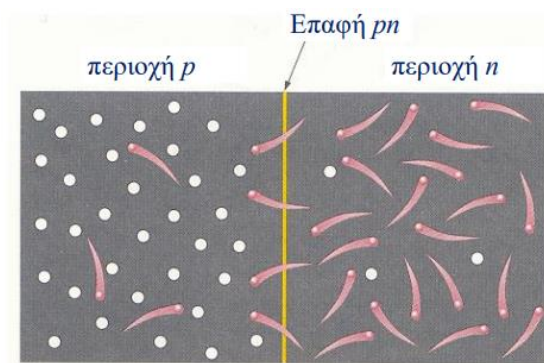
Η ίδια εξίσωση μπορεί να εκφραστεί με μία απλοποιημένη μορφή αν αντικατασταθούν οι τιμές των σταθερών:

$$E(eV) = \frac{1240}{\lambda(nm)}$$

Και μέσω του παραπάνω τύπου, συμπεραίνουμε ότι το ελάχιστο μήκος κύματος για το φωτόνιο να μεταφέρει ενέργεια στο ηλεκτρόνιο ώστε να μεταπηδήσει από τη μία στοιβάδα στην άλλη, όσον αφορά το πυρίτιο, είναι τα 1,12 μm .

Επομένως, με βάση το παραπάνω, φωτόνια με μεγαλύτερα μήκη κύματος από 1,12 μm δεν έχουν αρκετή ενέργεια για να διεγείρουν το ηλεκτρόνιο και να περάσει ρεύμα, οπότε όλη η ενέργεια τους χάνεται. Από την άλλη, φωτόνια με μικρότερα μήκη κύματος παρέχουν αρκετή ενέργεια στο ηλεκτρόνιο όμως υπάρχει περίσσεια ενέργειας που χάνεται σε μορφή θερμότητας [6].

Το άλλο βασικό κομμάτι που απαρτίζει τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι τα φωτοβολταϊκά κύτταρα που τα απαρτίζουν, δηλαδή δίοδοι με μία μεγάλη επιφάνεια εκτεθειμένη στο ήλιο. Μία δίοδος είναι ένας ημιαγωγός τύπου n , όπου τα ηλεκτρόνια (φορείς πλειονότητας) υπερτερούν των οπών (φορείς μειονότητας), συνδεδεμένος με έναν ημιαγωγό τύπου p , όπου οι οπές (φορείς πλειονότητας) υπερτερούν των ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας). Η διαχωριστική επιφάνεια που σχηματίζεται μεταξύ του ημιαγωγού p και του ημιαγωγού n ονομάζεται επαφή pn (pn junction).

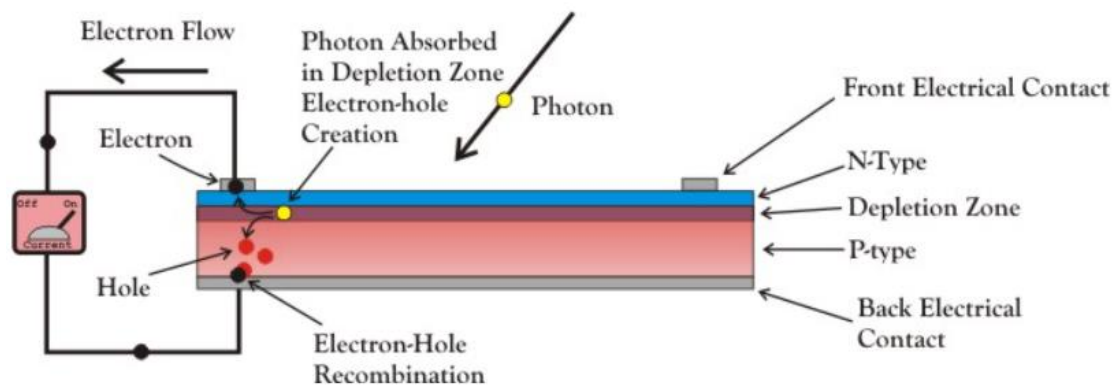


Εικόνα 2 Σχέδιο απεικόνισης μίας τυπικής επαφής pn

Τη στιγμή του σχηματισμού της επαφής pn, ελεύθερα ηλεκτρόνια από την περιοχή n (τα οποία έχουν διεγερθεί από την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου), κοντά στην επαφή, αρχίζουν να διαχέονται μέσα από την επαφή και να πέφτουν μέσα σε οπές της περιοχής p που βρίσκονται κοντά στην επαφή. Επομένως, για κάθε ηλεκτρόνιο που διαχέεται μέσω της επαφής και συνδέεται με μια οπή, ένα θετικό φορτίο μένει στο τμήμα n και ένα αρνητικό φορτίο δημιουργείται στο τμήμα p. Επιπλέον, το στρώμα θετικών και αρνητικών ιόντων που σχηματίζεται εκατέρωθεν της επαφής ονομάζεται περιοχή κένωσης (depletion zone) διότι σε αυτή δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια ή οπές.

Ο φραγμός δυναμικού (barrier potential), V_B , είναι η ενέργεια που χρειάζεται για να κινήσουμε ηλεκτρόνια μέσα από το ηλεκτρικό πεδίο της περιοχής κένωσης. Για το πυρίτιο (Si) είναι περίπου 0,7 V στους 25°C. Ιδιαίτερως σημαντικό είναι το γεγονός ότι, στην ισορροπία, η επαφή pn δε διαρρέεται από ρεύμα και άρα, θα χρειαστεί πόλωση της ώστε να επιτραπεί ρεύμα προς μία κατεύθυνση και να εμποδίζεται το ρεύμα να ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση, γεγονός το οποίο εκφράζει την κύρια χρησιμότητα ενός pn junction [6].

Συνεπώς, εάν συνδέσουμε ένα καλώδιο από την κάθοδο της διόδου (τμήμα n) στην άνοδο της (τμήμα p), θα έχουμε διαρροή αυτού του κυκλώματος από ηλεκτρόνια. Με άλλα λόγια, το ηλεκτρόνιο έλκεται προς το θετικά φορτισμένο τμήμα p του πυριτίου και μεταφέρεται μέσω του εξωτερικού φορτίου, δημιουργώντας έτσι μία ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Η οπή που δημιουργήθηκε από το απομακρυσμένο ηλεκτρόνιο, με τη σειρά της, έλκεται από το αρνητικά φορτισμένο τμήμα n και μετακινείται προς την πίσω ηλεκτρική επαφή (back electrical contact). Τέλος, όπως το ηλεκτρόνιο εισέρχεται στο τμήμα p του πυριτίου από την πίσω ηλεκτρική επαφή, συναντά την οπή και συνδυάζονται και έτσι, αποκαθίσταται η ηλεκτρική ουδετερότητα.



Εικόνα 3 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου

Όλα τα φωτοβολταϊκά, λοιπόν, όταν εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν ένα ποσοστό από 5 – 19% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική (εμπορικά μοντέλα). Αυτό το ποσοστό καθορίζεται βασικά από την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του φωτοβολταϊκού, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω:

- Μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πυριτίου (m – Si)
- Πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πυριτίου (p – Si)
- Φωτοβολταϊκά ‘λεπτού υμενίου’ ή ‘thin film’ (a – Si, μ – Si, CIS – CIGS, CdTe)

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προαναφερθείσες τεχνολογίες καλύπτουν πάνω από το 97% της αγοράς φωτοβολταϊκών και η νέα γενιά πιο αποδοτικών μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών συνιστά σχεδόν το σύνολο της παραγωγής των πάνελ για το 2022.

Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών			
ΤΥΠΟΣ	‘Λεπτού υμενίου’ ή ‘Thin Film’	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	a-Si: 4,5-6,5% μ-Si: 8-9% CIS-CIGS: 6-12% CdTe: 6-11%	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5,5-9 m ²

Εικόνα 4 Συνοπτική παρουσίαση των τεχνολογιών

2.1.3 Στόχοι και Πρωτοβουλίες

Νέοι, φιλόδοξοι στόχοι και πρωτοβουλίες, όπως το net metering, παρουσιάζονται σε τακτά χρονικά διαστήματα στις μεγαλύτερες αγορές ηλιακών φωτοβολταϊκών και είναι ικανοί, με ορθές πρακτικές, να επιταχύνουν περαιτέρω την αύξηση της ικανότητας ηλεκτροπαραγωγής αυτής της τεχνολογίας.

Χώρες και περιοχές που επιδεικνύουν σημαντική πρόοδο όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά είναι οι παρακάτω:

- Η **Κίνα** συνεχίζει να ηγείται της αυξανόμενης παρουσίας των φωτοβολταϊκών, με 100 GW να προστίθενται το 2022, περίπου 60% περισσότερο από το 2021. Το 14^ο Five – Year Plan for Renewable Energy, όπως αποκαλείται, που εκδόθηκε το 2022 εκφράζει την υπόσχεση των ιθύνοντων για αύξηση της εξάπλωσης των φωτοβολταϊκών και ραγδαία μείωση των εκπομπών CO₂, με απώτερο σκοπό το ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα.
- Η **Ευρωπαϊκή Ένωση** επιταχύνει ακόμη περισσότερο την εξάπλωση και εγκατάσταση νέων φωτοβολταϊκών ως απάντηση στην ενεργειακή κρίση που διανύει η παγκόσμια κοινωνία, με 38 GW προστιθέσιμες το 2022, ένα νούμερο 50% αυξημένο συγκριτικά με το 2021. Νέες πρωτοβουλίες και πρωτόκολλα έχουν τεθεί εν ενεργεία, όπως το REPowerEU Plan, το οποίο, από το Μάιο του 2022, βοηθάει στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων, την παραγωγή «πράσινης» ενέργειας και την επέκταση των ενεργειακών αποθεμάτων.
- Οι **ΗΠΑ** παράσχουν γενναιοδωρη χρηματοδότηση, επενδυτικά προνόμια και φορολογικές ελαφρύνσεις για την υιοθέτηση και εγκατάσταση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, μέσω του Inflation Reduction Act (IRA), από το 2022.
- Η **Ινδία** εγκατέστησε 18 GW φωτοβολταϊκής ενέργειας το 2022, σχεδόν 40% παραπάνω από το 2021. Ακόμη, ως νέος στόχος τίθεται η αύξηση της παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκά στα 40 GW ετησίως και η δυναμική εξέλιξη της οικιακής αλυσίδας φωτοβολταϊκών, γεγονός που θα αποτελέσει βάση για την πρόοδο της «πράσινης» ενέργειας μελλοντικά.
- Η **Βραζιλία**, με τη σειρά της, πρόσθεσε 11 GW φωτοβολταϊκών το 2022, διπλασιάζοντας έτσι την ανάπτυξη του τομέα αυτού από το 2021. Η συνεχής ζήτηση ανανεώσιμης ενέργειας από βιομηχανία και παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας εντείνει τη διατήρηση και προώθηση αυτών των επιπέδων ανάπτυξης.

2.2 Υδρογόνο

2.2.1 Ιστορία

Η ιστορία του υδρογόνου ως φορέας ενέργειας (energy carrier \neq energy source) ξεκινά με την παρατήρηση και την κατανόηση του γεγονότος ότι αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες όλου του σύμπαντος. Όταν οι Αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι κατηγοριοποίησαν το νερό, τον αέρα, τη φωτιά και τη γη στη λίστα των στοιχείων τους δεν είχαν συνειδητοποιήσει ότι το νερό αποτελείται από δύο στοιχεία: το οξυγόνο που συνιστά το προαπαιτούμενο για την αναπνευστική ικανότητα των οργανισμών και το υδρογόνο, το οποίο αποτελεί το ελαφρύτερο και το πιο εν αφθονία υλικό στο σύμπαν. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις, το υδρογόνο συνιστά περίπου το 75% της μάζας ολόκληρου του σύμπαντος και περισσότερο από το 90% όλων των μορίων [7].

Ωστόσο, παρά αυτής της αφθονίας που χαρακτηρίζει το υδρογόνο, σπανίως παρατηρείται σαν στοιχείο μόνο του επί της Γης διότι τείνει να σχηματίζει δεσμούς με άλλα στοιχεία. Επομένως, για να προμηθευτούμε υδρογόνο θα πρέπει να το παράγουμε πρώτα και για αυτό χρησιμοποιείται ο όρος ενεργειακός φορέας για να το χαρακτηρίσει και όχι ο όρος ενεργειακή πηγή.

Η πρώτη ιστορικά καταγεγραμμένη παραγωγική διαδικασία υδρογόνου έλαβε χώρα κατά τον 15^ο αιώνα όταν ένας «γιατρός» της τότε εποχής ονόματι Theophrastus Paracelsus προκάλεσε τη διάλυση σιδήρου μέσα σε θειικό οξύ, παράγοντας έτσι αέριο υδρογόνο, δίχως όμως να γίνει αντιληπτό εκείνη την περίοδο ότι αυτό αποτελεί ξεχωριστό στοιχείο. Η ανακάλυψη αυτή αποδίδεται στο Βρετανό χημικό Henry Cavendish, ο οποίος μέσω πολυάριθμων αντιδράσεων μετάλλων με ισχυρά οξέα κατέθεσε ένα άρθρο το 1766 στη Royal Society of London, παρουσιάζοντας εκτενώς πολλά από τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου, όπως το βάρος και την πυκνότητα του και περιγράφοντας το ως «εύφλεκτος αέρας» (inflammable air) [7].

Συνεχίζοντας, έχοντας και ως ορμητήριο το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας, είθισται να αποδώσουμε ιδιαίτερη σημασία στην ανακάλυψη της ηλεκτρόλυσης, το διαχωρισμό του νερού σε μόρια υδρογόνου και οξυγόνου διαρρέοντας το με ηλεκτρικό ρεύμα, ως μέθοδο παραγωγής υδρογόνου που πραγματοποιήθηκε το 1800 από τους Βρετανούς επιστήμονες William Nicholson και Sir Anthony Carlisle, λίγες μέρες αφότου ο Alessandro Volta είχε εφεύρει τον «πρόγονο» της σύγχρονης μπαταρίας [7].

Ωστόσο, αυτή η μέθοδος παραγωγής υδρογόνου ξεκίνησε την πολλά υποσχόμενη πορεία εξέλιξης της αρκετά αργότερα, οπότε και άρχισε να διαμορφώνεται ο βασικότερος πυλώνας

της: ο ηλεκτρολύτης. Από το 1800 έως και τον 21^ο αιώνα, οι πιο βασικές τεχνολογίες του ηλεκτρολύτη σε πρακτικές εφαρμογές που προέκυψαν παρατίθενται παρακάτω:

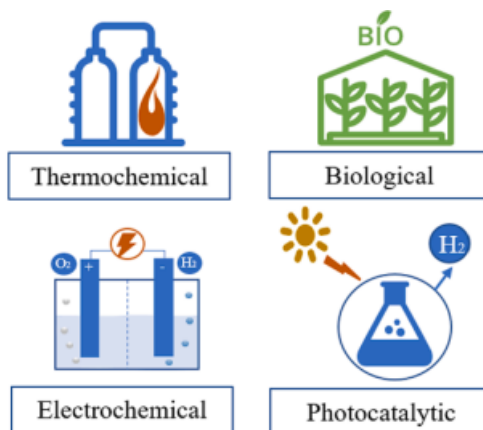
- **Alkaline Electrolysis (AEL) (1800):** Η ανακάλυψη της ηλεκτρόλυσης, όπως προέκυψε παραπάνω, αποτελεί την πρώτη περίπτωση αλκαλικής ηλεκτρόλυσης (AEL).
- **Proton Exchange Membrane Electrolysis (PEMEL) (1950s):** Διαμορφώθηκε χάρη στο Αμερικανικό διαστημικό πρόγραμμα, με κύρια ιδέα τη λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου (fuel cell) σε μηδενική βαρύτητα. Η General Electric παρήγαγε τον πρώτο PEM ηλεκτρολύτη το 1966.
- **Solid Oxide Electrolysis (SOEL) (1980s):** Ουσιαστικά μία πιο βελτιωμένη PEM αρχιτεκτονική, με θερμοκρασία λειτουργίας αρκετά υψηλότερη και κατάργηση των πανάκριβων καταλυτικών μετάλλων [8].
- **Anion Exchange Membrane Electrolysis (AEMEL) (2000s):** Ουσιαστικά ο συνδυασμός των δύο παραπάνω τεχνολογιών και η εξάλειψη των αντιστοίχων μειονεκτημάτων τους.

[9]

2.2.2 Βασικά Στοιχεία, Φαινόμενα και Χαρακτηριστικά

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένων θερμοχημικής παραγωγής, ηλεκτροχημικής παραγωγής, βιολογικής παραγωγής και φωτοκαταλυτικής παραγωγής. Συνοπτικά:

- **Θερμοχημικές** τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου αποτελούν οι αντιδράσεις υψηλής θερμοκρασίας με πρώτες ύλες για την παραγωγή υδρογόνου [10].
- **Ηλεκτροχημικές** τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου αποτελεί η χρήση ηλεκτρισμού για τη δημιουργία αντιδράσεων που παράγουν υδρογόνο [11]
- **Βιολογικές** τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου χρησιμοποιούν μικροοργανισμούς ή τα ένζυμα τους για να παράξουν υδρογόνο μέσω βιολογικών διεργασιών [12].
- **Φωτοκαταλυτικές** τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου συνιστούν τη χρήση φωτοκαταλυτών (υλικά με υψηλή απορρόφηση φωτός) για τη διευκόλυνση της διάσπασης του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο με την έκθεση του στην ηλιακή ακτινοβολία [13].



Εικόνα 5 Σχεδιάγραμμα τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου

Ωστόσο, από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, οι βασικότερες και πιο ευρέως διαδεδομένες και εξελιγμένες είναι οι θερμοχημικές και οι ηλεκτροχημικές, με τις βιολογικές και τις φωτοκαταλυτικές να βρίσκονται σε πειραματικό και ερευνητικό στάδιο. Για αυτόν το λόγο, σε αυτό το κομμάτι της εργασίας, θα γίνει αναλυτική περιγραφή μόνο των θερμοχημικών και των ηλεκτροχημικών.

Συνεχίζοντας, είναι ιδιαίτερως σημαντικό να περιγράψουμε τις «χρωματικές» κατηγορίες που κατατάσσονται οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, αναλόγως με την τεχνολογία, την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται και το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα [14], όπως περιγράφεται ακριβώς από κάτω:

- **Μπλε Υδρογόνο:** Παράγεται από την αναμόρφωση φυσικού αερίου (μεθανίου) σε ατμό. Κατά τη διαδικασία αυτή, το μεθάνιο διασπάται σε υδρογόνο (H_2) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), με το παραγόμενο CO_2 να φυλακίζεται σε ποσοστό 85% - 95% υπό της γης χρησιμοποιώντας τεχνικές CCUS (Carbon Capture, Usage and Storage). Ωστόσο, είναι αβέβαιες οι επιπτώσεις της μακροχρόνιας αποθήκευσης άνθρακα και τυχόν διαρροές δύνανται να βλάψουν το περιβάλλον και το κλίμα [15].



Εικόνα 6 Σχεδιάγραμμα και βασική εξίσωση παραγωγής μπλε υδρογόνου

- **Γκρι Υδρογόνο:** Παράγεται από μη ανανεώσιμα ορυκτά καύσιμα όπως φυσικό αέριο ή λιγνίτη μέσω αναμόρφωσης σε ατμό/διαδικασία αυτόθερμης αναμόρφωσης. Οι

διεργασίες αυτές είναι παρόμοιες με αυτές του μπλε υδρογόνου αλλά το παραγόμενο CO₂ δε φυλακίζεται και άρα, απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα [16].



Εικόνα 7 Σχεδιάγραμμα και βασική εξίσωση παραγωγής γκρι υδρογόνου

- **Καφέ Υδρογόνο:** Παράγεται σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, μέσω της αεριοποίησης του λιγνίτη. Ωστόσο, ως αποτέλεσμα αυτής της μεγάλης παραγωγής, κάθε τόνος καφέ υδρογόνου απελευθερώνει 10 – 12 τόνους CO₂ στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 8 Σχεδιάγραμμα και βασική εξίσωση παραγωγής καφέ υδρογόνου

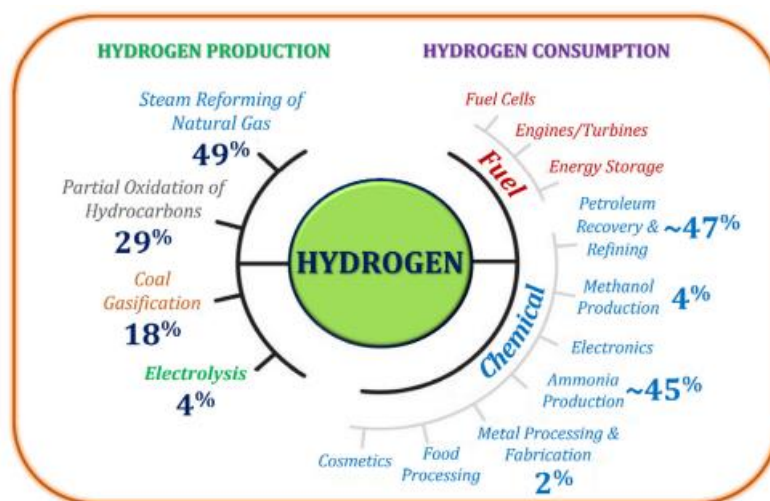
- **Μαύρο Υδρογόνο:** Παράγεται από την αεριοποίηση ασφαλτώδους (bituminous) άνθρακα όπου κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται συνθετικό αέριο (syngas) το οποίο είναι ένα μείγμα από μονοξείδιο του άνθρακα CO και υδρογόνο H₂, κατά κύριο λόγο. Το υδρογόνο απομακρύνεται λοιπόν χρησιμοποιώντας ειδικούς απορροφητές ή μεμβράνες και τα υπόλοιπα αέρια απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα [17].
- **Πράσινο Υδρογόνο:** Παράγεται χρησιμοποιώντας ανανεώσιμο νερό και ηλεκτρική ενέργεια μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης κατά την οποία, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, διασπάται το νερό H₂O σε υδρογόνο H₂ και οξυγόνο O₂ με τη βοήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα μηδενικές εκπομπές άνθρακα [18].



Εικόνα 9 Σχεδιάγραμμα και βασική εξίσωση παραγωγής πράσινου υδρογόνου

Όμως, παρά της πολύχρονης ύπαρξης και εξέλιξης των τεχνολογιών παραγωγής «πράσινου» υδρογόνου, το 96% του παραγόμενου υδρογόνου προέρχεται από μη ανανεώσιμα ορυκτά καύσιμα (κυρίως από αναμόρφωση ατμού μεθανίου), παράγοντας έτσι 830 εκατομμύρια

τόνους CO₂ το χρόνο και το υπόλοιπο 4% μόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανόμενης της ηλεκτρόλυσης όπως φαίνεται στο επόμενο σχεδιάγραμμα [19].



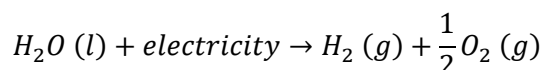
Εικόνα 10 Βασικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου και εφαρμογές

Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου που ανήκουν σε αυτό το χρωματικό «φάσμα», όπως το ροζ υδρογόνο το οποίο παράγεται με την ηλεκτρόλυση του νερού, ωστόσο η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από πυρηνική ενέργεια.

Ωστόσο, οι τεχνολογίες όπως αυτή του «ροζ» υδρογόνου και η πλειονότητα των φωτοκαταλυτικών και βιολογικών μεθόδων βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό – πειραματικό στάδιο (R&D), με ορισμένες περιορισμένες πιλοτικές εφαρμογές, μα και υπέρογκο οικονομικό κόστος ακόμη [20]. Λόγω αυτού λοιπόν δε θα αναφερθούμε περαιτέρω σε αυτές.

Συνεχίζοντας, θεωρείται απαραίτητο να παρουσιάσουμε και να εξηγήσουμε τους μηχανισμούς ηλεκτρόλυσης που επικρατούν σε κάθε ανεπτυγμένη τεχνολογία αυτού του τύπου, καθώς και ορισμένες από τις πιο βασικές συνθήκες λειτουργίας τους.

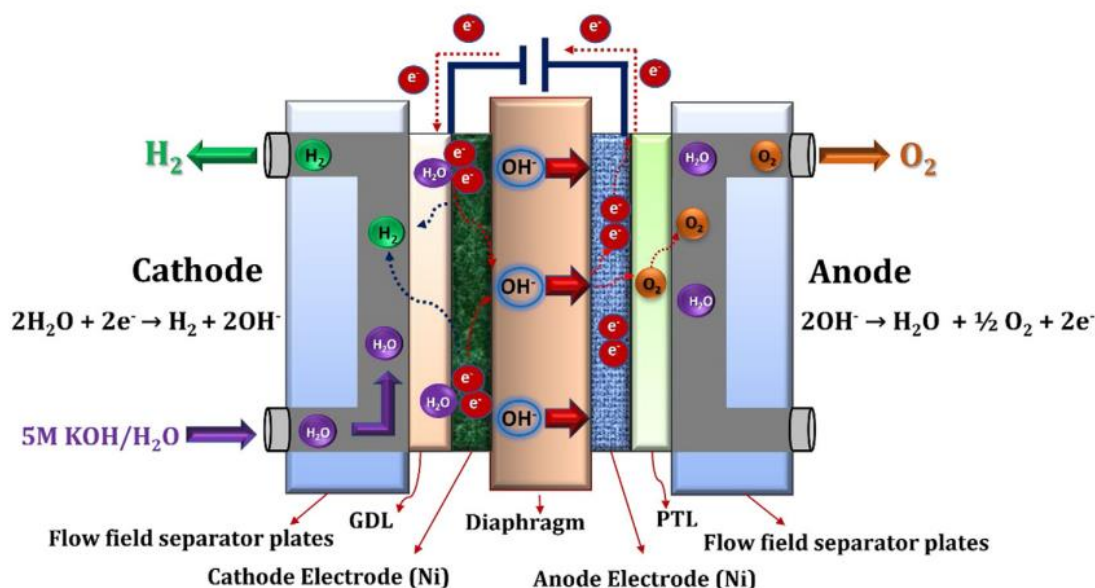
Αρχικά, η αντίδραση που διέπει την ηλεκτρόλυση είναι η εξής:



Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, οι βασικές ανεπτυγμένες και εξελισσόμενες τεχνολογίες είναι τέσσερις, τις οποίες και θα αναλύσουμε αμέσως παρακάτω:

- **Αλκαλική Ηλεκτρόλυση (ΑΕΙ)**

Η παραγωγή υδρογόνου με χρήση αλκαλικής ηλεκτρόλυσης είναι η πιο διαδεδομένη και αυτή η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο σε όλων των ειδών τις εφαρμογές μέχρι την κλίμακα των MW σε παραγωγή υδρογόνου. Η διαδικασία της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης ξεκινά αρχικά από τη μεριά της καθόδου (θετικά φορτισμένη) όπου από δύο μόρια αλκαλικού διαλύματος KOH/NaOH προκύπτει ένα μόριο υδρογόνου H₂ και δύο μόρια υδροξυλίου OH⁻. Το παραγόμενο υδρογόνο λοιπόν απομακρύνεται από την κάθοδο για να ανασυνδυαστεί σε αέρια μορφή και τα υδροξυλία μεταφέρονται, με την επικουρία του ηλεκτρικού κυκλώματος που έχει δημιουργηθεί μεταξύ ανόδου (αρνητικά φορτισμένη) και καθόδου μέσω του πορώδους διαφράγματος, προς την άνοδο όπου και μετατρέπονται σε ½ μόριο οξυγόνου O₂ και ένα μόριο νερού H₂O, τα οποία έπειτα απομακρύνονται από την άνοδο. Ο μηχανισμός της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες όπως 30 – 80 °C με ηλεκτρολύτη το υδατικό διάλυμα KOH/NaOH, η συγκέντρωση του οποίου είναι 20% έως 30%. Στη διαδικασία αλκαλικής ηλεκτρόλυσης νερού, το διάφραγμα αμιάντου και το νικέλιο χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια. Το διάφραγμα που βρίσκεται στη μέση της κυψέλης και διαχωρίζει την κάθοδο και την άνοδο καθώς επίσης και τα παραγόμενα αέρια από τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια τους και αποφεύγει την ανάμειξη των παραγόμενων αερίων της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης. Ωστόσο, η αλκαλική ηλεκτρόλυση έχει αρνητικές πτυχές, όπως περιορισμένη πυκνότητα ρεύματος (κάτω από 400 mA/cm²), χαμηλή πίεση λειτουργίας και χαμηλή ενεργειακή απόδοση [21].



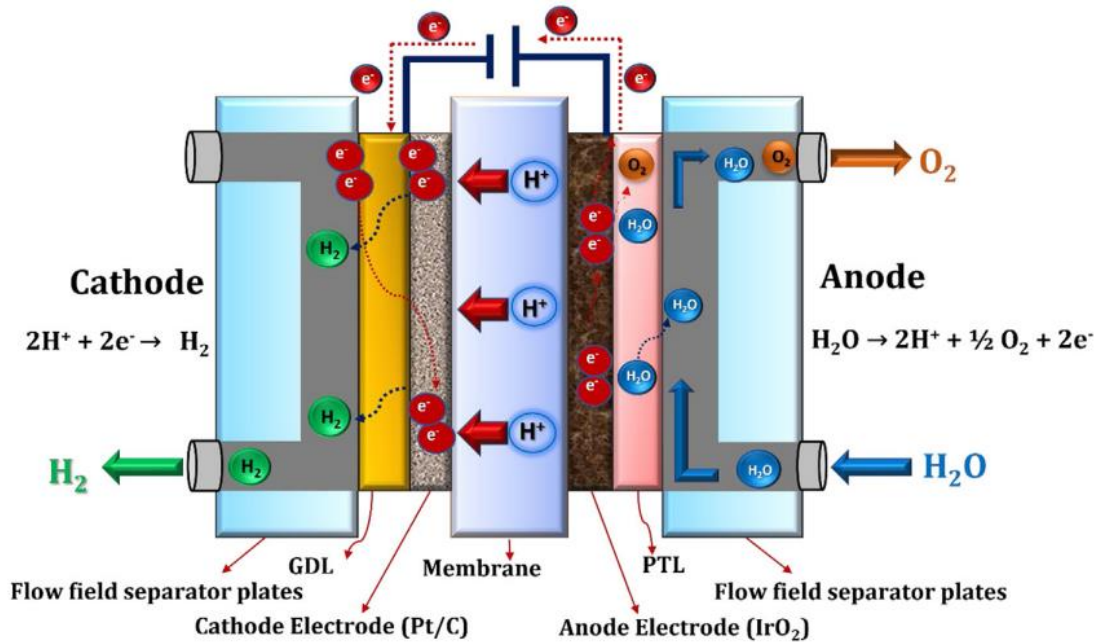
Εικόνα 11 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού αλκαλικής ηλεκτρόλυσης (ΑΕΙ)

- **Ηλεκτρόλυση Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMEL)**

Η πρώτη ηλεκτρόλυση νερού τύπου PEM σχεδιάστηκε από τον Thomas Grubb στις αρχές της δεκαετίας του '50 και η General Electric Co. την κατασκεύασε το 1966, ως μια προσπάθεια να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης νερού. Στην τεχνολογία PEM χρησιμοποιούνται οι μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων ως ηλεκτρολύτες και έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερη διαπερατότητα αερίων, υψηλή αγωγιμότητα πρωτονίων ($0,1 \pm 0,02 \text{ S/cm}$), χαμηλότερο πάχος (20–300 μm) και λειτουργίες υψηλής πίεσης.

Αναφορικά με τη βιωσιμότητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η ηλεκτρόλυση νερού PEM είναι μια από τις πιο ευνοϊκές μεθόδους για τη μετατροπή της ανανεώσιμης ενέργειας σε Υδρογόνο υψηλής καθαρότητας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει μεγάλα πλεονεκτήματα όπως συμπαγής σχεδιασμός, υψηλή πυκνότητα ρεύματος (πάνω από 2 A/cm^2), υψηλή απόδοση, γρήγορη απόκριση, μικρό αποτύπωμα, λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (20–80 °C) και παράγει υδρογόνο εξαιρετικής καθαρότητας ενώ παράγει επίσης οξυγόνο ως υποπροϊόν. Επιπλέον, η εξισορρόπηση των μονάδων ηλεκτρόλυσης PEM είναι πολύ απλή, κάτι που είναι πιο ελκυστικό για βιομηχανικές εφαρμογές. Οι ηλεκτροκαταλύτες τελευταίας τεχνολογίας που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρόλυση PEM είναι ευγενή μέταλλα υψηλής καταλυτικής δραστηριότητας, όπως Pt/Pd για την ημί-αντίδραση παραγωγής υδρογόνου (Hydrogen Evolution Reaction - HER) στην κάθοδο και IrO₂/RuO₂ ως ημί-αντίδραση παραγωγής οξυγόνου (Oxygen Evolution Reaction - OER) στην άνοδο, γεγονός που το καθιστά πιο ακριβό από την αλκαλική ηλεκτρόλυση. Επομένως, μία από τις κύριες προκλήσεις στην ηλεκτρόλυση PEM είναι η μείωση του κόστους παραγωγής και η διατήρηση της υψηλής απόδοσης. Έκτοτε, έχει γίνει σημαντική έρευνα για τη βελτίωση των στοιχείων ηλεκτρόλυσης νερού PEM, και ως εκ τούτου, αυτή η τεχνολογία πλησιάζει τις εμπορικές αγορές.

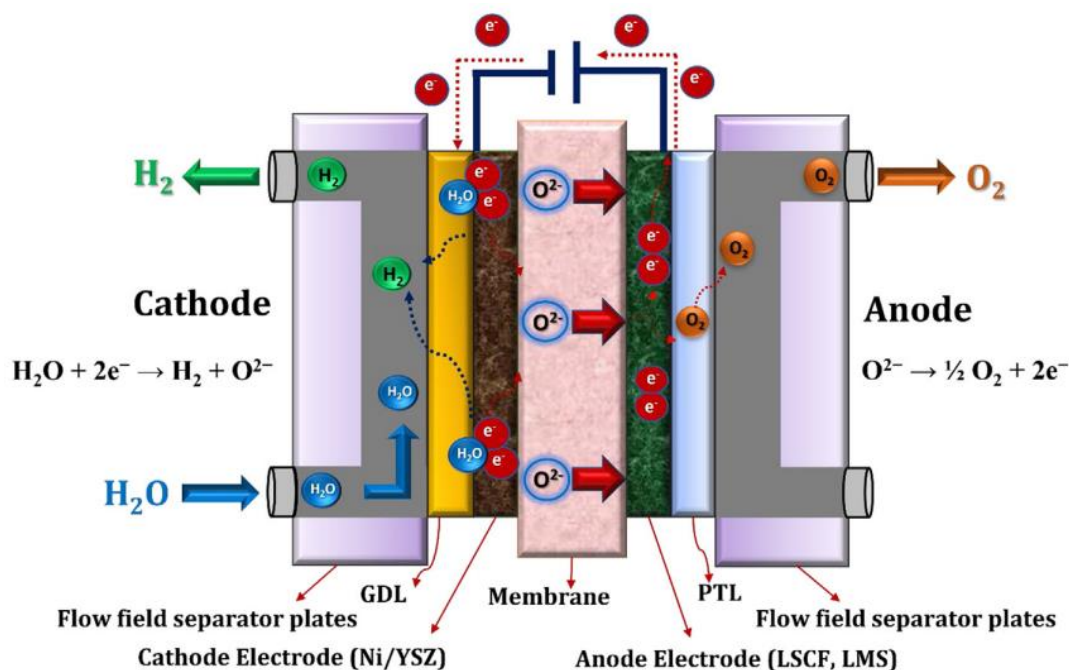
Όσον αφορά τον μηχανισμό λειτουργίας στην ηλεκτρόλυση νερού PEM, το νερό καταλήγει στην άνοδο όπου διασπάται σε οξυγόνο (O₂), πρωτόνια (H⁺) και ηλεκτρόνια (e⁻). Τα πρωτόνια ταξιδεύουν μέσω της αγωγίμης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων προς την πλευρά της καθόδου. Τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από την άνοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος ισχύος, το οποίο παρέχει την κινητήρια δύναμη (τάση κελιού – cell voltage) για την αντίδραση. Στην πλευρά της καθόδου τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια ανασυνδυάζονται για να παράγουν το Υδρογόνο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα [21].



Εικόνα 12 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMEL)

- **Ηλεκτρόλυση Στερεού Οξειδίου (SOEL)**

Η ηλεκτρόλυση στερεού οξειδίου (SOEL) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους W. Dönitz και E. Erdle τη δεκαετία του 1980. Η ηλεκτρόλυση στερεού οξειδίου λειτουργεί σε υψηλή πίεση και υψηλές θερμοκρασίες 500–850 °C και χρησιμοποιεί το νερό σε μορφή ατμού. Η διαδικασία ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου χρησιμοποιεί συμβατικά τους αγωγούς O²⁻ που είναι ως επί το πλείστον σταθεροποιημένη ζirkονία με νικέλιο/υττρία. Σήμερα, η προσοχή στα κεραμικά υλικά που άγουν πρωτόνια αυξάνεται, καθώς αυτά τα υλικά επιδεικνύουν υψηλή απόδοση και ανώτερη ιοντική αγωγιμότητα από τους αγωγούς O²⁻ σε θερμοκρασία λειτουργίας 500–700 °C. Τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας (SOEL) είναι η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας που την καθιστά πλεονεκτική σε σύγκριση με την ηλεκτρόλυση χαμηλής θερμοκρασίας. Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογία έχει ορισμένα ζητήματα που σχετίζονται με την έλλειψη σταθερότητας και την υποβάθμιση της απόδοσης (degradation), τα οποία πρέπει να επιλυθούν πριν φτάσει στην εμπορευματοποίηση σε μεγάλη κλίμακα [21].



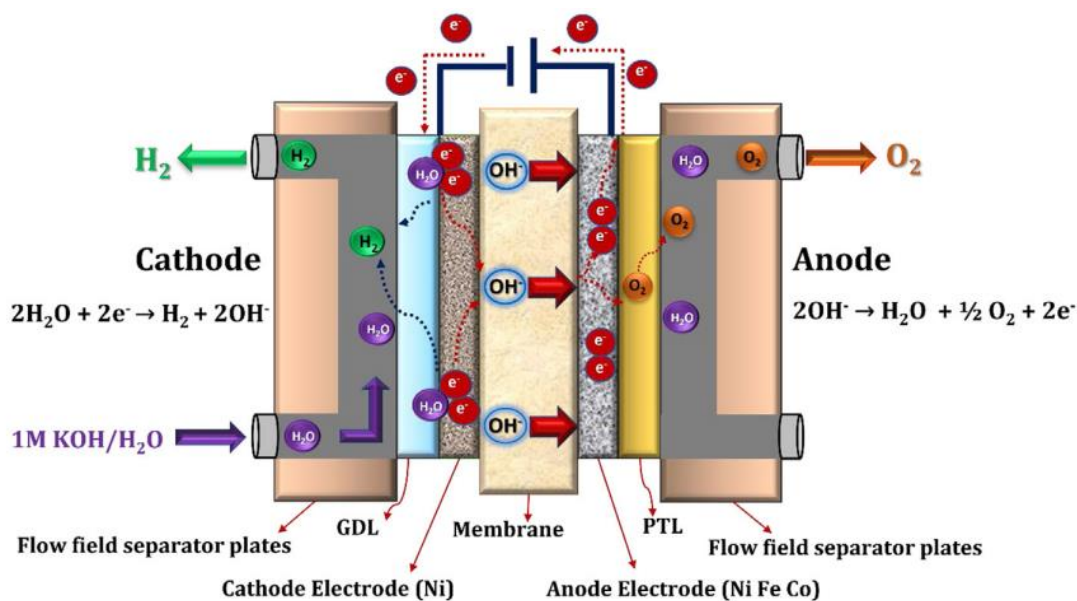
Εικόνα 13 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου (SOEL)

- **Ηλεκτρόλυση Μεμβράνης Ανταλλαγής Ιόντων (AEMEL)**

Η τεχνολογία ηλεκτρόλυσης με μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων (AEMEL) είναι ο συνδυασμός των τεχνολογιών της ηλεκτρόλυσης τύπου PEM και AEL, η οποία χρησιμοποιεί μια μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων ως διαχωριστή για να παρέχει ένα αλκαλικό περιβάλλον διεπαφής. Κατ' αρχήν, επιτρέπει τη χρήση των οικονομικά αποδοτικών καταλυτών και υλικών όπως στην ηλεκτρόλυση τύπου AEL ενώ μπορεί να παράγει υψηλής ποιότητας H₂ σε υψηλό επίπεδο ρεύματος όπως η ηλεκτρόλυση τύπου PEM, παρουσιάζοντας έτσι ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον. Δεδομένου ότι η AEMEL εμφανίστηκε μόλις αυτή τη δεκαετία, πρέπει να αναπτυχθούν περισσότερες προσπάθειες με βάση το σχεδιασμό υλικών, τη βελτιστοποίηση εξαρτημάτων και την αξιολόγηση της απόδοσης για να γίνει ανταγωνιστικό εμπορικά. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, το κεντρικό εξάρτημα στη διαμόρφωση του ηλεκτρολύτη είναι η συνδεσμολογία ηλεκτροδίων - μεμβράνης (Membrane Electrode Assembly - MEA), η οποία έχει πολυεπίπεδη δομή με στρώματα όπου η μεμβράνη τοποθετείται μεταξύ του πορώδους στρώματος μεταφοράς (Porous Transport Layer – PTL) με τους επικαλυμμένους καταλύτες ανόδου, καθώς και του πορώδους στρώματος διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer – GDL) με τους επικαλυμμένους καταλύτες καθόδου. Η λειτουργία αυτών των στρωμάτων (σύνθετες υλικό ο αφρός νικελίου/κάλυμμα άνθρακα) είναι να διασφαλίζουν την αποτελεσματική μεταφορά και απομάκρυνση αντιδρώντων και προϊόντων από και προς το

στρώμα του καταλύτη, αντιστοίχως (πάχος μικρότερο από 100 μm) ώστε η MEA να δύνανται να επιτρέψει μεγάλη πυκνότητα ρεύματος λειτουργίας ($\approx 2 \text{ A/cm}^2$).

Η ηλεκτρόλυση νερού AEMEL είναι παρόμοια με την αντίδραση διάσπασης νερού σε ηλεκτρόλυση τύπου AEL, αλλά πιο πολύπλοκη. Γενικά, το νερό παρέχεται στην πλευρά της καθόδου και πραγματοποιείται η ημί-αντίδραση παραγωγής υδρογόνου για τη δημιουργία H_2 και OH^- . Στη συνέχεια, το OH^- διαχέεται αυτόματα κατά μήκος του ηλεκτρολύτη προς την πλευρά της ανόδου για την ημί-αντίδραση παραγωγής οξυγόνου, όπως και φαίνεται στην επόμενη εικόνα [22].



Εικόνα 14 Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής ανιόντων (AEMEL)

2.2.3 Στόχοι και Πρωτοβουλίες

Το γεγονός ότι το υδρογόνο και τα καύσιμα βασισμένα στο υδρογόνο δύνανται να διαδραματίσουν έναν ιδιαίτερος σημαντικό ρόλο στην απανθρακοποίηση τομέων όπου οι εκπομπές είναι δύσκολο να εκμηδενίσουν τις εκπομπές και εναλλακτικές λύσεις είναι δύσκολο να εφαρμοστούν καθίσταται προφανές πλέον. Ωστόσο, το οικονομικό εμπόδιο ενός τέτοιου ενεργειακού άλματος συνεχίζει να υπάρχει και αποτελεί το βασικότερο πρόβλημα προς επίλυση για να ακολουθήσει και μία ευρεία υιοθέτηση αυτού του “energy carrier”, όπως παρατηρείται και στον επόμενο πίνακα, με το «πράσινο» υδρογόνο να συγκρίνεται με τις υπόλοιπες επικρατούσες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου.

Πίνακας 1 "Χρώμα" υδρογόνου, τεχνολογία, κόστος και εκπομπές CO₂

«Χρώμα» Υδρογόνου	Τεχνολογία	Πηγή	Προϊόντα	Κόστος [\$ kg/H ₂]	Εκπομπές CO ₂
Καφέ Υδρογόνο	Αεριοποίηση	Λιγνίτης	H ₂ + CO ₂	1.2 – 2.1	Υψηλές
Μαύρο Υδρογόνο	Αεριοποίηση	Μαύρος Άνθρακας (Ασφαλτώδης)	H ₂ + CO ₂	1.2 – 2.1	Υψηλές
Γκρι Υδρογόνο	Αναμόρφωση	Φυσικό Αέριο	H ₂ + CO ₂	1 – 2.1	Μέτριες
Μπλε Υδρογόνο	Αναμόρφωση + Carbon Capture	Φυσικό Αέριο	H ₂ + CO ₂ (Φυλάκιση 85 – 95%)	1.5 – 2.9	Χαμηλές
Πράσινο Υδρογόνο	Ηλεκτρόλυση	Νερό	H ₂ + O ₂	3.6 – 5.8	Μηδενικές

[19]

Παρ' αυτά τα εμπόδια που έχουν ανακύψει για την παραγωγή υδρογόνου και ιδιαιτέρως υδρογόνου με σχεδόν μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ένας συνεχώς αυξανόμενος αριθμός χωρών παρουσιάζουν εθνικές στρατηγικές και υιοθετούν ισχυρές πολιτικές για να υποστηρίξουν αυτήν τη μετάβαση, αν και σε ένα χρονικό πλαίσιο αρκετά μελλοντικό.

Οι ΗΠΑ και η Ευρωπαϊκή Ένωση ηγούνται στην παρουσίαση υποστηρικτικών νομοθετικών πολιτικών, ενώ η Κίνα είναι πολύ μπροστά όσον αφορά την εγκαθίδρυση και τις νέες εγκαταστάσεις τέτοιων τεχνολογιών. Πιο συγκεκριμένα:

- Η **Κίνα** ηγείται στις νέες εγκαταστάσεις ηλεκτρολυτών, με μία συνολική ικανότητα παραγωγής ισχύος περίπου 220 MW και 750 MW βρίσκονται υπό κατασκευή και αναμένεται να τεθούν σε λειτουργία φέτος.
- Η **Ευρωπαϊκή Ένωση** υιοθέτησε δύο κατ' εξουσιοδότηση πράξεις το Φεβρουάριο του 2023 με κανόνες που καθορίζουν το «πράσινο» υδρογόνο, επικύρωσε τη χρηματοδότηση των δύο πρώτων κυμάτων Σημαντικών Προγραμμάτων Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος (Important Projects of Common European Interest) με επίκεντρο το υδρογόνο και τέλος, ανακοίνωσε τις πρώτες δημοπρασίες της Ευρωπαϊκής Τράπεζας Υδρογόνου για το τέλος του 2023.

- Η **Ινδία** επικύρωσε τον Ιανουάριο του 2023 την Εθνική Αποστολή Πράσινου Υδρογόνου (National Green Hydrogen Mission) με απώτερο στόχο την παραγωγή 5 Mt ανανεώσιμου υδρογόνου μέχρι το 2030 και την απόκτηση του τίτλου ηγέτη κατασκευαστή ηλεκτρολυτών.
- Το **Ηνωμένο Βασίλειο** εξέδωσε τον Ιούλιο του 2022 το Πρότυπο Υδρογόνου Χαμηλών Εκπομπών (Low-Carbon Hydrogen Standard) και το Φεβρουάριο του 2023 δημιούργησε ένα συνέδριο για την έκδοση πιστοποιητικών. Για την περαιτέρω υποστήριξη προγραμμάτων παραγωγής υδρογόνου με χρήση ηλεκτρόλυσης τέθηκε εν ενεργεία ο πρώτος Electrolytic Allocation Round ο οποίος έως το τέλος του 2023 θα δύναται να εκδίδει συμβόλαια.
- Οι **ΗΠΑ** ανακοίνωσαν τον Αύγουστο του 2022 σημαντικά κίνητρα για την παραγωγή υδρογόνου μηδενικών εκπομπών, υπό την αιγίδα της Πράξης Μείωσης Πληθωρισμού (Inflation Reduction Act).
- Η **Ναμίμπια** εξέδωσε το Νοέμβριο του 2022 τη Στρατηγική περί Πράσινου Υδρογόνου και Παραγωγών, με αυτόν τον τρόπο γίνεται η δεύτερη υποσαχάρια χώρα μετά τη Νότιο Αφρική που υιοθετεί στρατηγική περί παραγωγής υδρογόνου.

[5]

3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

3.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ολοκληρωμένα υβριδικά συστήματα τέτοιου τύπου βρίσκονται σε λειτουργία σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο. Ένα από αυτά, το οποίο συνιστά και ένα από τα πρώτα επιτυχημένα και πλήρως ανεξαρτητοποιημένα από τον ηλεκτροδοτικό ιστό, είναι εγκατεστημένο στη Γερμανία και είναι γνωστό με την κωδική ονομασία PHOEBUS και χρησιμοποιείται για να παρέχει ενέργεια σε μία βιβλιοθήκη. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ομαλή και αξιόπιστη συνεργασία των βασικών του συστημάτων που το απαρτίζουν και είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι ανεμογεννήτριες και οι μπαταρίες. Η όποια προκύπτουσα περίσσεια ισχύος αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου από τον ηλεκτρολύτη. Όποτε υπάρχει έλλειμμα ισχύος από την άλλη γίνεται κατανάλωση του υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου (Fuel Cell) ώστε να καλυφθεί αυτό το κενό ισχύος [23]. Επί πρόσθετα, ο επιστήμονας Øystein Ulleberg ανέπτυξε ένα μοντέλο ολοκληρωμένου αυτόνομου υβριδικού συστήματος βασιζόμενος στο σύστημα PHOEBUS ως βασικό κομμάτι της διδακτορικής του διατριβής και αποτέλεσε αυτό το έργο του σημαντική κατευθυντήρια γραμμή ως προς τη διεκπεραίωση και επιστημονική επικύρωση της παρούσας εργασίας [24].

Σε ένα άλλο άρθρο, η Αλγερινή Κυβέρνηση έθεσε σε λειτουργία ένα Εθνικό Πρόγραμμα Έρευνας μέσω του DGRST (General Direction of Scientific Research and Technological Development) που απώτερο σκοπό έχει την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών. Ανάμεσα στα επικυρωμένα προγράμματα ήταν και το SOLAHYD, ένα πιλοτικό πειραματικό πρόγραμμα περί παραγωγής υδρογόνου με την εγκαθίδρυση ενός test bench που συνίσταται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ και τον ηλεκτρολύτη. Βασικά ευρήματα αυτού του προγράμματος είναι η μοντελοποίηση και η προσομοίωση της απόδοσης του συστήματος, καθώς και η ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου, αναλόγως την περιοχή και τις εκάστοτε συνθήκες [1]. Άλλο ένα ομοσπονδιακό πρόγραμμα που προβλέπεται να φιλοξενήσει η Αλγερία είναι το MedHySol (Mediterranean Hydrogen Solar), με στόχο τη δημιουργία μίας τεράστιας αλυσίδας παραγωγής και διανομής υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών εντός ενός πλαισίου σύμπραξης Ευρώπης – Μαγκρέμπ στο μεσογειακό λεκανοπέδιο. Η πρώτη παρουσίαση αυτού του προγράμματος είχε γίνει το 2005 ωστόσο δεν έχει τεθεί σε εφαρμογή ακόμη, παρά τις διάφορες μελέτες [25].

Ένα άλλο πρόγραμμα για το οποίο έχει ολοκληρωθεί η προκαταρκτική μελέτη και πιλοτικές δοκιμές είναι το Green Hysland στη Μαγιόρκα, όπου ο ηλεκτρολύτης των 2,5 MW θα

λειτουργεί 24/7 και θα έχει τη δυνατότητα να παράγει 300 τόνους «πράσινου» υδρογόνου το χρόνο αφού η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από δύο φωτοβολταϊκά πάρκα, συνολικής ισχύος 14 MW. Το παραγόμενο υδρογόνο θα χρησιμοποιηθεί στον ανεφοδιασμό ενός νέου στόλου λεωφορείων με κυψέλες καυσίμου, καθώς και το υπόλοιπο της παραγόμενης, καθαρής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά θα χρησιμοποιηθεί για να ηλεκτροδοτηθεί ένα ξενοδοχείο. Αυτό το πρόγραμμα που θα «τρέξει» σε στάδιο RTD (Research, Technological Development and Demonstration) για 5 χρόνια έχει χρηματοδότηση ύψους 50 εκατομμυρίων, με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής μέσω του FCH JU και της τοπικής κυβέρνησης της Ισπανίας μέσω του IDAE [26].

Ένα δεύτερο πρότζεκτ, αυτή τη φορά για μεμονωμένες κτιριακές εγκαταστάσεις, βρίσκεται σε εξέλιξη στη Μούρθια. Ένα φωτοβολταϊκό πάρκο το οποίο θα συνδεθεί με μία ηλεκτρολυτική εγκατάσταση για να παράξει καθαρό υδρογόνο που θα χρησιμοποιηθεί στη λειτουργία ενός μπόιλερ σε μία νοσοκομειακή εγκατάσταση. Παράλληλα, το οξυγόνο που θα προκύπτει σαν προϊόν αυτής της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης θα συλλέγεται και θα αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση από το νοσοκομειακό προσωπικό, αφού η πανδημία και διάφορες άλλες ασθένειες αύξησαν τις απαιτήσεις σε οξυγόνο κατά 50% και άρα καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη του σε απόθεμα ανά πάσα στιγμή [26].

Επί πρόσθετα, η ολοκλήρωση του Ningxia Solar Hydrogen Project στην Κίνα εκτόξευσε την ικανότητα κάλυψης ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως από ηλεκτρόλυση, με τον αλκαλικό ηλεκτρολύτη αυτού του προγράμματος των 150 MW ο οποίος συνδέεται με ένα φωτοβολταϊκό πάρκο των 200 MW να είναι υπεύθυνος για $\frac{3}{4}$ αυτής της αύξησης και ταυτόχρονα να κατέχει τον τίτλο για τη μεγαλύτερη μονάδα ηλεκτρόλυσης σε λειτουργία. Ωστόσο, η κατασκευή μίας ακόμη μεγαλύτερης ηλεκτρολυτικής μονάδας των 260 MW στη βορειοδυτική Κίνα (ολοκλήρωση στα μέσα του 2023) η οποία θα αντλεί ηλεκτρική ενέργεια από μία συστοιχία φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων της κλίμακας των 300 MW. Με έναν προϋπολογισμό περίπου τα 200 εκατομμύρια ευρώ, οι προσδοκίες είναι μεγάλες και υπολογίζεται ότι θα είναι δυνατή η παραγωγή 23700 τόνων «πράσινου» υδρογόνου το χρόνο, με την ηλεκτρολυτική μονάδα να λειτουργεί 24/7 [26].

Επί πρόσθετα, ένα μοντέλο σχεδιασμού και βελτιστοποίησης αυτόνομων (off – grid) υβριδικών ενεργειακών συστημάτων αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της πιο συμφέρουσας λύσης για το νησί Stromboli στη Νότιο Ιταλία. Τα συστήματα που δοκιμάστηκαν απαρτίζονται από φωτοβολταϊκά, ηλεκτρολύτες, δεξαμενές αποθήκευσης, κυψέλες καυσίμου αλλά και μπαταρίες, με συνολικά χαμηλό ρυθμιζόμενο κόστος ενέργειας (LCOE) συγκριτικά με τις

γεννήτριες συμβατικών καυσίμων, μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα αλλά και δυνατότητα ολικής κάλυψης των ενεργειακών αναγκών που προκύπτουν στη διάρκεια του έτους [27].

3.2 Περιγραφή Ολοκληρωμένου Συστήματος

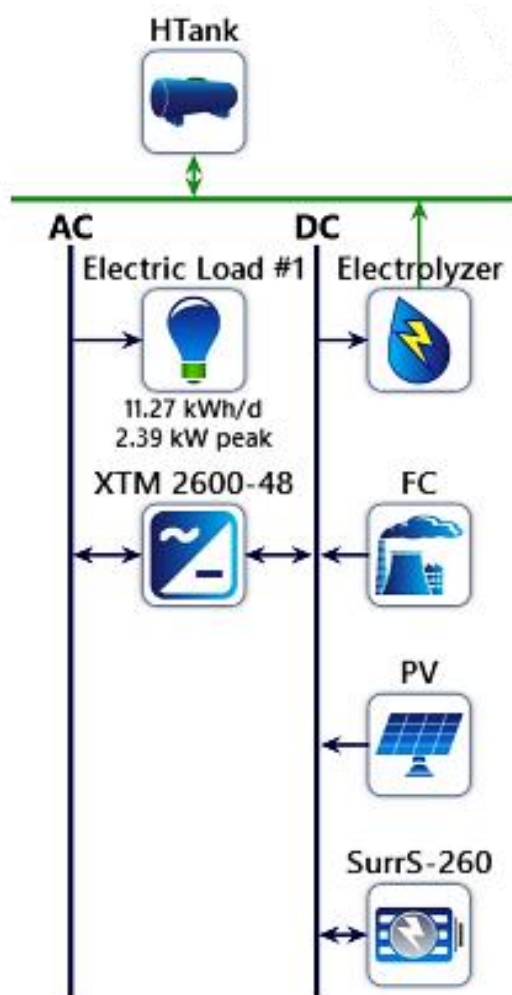
Αρχικά, τα συστήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω αποτελούν βασικά παραδείγματα λειτουργίας ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής «πράσινου» υδρογόνου με χρήση φωτοβολταϊκών, είτε σε πειραματική είτε σε μαζική κλίμακα. Έτσι, το σύστημα που θα αναλυθεί παρακάτω αποτελεί προϊόν έμπνευσης από αυτές αλλά και διάφορες άλλες θεωρητικές, πειραματικές και μαζικές εφαρμογές όπως θα φανεί και παρακάτω.

Πρωταρχικός στόχος του συστήματος αυτού είναι η πλήρης κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μίας απομακρυσμένης (πχ νησιωτικής) κατοικίας, η οποία δεν δύναται να τροφοδοτηθεί από ένα συμβατικό ηλεκτρικό δίκτυο. Για αυτό, αξιοποιώντας την περίσσεια ηλιακή ακτινοβολία τη μετατρέπουμε σε ηλεκτρική ενέργεια με χρήση φωτοβολταϊκών. Μέρος αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας οδηγείται και στον ηλεκτρολύτη, ο οποίος παράγει υδρογόνο το οποίο αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή ώστε να καταναλωθεί από την κυψέλη καυσίμου σε δεύτερο χρόνο. Ωστόσο, αφού υπάρχει και ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια και κατά τη διάρκεια της νύχτας ή γενικώς όταν υπάρχει έλλειμμα ηλιακής ακτινοβολίας, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά αποθηκεύεται σε μπαταρίες οι οποίες δύναται να καλύψουν και τις ενεργειακές ανάγκες από μόνες τους ή εάν παραστεί η ανάγκη (πχ μεγάλη αύξηση ηλεκτρικού φορτίου) ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου που θα καταναλώσει το αποθηκευμένο υδρογόνο και θα λειτουργεί με επικουρικό τρόπο στην παροχή ηλεκτρισμού. Φυσικά, σε περίπτωση που οι μπαταρίες είναι αποφορτισμένες έως ένα επιτρεπτό ποσοστό που έχει οριστεί (50%) όταν υπάρχει έλλειψη ηλιακής ακτινοβολίας, η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου καθίσταται απαραίτητη ώστε να «κορεστεί» η απαιτούμενη ανάγκη ηλεκτροδότησης. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα προς ανάλυση δεν εξετάζει την κάλυψη των αναγκών ηλεκτροδότησης από το δίκτυο αφού αυτό θα κατέλυε την έννοια ενός αυτόνομου συστήματος.

Γίνεται άμεσα κατανοητό από την παραπάνω συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας του εν λόγω συστήματος ότι είναι απαραίτητη η ορθή και συντονισμένη λειτουργία όλων των εξαρτημάτων αυτού του περίπλοκου συστήματος. Για το λόγο αυτό, σε επόμενο κεφάλαιο,

θα περιγραφεί και μία διαδικασία βελτιστοποίησης καθώς και σύγκρισης με άλλα αυτόνομα συστήματα μέσω ενός προγράμματος προσομοιώσεων.

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται και με σχηματικό τρόπο το προτεινόμενο σύστημα που θα αναλυθεί εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια:



Εικόνα 15 Σχηματική περιγραφή προτεινόμενου συστήματος

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, ο ηλεκτρολύτης, η κυψέλη καυσίμου, τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι συστοιχίες μπαταριών είναι συνδεδεμένα στο DC (συνεχές ρεύμα) bus του συστήματος αφού η είσοδος (ηλεκτρολύτης) και η έξοδος (κυψέλη καυσίμου, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες) ηλεκτρικού ρεύματος είναι σε μορφή DC. Για να γίνει η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (AC), το οποίο και απαιτείται, χρειάζεται ένας εναλλάκτης (inverter).

Αναλυτικότερα, το σύστημα προς ανάλυση περιλαμβάνει τις εξής συσκευές:

- 25 φωτοβολταϊκά πάνελ PEIMAR SF400M, συνδεδεμένα σε σειρά, συνολικής επιφάνειας 49.78 m² και συνολικής ισχύος 10 kWp (400 W μέγιστη ονομαστική ισχύς κάθε πάνελ)
- 2 συστοιχίες μπαταριών Rolls – Surrette 6 CS 25P με ονομαστική τάση λειτουργίας 24 V συνολικά, μέσω σύνδεσης 4 μπαταριών σε σειρά και με ονομαστική χωρητικότητα 820 Ah η κάθε συστοιχία
- 1 ηλεκτρολύτης με μέγιστη ονομαστική ισχύ λειτουργίας 3.5 kW και ελάχιστη ισχύ λειτουργίας 0.7 kW (20% μέγιστης ονομαστικής ισχύος), θερμοκρασία λειτουργίας 353 K και πίεση λειτουργίας 10 bar
- 1 δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου χωρητικότητας 600 lt υπό πίεση 16 bar (≈ 25.24 kWh)
- 1 κυψέλη καυσίμου με μέγιστη ονομαστική ισχύ λειτουργίας 0.6 kW και ελάχιστη ισχύ λειτουργίας 0.15 kW (25% μέγιστης ονομαστικής ισχύος λειτουργίας), θερμοκρασία λειτουργίας 353 K και πίεση λειτουργίας 5 bar
- 1 εναλλάκτης DC/AC (inverter) μέγιστης ονομαστικής ισχύος 2.4 kW
- 1 μετατροπέας DC/DC (converter) φωτοβολταϊκών πάνελ
- 1 μετατροπέας DC/DC (converter) κυψέλης καυσίμου

Τέλος, το ηλεκτρικό φορτίο που πρέπει να καλύψουν οι παραπάνω συσκευές είναι κατά μέσο όρο 11.27 kWh/ημέρα, με άνω όριο απαίτησης ισχύος ίσο με 2.39 kW, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15.

Αυτά τα δεδομένα αναφέρονται εδώ και θα χρειαστούν για την οικονομική ανάλυση του συστήματος καθώς και τη βελτιστοποίηση και σύγκριση του με άλλα αυτόνομα συστήματα σε επόμενο κεφάλαιο.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγικά

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την αναλυτική προσέγγιση των επιμέρους συσκευών που αποτελούν το σύστημα που εξετάζουμε. Παραθέτοντας τις εξισώσεις στις οποίες υπακούν, τις αρχές στις οποίες βασίζονται αλλά και τα πρόσθετα χαρακτηριστικά τους θα διευκολυνθεί η μοντελοποίησή τους και η διασύνδεση τους με το σύστημα ως όλον. Παράλληλα, η παρουσίαση διαγραμμάτων, πινάκων και όχι μόνο (μοντελοποίηση ηλεκτρολυτικού στελέχους με χρήση ASPEN Plus) με τις μεταβολές των βασικών συντελεστών και μεταβλητών του εκάστοτε υποσυστήματος θα επιτευχθεί και μία σημαντική οπτικοποίηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις συσκευές αυτές. Τέλος, στην αρχή του κάθε υποκεφαλαίου παρουσιάζεται στον αναγνώστη μία βιβλιογραφική ανασκόπηση για κάθε μία από τις συσκευές που θα αναλυθούν, συμπεριλαμβανομένων διάφορων μοντέλων και μεθόδων προσέγγισης μοντελοποίησης τους.

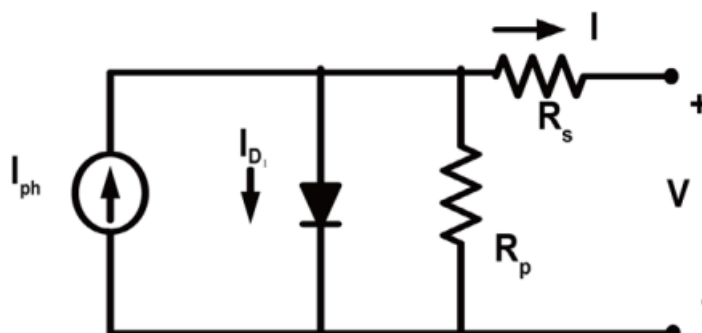
4.2 Φωτοβολταϊκά

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες αποτελούν το βασικότερο πυλώνα του αυτόνομου συστήματος μας αφού συνιστούν τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας για τις υπόλοιπες συσκευές. Επομένως, σε μία χώρα όπως η δική μας που χαρακτηρίζεται από πλεονάζουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι λογικό πως η συντριπτική πλειονότητα των αυτόνομων ή και ημί – αυτόνομων συστημάτων θα την εκμεταλλευθούν στο έπακρο. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο ουσιαστικά αποτελείται από δύο ημιαγωγούς, ο ένας n – type και ο άλλος p – type. Αυτά τα ημιαγώγιμα υλικά λοιπόν υπακούν στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο όταν προσπίπτουν φωτόνια επί του κυττάρου η ενέργεια τους μετατρέπεται σε ηλεκτρική και ρέει με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος από το κύτταρο. Ωστόσο, αυτή η μετατροπή υπόκειται σε μεγάλο ποσοστό απωλειών οπότε και ένα μέρος μόνον της ηλιακής ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

4.2.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

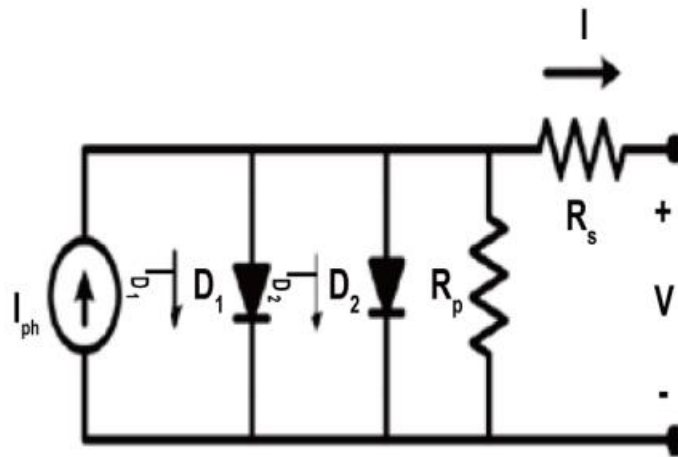
Τα βασικότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών συσκευών βασίζονται στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (σχέση τάσης – ρεύματος) των κυττάρων, σε διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Αυτά είναι το **μοντέλο μίας διόδου** το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και το **μοντέλο δύο διόδων** [24].

Το μοντέλο μίας διόδου συνιστά το πλέον απλοποιημένο αφού έχει μία πηγή ρεύματος παράλληλη της διόδου, με τα ηλιακά κύτταρα να είναι συνδεδεμένα εν σειρά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 16. Παρά την απλοποιημένη του μορφή όμως τα αποτελέσματα προκύπτουν πλέον ικανά για τη γρήγορη μοντελοποίηση που αποζητούμε και με εναλλαγές των τιμών των σημαντικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία για πιο ενδελεχή ανάλυση. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο αυτό μελετά ουσιαστικά τη συμπεριφορά ενός κυττάρου και αυτή μεταφέρεται και στα υπόλοιπα φωτοβολταϊκά κύτταρα [28]. Όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ, το μοντέλο αυτό βασίζεται κατά κύριο λόγο στην επιφάνεια που καλύπτουν τα φωτοβολταϊκά κύτταρα και στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω τους και απορροφούν αλλά και σε ένα βαθμό και στη θερμοκρασία που επικρατεί και στις απώλειες που χαρακτηρίζουν όλο το υποσύστημα.



Εικόνα 16 Μοντέλο κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου σε ανάλυση μίας διόδου [29]

Το μοντέλο δύο διόδων, του οποίου το κύκλωμα αναπαρίσταται στην Εικόνα 17, αποτελεί μία πιο αναλυτική εκδοχή του μοντέλου μίας διόδου, με τη διαφορά ότι στο ισοδύναμο κύκλωμα υπάρχει μία συνδεδεμένη δίοδος σε παράλληλη σύνδεση με την πρώτη [24], [28]. Το βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου δύο διόδων είναι η αυξημένη ακρίβεια του συγκριτικά με το μοντέλο μίας διόδου. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτή η ακρίβεια του είναι απαραίτητες 8 παράμετροι αντί για 5 που χρειάζονται στο πιο απλοποιημένο μοντέλο όπως θα παρουσιαστεί και άρα, απαιτείται περισσότερος χρόνος για τη λήψη αποτελεσμάτων. Επιπλέον, παρά την αυξημένη του ακρίβεια, οι καμπύλες $I - V$ των δύο μοντέλων για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας συγκλίνουν προς την ίδια καμπύλη [24], [28]. Επομένως, το μοντέλο δύο διόδων προτιμάται μόνον εάν είναι απαραίτητη η μέγιστη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων και όταν αναλυτικά πειράματα του φωτοβολταϊκού συστήματος δύνανται να πραγματοποιηθούν εκ των προτέρων [24].



Εικόνα 17 Μοντέλο κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου σε ανάλυση δύο διόδων [29]

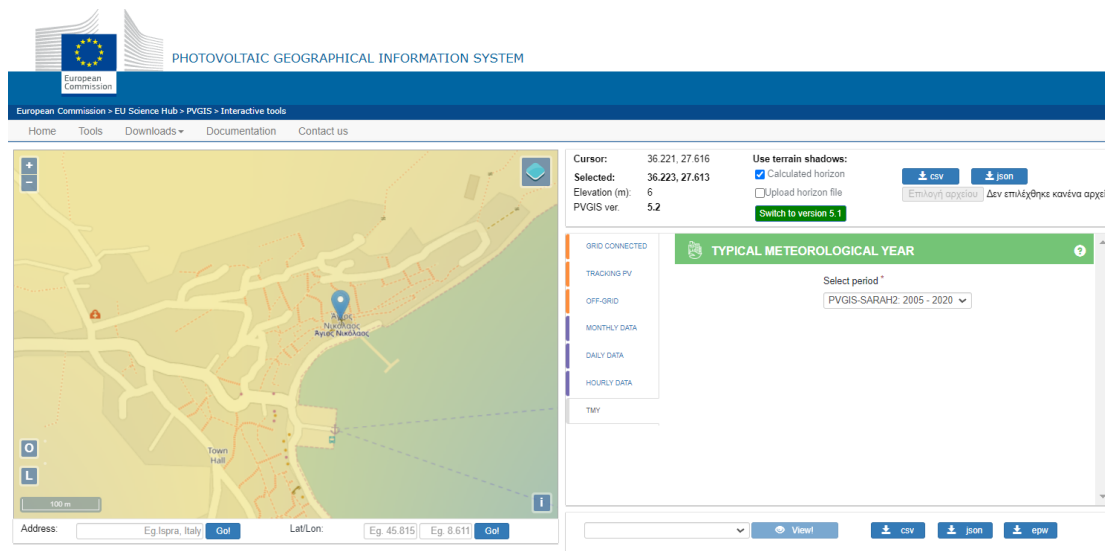
Τέλος, άλλο ένα διαδεδομένο μοντέλο ανάλυσης της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων και αρκετά διαφορετικό από τα προηγούμενα είναι και το θερμικό μοντέλο και οι παραλλαγές του. Η βασικότερη αρχή αυτού του μοντέλου είναι ότι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού εξαρτάται κυρίως από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες αλλά και από τη λειτουργία της συσκευής. Η ηλιακή ενέργεια όπως ειπώθηκε και πιο πάνω μετατρέπεται εν μέρει σε ηλεκτρική, με το υπόλοιπο κομμάτι να μετατρέπεται σε θερμική, η οποία και απομακρύνεται με χρήση των αρχών της αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας με το ρυθμό αυτής της διαδικασίας να εξαρτάται όσο επί το πλείστον στο σχεδιασμό του φωτοβολταϊκού συστήματος. Αυτό το θερμικό μοντέλο βασίζεται στην ενεργειακή ισορροπία που προτάθηκε από τους Duffie και Beckman το 1991 [30] της οποίας η φόρμουλα δίνεται ως εξής:

$$C_t \frac{dT_c}{dt} = \tau \alpha G_T - \eta_c G_T - U_L (T_c - T_a)$$

Το πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι, σε αντίθεση με πιο αναλυτικά μοντέλα, οι πληροφορίες που απαιτούνται για το σχεδιασμό του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι σχετικά λίγες και αυτό επειδή οι θερμικές απώλειες συνοψίζονται σε ένα συνολικό συντελεστή θερμικής απώλειας U_L [24].

4.2.2 Μετεωρολογικό Μοντέλο

Πρώτα από όλα, έγινε χρήση του προγράμματος PVGIS της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη συλλογή των ωριαίων δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας σχετικά με την τοποθεσία που επιλέχθηκε όπως φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18 Ρύθμιση Προγράμματος PVGIS

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τρεις συνιστώσες, οι οποίες και συνιστούν την ολική ακτινοβολία επί του πάνελ μέσω του εξής τύπου:

$$G(t) = G_{b,n}(t) \cos(\theta) + G_{d,h}(t)F_{c,s} + G_{t,h}(t)\rho_g F_{c,g} \quad 4.2.1$$

όπου:

$G_{b,n}$ = άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία [W/m^2]

$G_{d,h}$ = διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια [W/m^2]

$G_{t,h}$ = ολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια [W/m^2]

$\cos(\theta)$ = συνημίτονο γωνίας πρόσπτωσης

$F_{c,s}$ = παράμετρος διαχυτότητας ηλιακής ακτινοβολίας

$F_{c,g}$ = παράμετρος ανακλαστικότητας ηλιακής ακτινοβολίας

ρ_g = αλμπίντο του εδάφους = 0.2 [31]

Ο υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης θ και των δύο παραμέτρων $F_{c,s}$ και $F_{c,g}$ γίνεται με χρήση των παρακάτω τύπων:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cos(\theta_z) + \sin(\beta) \sin(\theta_z) \cos(\varphi_s - \varphi) \quad [27]$$

$$F_{c,s} = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

$$F_{c,g} = \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

[31]

όπου:

β = βέλτιστη γωνία προσανατολισμού επικλινούς επιφάνειας ($\cos(\theta) = 0$)

θ_z = γωνία ζενίθ

φ_s = ηλιακό αζιμούθιο

φ = επιφανειακό αζιμούθιο

Οι προαναφερθείσες συνιστώσες περιγράφονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \sin(\gamma) + \cos(\delta) \cos(\gamma) \cos(\omega)$$

$$\cos(\varphi_s) = \frac{\cos(\theta_z) \sin(\gamma) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z) \cos(\gamma)}$$

[31]

όπου:

δ = ηλιακή απόκλιση

γ = γωνία γεωγραφικού πλάτους

ω = ωριαία γωνία

Τέλος, αυτές οι συνιστώσες των παραπάνω τύπων δίνονται από τους εξής τύπους:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{(284 + n_{day}) 360}{365} \right]$$

$$\omega = 15(h - h_{s,n})$$

[31]

όπου:

n_{day} = αριθμός ημέρας του χρόνου

h = ώρα ημέρας

$h_{s,n}$ = ώρα ηλιακού μεσημεριού = 12

Η παραγόμενη ισχύς από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες λοιπόν αφού βρέθηκε η ολική ακτινοβολία που λαμβάνεται από την επικλινή επιφάνεια δίνεται από την εξής φόρμουλα:

$$P(t) = f_{PV} P_{\text{rated}} \left(\frac{G(t)}{G_{\text{STC}}} \right) \left(1 + \gamma_T (T_{\text{cell}}(t) - T_{\text{cell,STC}}) \right)$$

με τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πάνελ T_{cell} κάθε στιγμή να δίνεται από τον τύπο:

$$T_{\text{cell}}(t) = T_a(t) + \left(\frac{G(t)}{0,8} \right) (NOCT - 20)$$

[27]

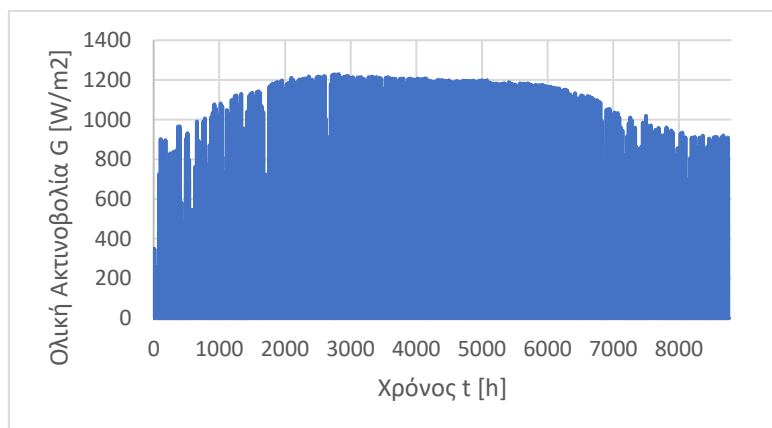
όπου:

f_{PV} = συντελεστής μείωσης απόδοσης

P_{rated} = προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύς συστήματος σε STC (Standard Test Conditions – $T_{\text{cell}} = 25 \text{ C}$, $G = 1000 \text{ W/m}^2$) και μηδενικές απώλειες ($f_{PV} = 1$)

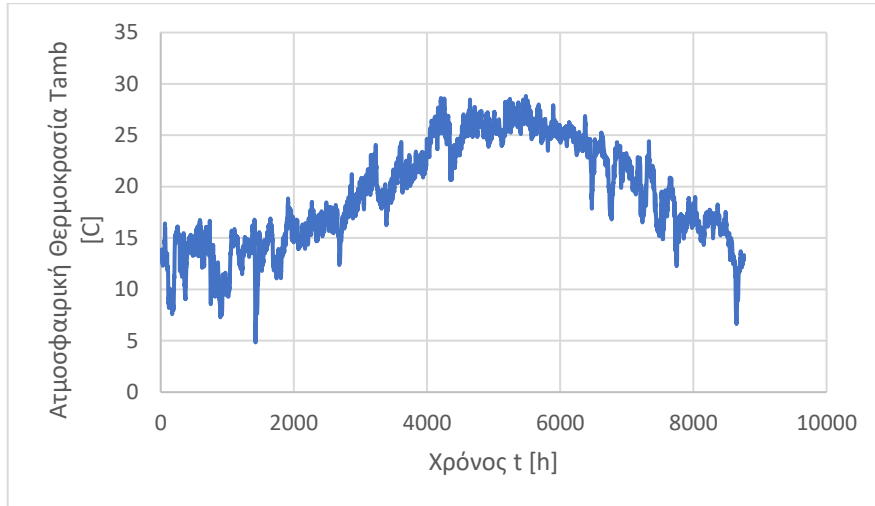
G_{STC} = προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε STC (= 1000 W/m^2)

Με βάση τους παραπάνω τύπους μπορούν να προκύψουν τα εξής διαγράμματα:

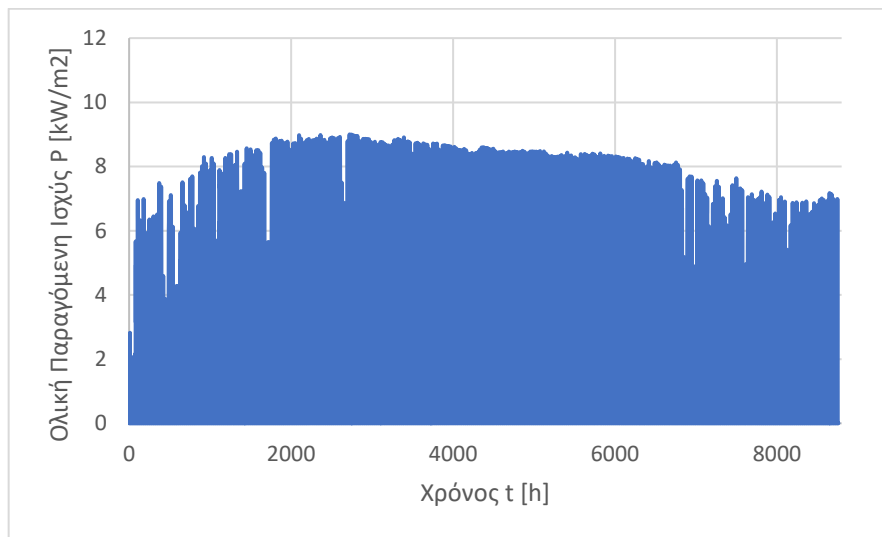


Διάγραμμα 1 Ολική Προσπίπτουσα Ηλιακή Ακτινοβολία σε Βάθος ενός Τυπικού Μετεωρολογικού Χρόνου (ΤΜΥ)

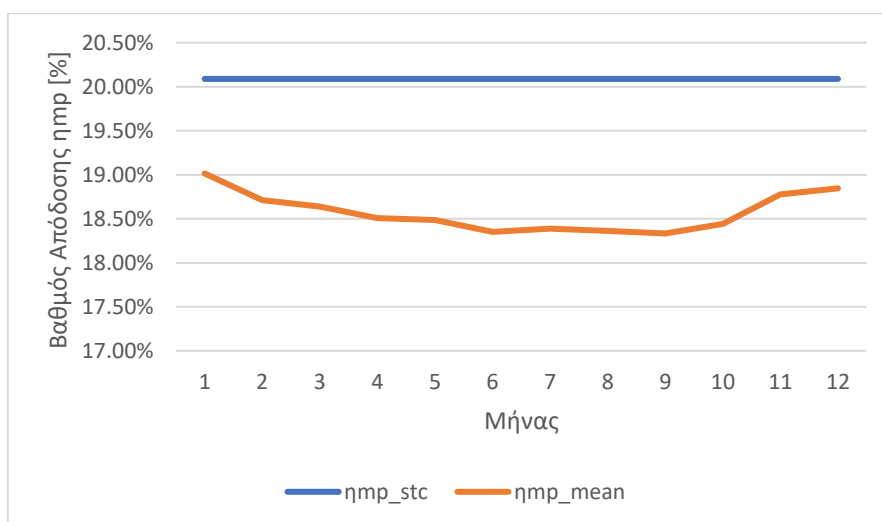
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



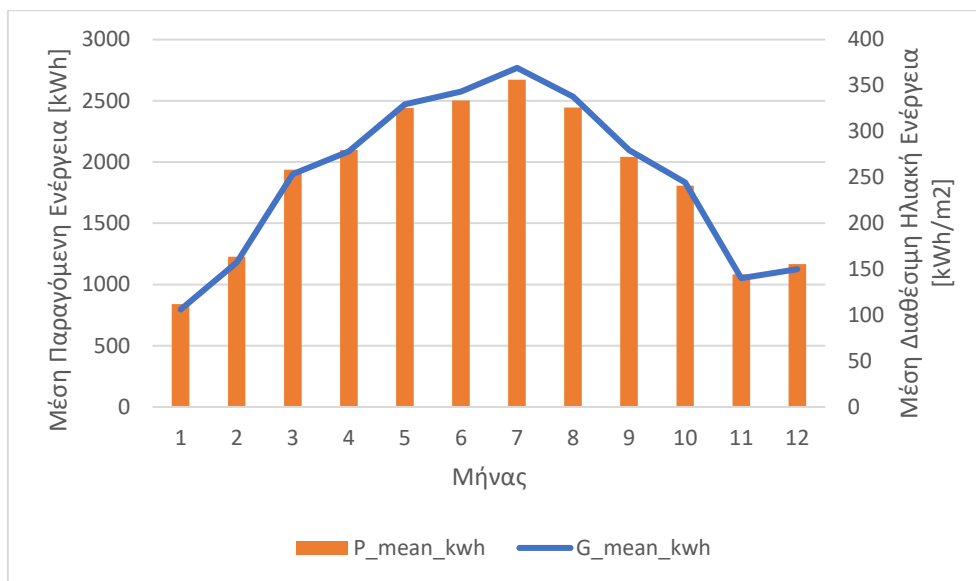
Διάγραμμα 2 Ατμοσφαιρική Θερμοκρασία σε Βάθος ενός Τυπικού Μετεωρολογικού Χρόνου (ΤΜΥ)



Διάγραμμα 3 Παραγόμενη Ισχύς Συστήματος Φωτοβολταϊκών σε Βάθος ενός Τυπικού Μετεωρολογικού Χρόνου (ΤΜΥ)



Διάγραμμα 4 Μεταβολή Μέσου Βαθμού Απόδοσης σε STC και Πραγματικές Συνθήκες ανά Μήνα



Διάγραμμα 5 Σύγκριση Μέσης Παραγόμενης Ενέργειας και Μέσης Διαθέσιμης Ενέργειας ανά Μήνα

Παρατηρώντας τα προηγούμενα διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι η περισσότερη ενέργεια δύναται να παραχθεί όταν και η διαθέσιμη ενέργεια φτάσει ένα μέγιστο, γεγονός το οποίο συμβαίνει το μήνα Ιούλιο για την περίπτωση που εξετάζουμε. Ωστόσο, το γεγονός ότι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς προκύπτει για τον Ιούλιο δε σημαίνει ότι και ο βαθμός απόδοσης εκείνο το μήνα είναι ο μέγιστος. Αντιθέτως, για εκείνον το μήνα ο βαθμός απόδοσης είναι από τους χαμηλότερους όλου του έτους αφού ο βαθμός απόδοσης επηρεάζεται ιδιαιτέρως και από τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πάνελ η οποία εκείνον το μήνα παρουσιάζει μέγιστο για όλον το χρόνο.

4.2.3 Ηλεκτρικό Μοντέλο

Σε αυτό το σημείο, η μοντελοποίηση είθισται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, να βασιστεί και στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Αρχικά, η σχέση της έντασης I και της τάσης V του ισοδύναμου κυκλώματος του μοντέλου μίας διόδου όπως φαίνεται στην Εικόνα 16 δίνεται από τον εξής τύπο:

$$I = I_{ph} - I_D - I_P = I_{ph} - I_0 \left\{ e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

[24]

όπου:

I_L = ρεύμα φωτοδιόδου, A

I_0 = ανάστροφο ρεύμα κορεσμού διόδου, A

R_s, R_p = αντιστάσεις εν σειρά και εν παραλλήλω, αντιστοίχως, Ω

a = παράμετρος προσαρμογής στην καμπύλη, -

V = τάση λειτουργίας, V

I = ρεύμα λειτουργίας, A

Για τον παραπάνω τύπο μπορεί να υποτεθεί ότι $R_p \gg R_s$, ιδιαιτέρως για την περίπτωση των μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυττάρων, και η R_p δεν επηρεάζει την απόδοση του φωτοβολταϊκού κυττάρου [24]. Οπότε, ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφεί:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left\{ e^{\frac{(V+IR_s)}{a}} - 1 \right\}$$

Διακρίνονται δύο ακραία σημεία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων: οι συνθήκες βραχυκυκλώματος (short circuit) και οι συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος (open circuit). Στις συνθήκες βραχυκυκλώματος, όλο το παραγόμενο ρεύμα I_L περνά μέσα από τη δίοδο οπότε θα ισχύει:

$$I_{ph,ref} = I_{sc,ref}$$

[24]

Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση ανοιχτού κυκλώματος, το ρεύμα είναι ίσο με 0 και το 1 στην πιο πάνω εξίσωση είναι πολύ μικρό συγκριτικά με τον εκθέτη της παρένθεσης οπότε:

$$I_{oc,ref} = I_{ph,ref} e^{\left(-\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}} \right)}$$

[24]

Συνεχίζοντας, οι συντελεστές θερμοκρασίας για τις περιπτώσεις βραχυκυκλώματος και ανοιχτού κυκλώματος προκύπτουν από μετρήσεις στην ακτινοβολία αναφοράς $G_{ref} = 1000$ W/m² και δίνονται από τους αντίστοιχους τύπους:

$$\mu_{I,sc} = \frac{\Delta I_{sc}}{\Delta T} \cong \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} = +0.00042$$

$$\mu_{V,oc} = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta T} \cong \frac{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)}{T_2 - T_1} = -0.0028$$

[24],[32]

με τις θερμοκρασίες T_2 και T_1 να είναι κοντινές τις θερμοκρασίας αναφοράς $T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Οι τελικές τιμές των συντελεστών αυτών προέκυψαν μέσω του εγγράφου με τα χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου πάνελ που παρέχει ο κατασκευαστής και θεωρούνται σταθεροί.

Τώρα, το ρεύμα φωτοδιόδου I_L εξαρτάται κυρίως από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο πάνελ και μπορεί να εκφραστεί μέσω του εξής τύπου:

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph,ref} + \mu_{I,sc}(T_c - T_{ref})]$$

Από την άλλη, το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού διόδου I_0 μεταβάλλεται σύμφωνα με μεταβολές της θερμοκρασίας όπως φαίνεται με την εξής σχέση:

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[\frac{e_g N_s \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_c} \right)}{a} \right]}$$

[24]

όπου:

e_g = ενεργειακό διάκενο Si, eV

Το ενεργειακό διάκενο e_g εξαρτάται από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται επί του φωτοβολταϊκού πάνελ και συνεπώς, του κυττάρου και δίνεται από την εξής σχέση:

$$e_g = 1.17 - \frac{4.73 * 10^{-4} T_c^2}{T_c + 636}$$

[24]

Επί πρόσθετα, η παράμετρος προσαρμογής στην καμπύλη a στις συνθήκες αναφοράς ($T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$) δίνεται από την εξής σχέση:

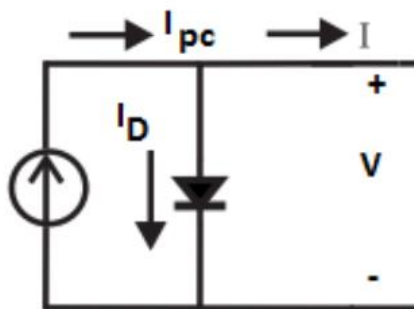
$$a_{ref} = \frac{\mu_{V,oc} T_{c,ref} - V_{oc,ref} + e_g N_s}{\frac{\mu_{I,sc} T_{c,ref}}{I_{L,ref}} - 3}$$

[24], [28]

Ωστόσο, για θερμοκρασίες που αναπτύσσει το πάνελ διαφορετικές αυτής στις συνθήκες αναφοράς η παράμετρος a δίνεται από την εξής σχέση:

$$\alpha = \alpha_{ref} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)$$

Στην περίπτωση ενός ιδεατού φωτοβολταϊκού πάνελ, δεν υπάρχουν εν σειρά και εν παραλλήλω απώλειες και άρα, $R_s = 0$ και $R_p = \infty$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19 Ιδεατό κύκλωμα φωτοβολταϊκού πάνελ, χωρίς σειριακές και παράλληλες αντιστάσεις [33]

Οπότε, η αρχική εξίσωση υπολογισμού του ρεύματος λειτουργίας I μέσω της τάσης λειτουργίας V γράφεται:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V}{a}} - 1 \right]$$

Ακόμη, η παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού πάνελ αλλά και ολόκληρης της συστοιχίας P δίνεται από τον εξής τύπο:

$$P = V * I$$

όπου:

P = παραγόμενη ισχύς, W

V = τάση στα άκρα του συστήματος, V

I = ρεύμα που διαρρέει το σύστημα, A

4.2.4 Προσομοίωση Ηλεκτρικού Μοντέλου

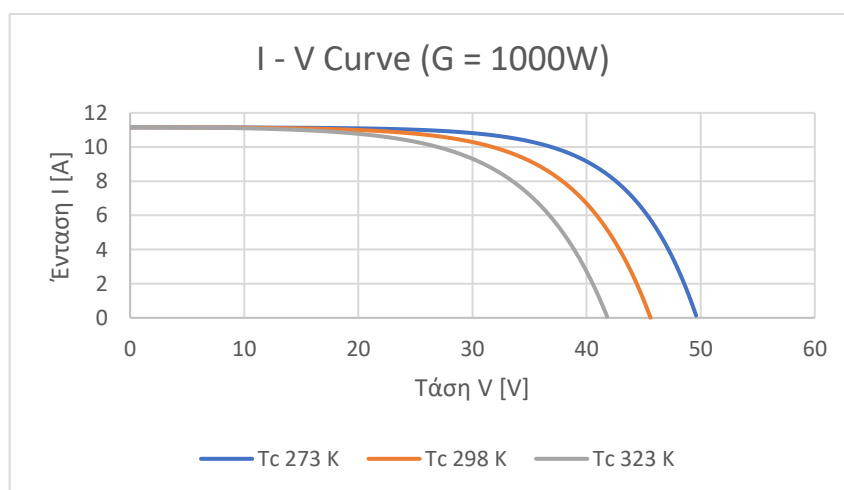
Για την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας που περιγράφηκε και για να προκύψουν κάποια αξιόλογα αποτελέσματα θεωρήθηκαν 11 τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, από 0 W/m^2 έως 1000 W/m^2 , που καλύπτουν το μεγαλύτερο εύρος συνθηκών που μπορεί να αντιμετωπίσει το φωτοβολταϊκό σύστημα αφού αντικατοπτρίζουν από την έλλειψη ηλιακής ακτινοβολίας τη νύχτα (0 W/m^2) μέχρι την αφθονία διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας ένα

μεσημέρι του καλοκαιριού (1000 W/m^2). Όπως είδαμε και παραπάνω, οι συνθήκες αναφοράς που θεωρήθηκαν για το σύστημα είναι $T_{\text{ref}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ και $G_{\text{ref}} = 1000 \text{ W/m}^2$. Τα υπόλοιπα δεδομένα και οι τιμές των χρήσιμων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 2.

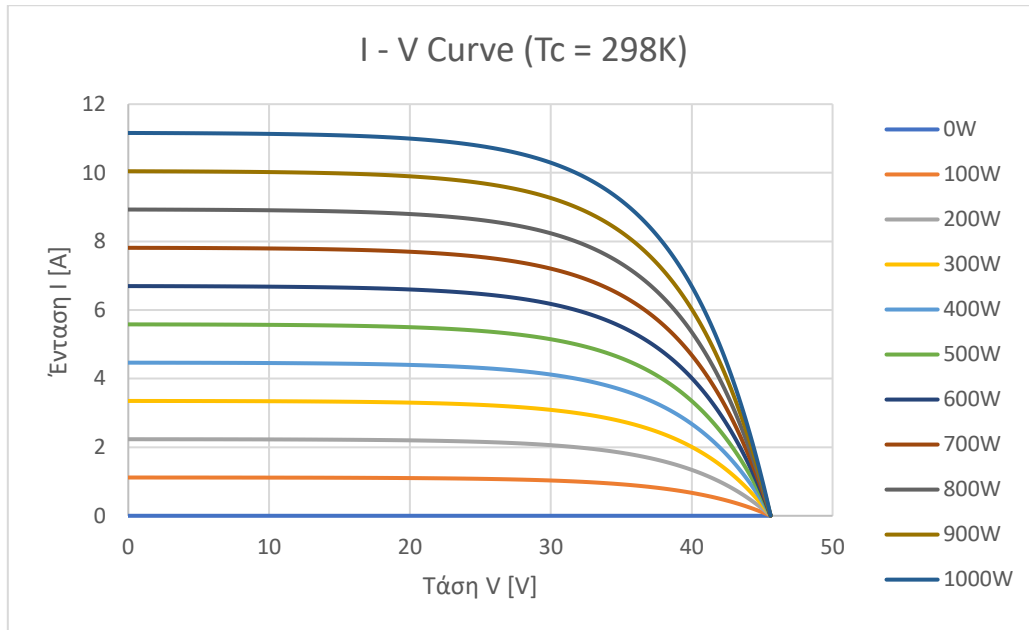
Πίνακας 2 Παράμετροι Ηλεκτρικού Μοντέλου

PEIMAR SF400M (BF)	
P_{max}	400 W
V_{mp}	38 V
I_{mp}	10.53 A
V_{oc}	45.6 V
I_{sc}	11.16 A
$\eta_{\text{mp,ref}}$	20.09 %
NMOT (Nominal Module Operating Temperature)	45 $^\circ\text{C}$
$\mu_{P_{\text{max}}}$	-0.37 %/ $^\circ\text{C}$
$\mu_{V_{\text{oc,ref}}}$	-0.28 %/ $^\circ\text{C}$
$\mu_{I_{\text{sc,ref}}}$	0.042 %/ $^\circ\text{C}$
N (# of modules)	25
α_{ref}	6.1258

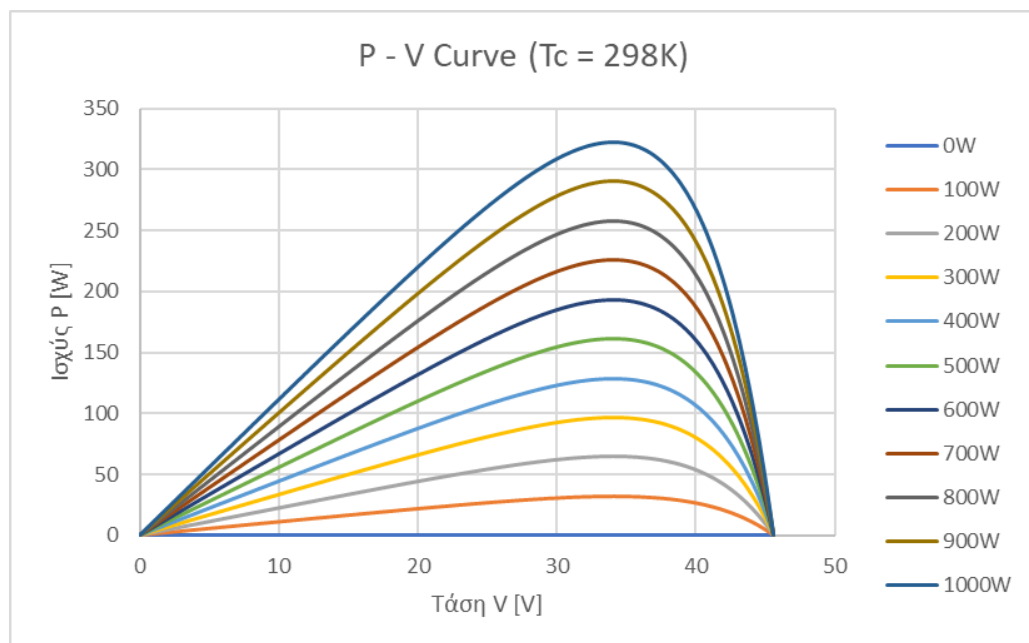
Ακριβώς από κάτω παρουσιάζονται ορισμένα διαγράμματα για να γίνει πιο κατανοητή η επιρροή της θερμοκρασίας του πάνελ και της ηλιακής ακτινοβολίας στο σύστημα:



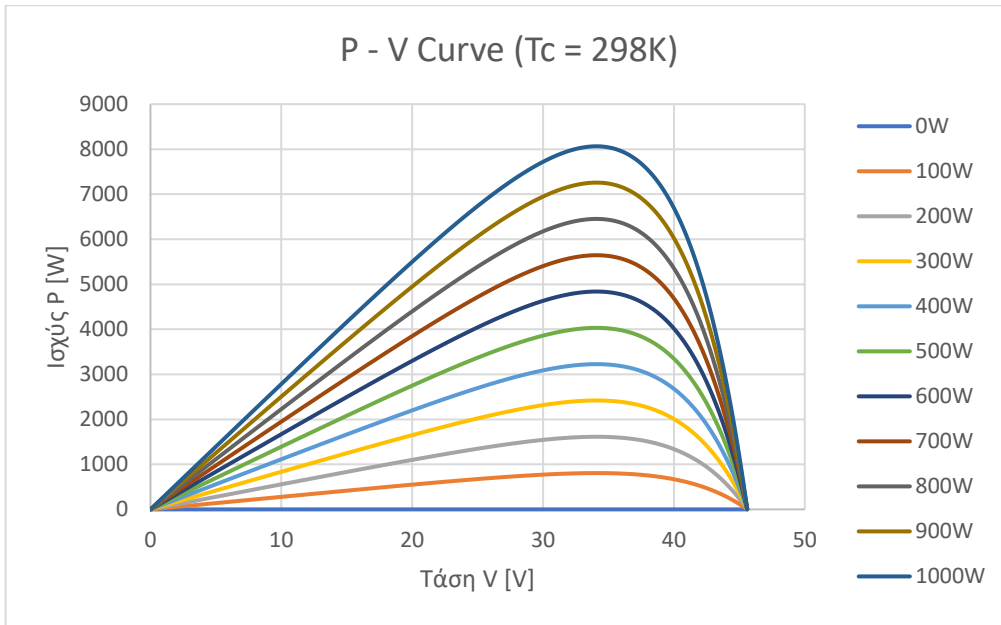
Διάγραμμα 6 Εξάρτηση Έντασης Ρεύματος από τη Θερμοκρασία συναρτήσει της Τάσης



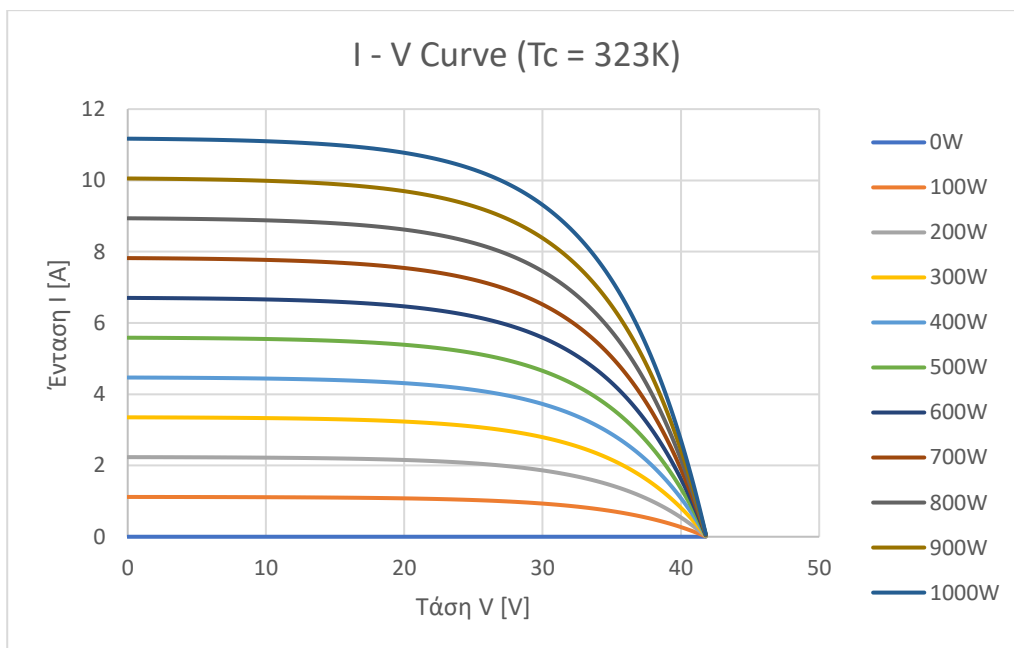
Διάγραμμα 7 Ένταση Ρεύματος συναρτήσει της Τάσης και της Ηλιακής Ακτινοβολίας για $T_c = 298 K$



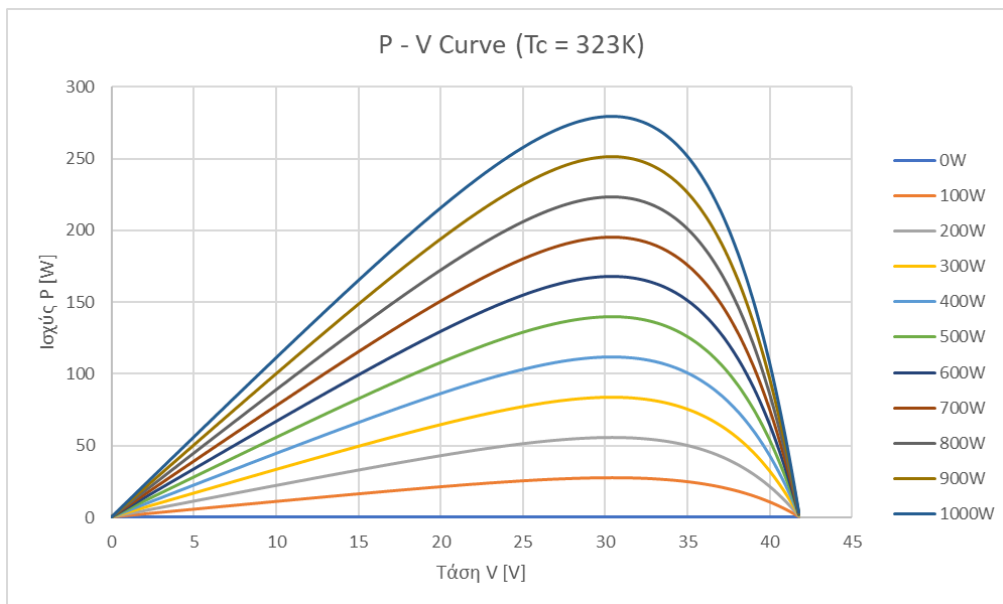
Διάγραμμα 8 Παραγόμενη Ισχύς ενός Πάνελ συναρτήσει Τάσης και Ηλιακής Ακτινοβολίας για $T_c = 298 K$



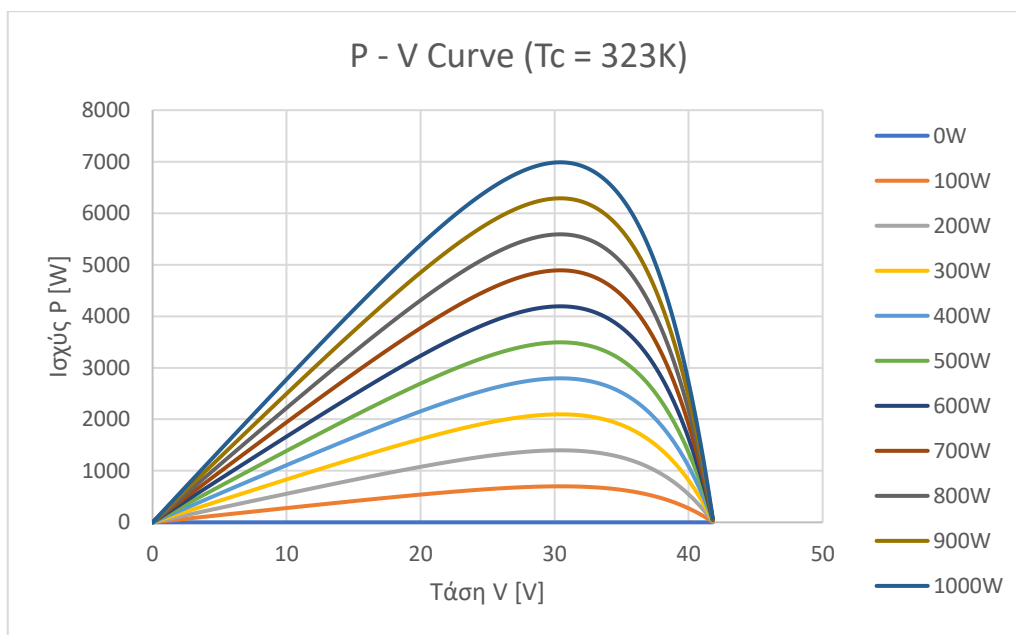
Διάγραμμα 9 Παραγόμενη Ισχύς Συστήματος συναρτήσει Τάσης και Ηλιακής Ακτινοβολίας για $T_c = 298\text{K}$



Διάγραμμα 10 Ένταση Ρεύματος συναρτήσει της Τάσης και της Ηλιακής Ακτινοβολίας για $T_c = 323\text{K}$



Διάγραμμα 11 Παραγόμενη Ισχύς ενός Πάνελ συναρτήσει Τάσης και Ηλιακής Ακτινοβολίας για $T_c = 323\text{ K}$



Διάγραμμα 12 Παραγόμενη Ισχύς Συστήματος συναρτήσει Τάσης και Ηλιακής Ακτινοβολίας για $T_c = 323\text{ K}$

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται προφανές ότι η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία ασκούν ιδιαίτερη επιρροή στη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάνελ. Πιο συγκεκριμένα, με αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας με κατά περίπτωση σταθερή θερμοκρασία της επιφάνειας του πάνελ παρατηρείται και αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Από την άλλη μεριά, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία υπό σταθερή ηλιακή ακτινοβολία καταγράφεται και μετατόπιση της καμπύλης $I - V$ προς τα πίσω με αποτέλεσμα να μειώνεται

η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και να αλλάζει και το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), χωρίς όμως να αλλάζει η ένταση του ρεύματος εκεί. Άρα, όπως φαίνεται στα διαγράμματα $P - V$ για θερμοκρασίες $T_c = 298 \text{ K}$ και $T_c = 323 \text{ K}$, το «ζενίθ» της παραγωγής ισχύος από το πάνελ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παραδείγματος χάρη, για $G = 1000 \text{ W/m}^2$ και $T_c = 298 \text{ K}$, λαμβάνουμε μέγιστη ισχύ 322.56 W για το ένα πάνελ και 8064 W για το σύστημα. Για $G = 1000 \text{ W/m}^2$ και $T_c = 323 \text{ K}$ όμως η μέγιστη ισχύς πέφτει στα 279.52 W για το πάνελ και στα 6988 W για το σύστημα.

4.3 Μπαταρίες

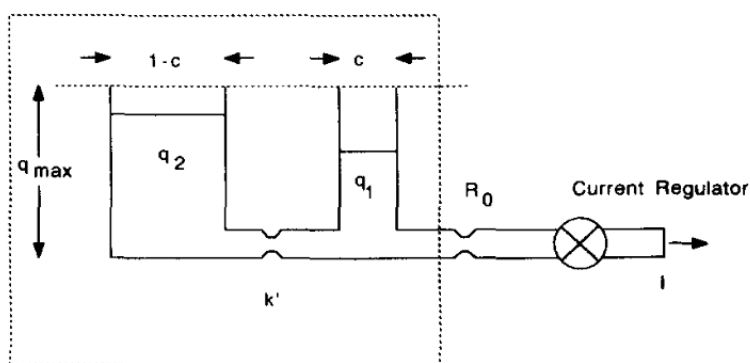
Το σύστημα που εξετάζει η παρούσα εργασία, αν και αποτελείται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες οι οποίες αποτελούν τον κύριο παραγωγό ηλεκτρικής ενέργειας, είθισται να συνοδεύεται από μέσα αποθήκευσης της ενέργειας αυτής για χρονικές περιόδους που τα φωτοβολταϊκά υπολειπόμενα (αυξημένη συννεφιά, νύχτα κλπ.). Ένα από αυτά τα μέσα είναι οι συστοιχίες μπαταριών που αποτελούν, μαζί με το παραγόμενο υδρογόνο, τη βασική αποθηκευτική συσκευή του αυτόνομου συστήματος. Για να επιτευχθεί η ενεργειακή αυτονομία του συστήματος λοιπόν οι μπαταρίες θα αποφορτίζονται όταν υπάρχει έλλειμμα ενέργειας και θα φορτίζονται όταν υπάρχει πλεόνασμα.

4.3.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η μοντελοποίηση μίας μπαταρίας οξικού μόλυβδου (lead – acid battery), όπως και στη περίπτωση του συστήματος της εργασίας, δύναται να πραγματοποιηθεί με περισσότερες από μία μεθόδους (στοχαστική, γραμμική, KiBaM κ.α.), με την πιο διαδεδομένη εξ αυτών να είναι το Kinetic Battery Model (KiBaM) το οποίο επινοήθηκε στη Μασαχουσέτη και αφορούσε αρχικά τις μπαταρίες οξικού μόλυβδου [34].

Το αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιούνταν πριν από το KiBaM βασιζόταν στην τάση υπό φορτίο και στις μεταβολές της κατά τη διάρκεια φόρτισης, αποφόρτισης και ανάκαμψης. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο απαιτούσε εκτενείς μετρήσεις τάσης και έντασης, με στόχο τον καθορισμό ενός μεγάλου αριθμού σταθερών (ορισμένες φορές πάνω από 10 σε αριθμό) [35]. Επιπλέον, τα αναλυτικά μέρη του μοντέλου είναι ουσιαστικά φαινομενολογικά και δομήθηκαν είτε με την προοπτική συνθηκών φόρτισης, είτε αποφόρτισης αλλά όχι και τα δύο. Ακόμη, η ενσωμάτωση μεταβαλλόμενων κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης αποτελεί μία κουραστική και αμφιβόλου επιστημονικής ορθότητας διαδικασία [35].

Το KiBaM βασίζεται στην αρχή ότι η εναπομένουσα χωρητικότητα της μπαταρίας χωρίζεται σε δύο «δοχεία», με το ένα να αντικατοπτρίζει τη διαθέσιμη και το άλλο τη δεσμευμένη φόρτιση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 20. Επομένως, ως αποφόρτιση, με αυτήν την οπτική, ορίζεται η κατανάλωση της διαθέσιμης φόρτισης και ως φόρτιση ορίζεται η ροή φορτίου από το δεσμευμένο στο διαθέσιμο «δοχείο».



Εικόνα 20 Σχηματική αναπαράσταση Kinetic Battery Model (KiBaM) [35]

Κύριος στόχος του KiBaM είναι να απεικονίσει την ευαισθησία της χωρητικότητας αποθήκευσης σύμφωνα με το ρυθμό αποφόρτισης και αποτελεί ουσιαστικά τη σύνθεση δύο επιμέρους μοντέλου, αυτή του μοντέλου χωρητικότητας με το μοντέλο τάσης. Το πρώτο εξ αυτών χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο για τη μελέτη της συμπεριφοράς του συσσωρευτή με κάποιες απλοποιήσεις για τον υπολογισμό ορισμένων παραμέτρων, των c , k και q_{max} οι οποίες λαμβάνουν και σταθερές τιμές [28].

Το μοντέλο τάσης που αποτελεί το δεύτερο σκέλος του KiBaM ορίζει την τελική τάση σύμφωνα με την επιρροή που ασκεί επ' αυτής η συνεχής φόρτιση και αποφόρτιση σε διαφορετικά βάθη αποφόρτισης (DOD) και διαφορετικές τιμές ρευμάτων. Προβλέπεται μέσω του μοντέλου τάσης ότι η τάση του συσσωρευτή μειώνεται αργά στο αρχικό στάδιο αποφόρτισης και μειώνεται απότομα όταν ο συσσωρευτής έχει σχεδόν αδειάσει [24]. Να σημειωθεί επίσης ότι αυτό το μοντέλο εφαρμόζεται σε δεδομένα που παρέχει ο κατασκευαστής.

Γενικώς, η εφαρμογή του μοντέλου KiBaM προσφέρει επαρκή και ικανοποιητικά αποτελέσματα σε προσομοιώσεις βάθους χρόνου αλλά υστερεί σε προσομοιώσεις μικρού χρονικού ορίζοντα. Αυτό συμβαίνει διότι, στην δεύτερη περίπτωση, η έμφαση μετατοπίζεται στη δυναμική, μη γραμμική και ταχεία συμπεριφορά της τάσης του συσσωρευτή, κατά την οποία η περιγραφή μέσω αυτού του μοντέλου θεωρείται ανεπαρκής.

Σε μία άλλη επιστημονική ανάλυση, προτείνεται ένα μοντέλο περιγραφής της κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή, σύμφωνα με το οποίο ενεργειακές απώλειες παρατηρούνται ακόμη και σε κατάσταση φόρτισης. Αυτές οι ενεργειακές απώλειες εντείνονται (άρα μειώνεται η απόδοση του συσσωρευτή) με το πέρασμα του χρόνου αλλά και σε περιπτώσεις λανθασμένης χρήσης του συσσωρευτή (πχ έκθεση σε αυξημένες θερμοκρασίες) [36]. Η κατάσταση φόρτισης (SOC) λοιπόν του συσσωρευτή για αυτό το μοντέλο δίνεται από την εξής σχέση:

$$SOC(t + 1) = SOC(t)\sigma + I_{bat}(t)\Delta t\eta(I_{bat}(t)) \quad 4.3.1$$

όπου:

σ = ρυθμός αυτό – αποφόρτισης, -

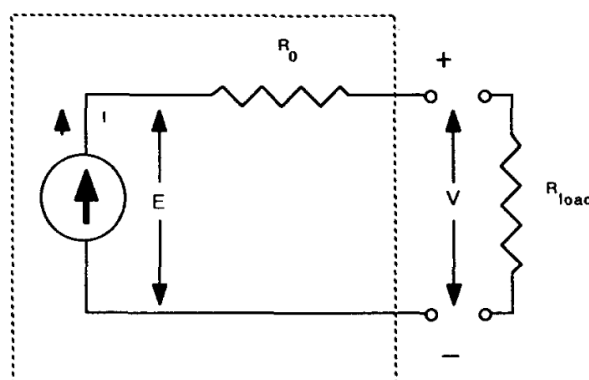
η = βαθμός απόδοσης φόρτισης, -

I_{bat} = ρεύμα φόρτισης/αποφόρτισης, A

Κατά τη διάρκεια αποφόρτισης του συσσωρευτή, ο όρος η θεωρείται ίσος με 1. Από την άλλη, για τη φόρτιση θα λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.65 και 0.85, εξαρτώμενος από το ρεύμα φόρτισης. Επίσης, ο όρος σ (3% - 5% σε τυπικές συνθήκες) πρέπει να δίνεται από τον κατασκευαστή για συγκεκριμένες συνθήκες αποθήκευσης, όπως η θερμοκρασία, και για συγκεκριμένο χρόνο αποθήκευσης [36].

4.3.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί είναι παρόμοιο σε αυτά που εφαρμόζονταν αρχικά διότι η μπαταρία θεωρείται ως μία πηγή τάσης, συνδεδεμένη σειριακά με μία αντίσταση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 21 [35].



Εικόνα 21 Συνολική σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρικού κυκλώματος συσσωρευτή [35]

Ορμώμενοι από την Εικόνα 21, η τάση στα άκρα της μπαταρίας δίνεται από τη σχέση:

$$V = E - IR_0 \quad 4.3.2$$

όπου:

E = εσωτερική τάση, V

I = ένταση ρεύματος φόρτισης/αποφόρτισης

R_0 = εσωτερική αντίσταση, $\Omega = 0.063 \Omega$ [28]

Να σημειωθεί ότι η εσωτερική τάση E μεταβάλλεται αναλόγως με το SOC και η εσωτερική αντίσταση R_0 θεωρείται ότι παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια [35]. Επίσης, ο ρόλος και η επιρροή της θερμοκρασίας δε θα αναλυθεί στο παρόν μοντέλο αλλά υπάρχουν προοπτικές εύρεσης συγκεκριμένων σταθερών παραμέτρων με επέκταση του μοντέλου εάν η θερμοκρασία αποτελεί σημαντική μεταβλητή.

Σύμφωνα με την Εικόνα 20, κάθε δοχείο έχει ίδιο ύψος αλλά διαφορετικά πλάτη, γεγονός το οποίο υποδεικνύει διαφορετικούς όγκους μεταξύ των δοχείων. Το πλάτος του 1^{ου} δοχείου (διαθέσιμη φόρτιση) είναι c και αυτό του 2^{ου} δοχείου (χημικά δεσμευμένη φόρτιση) είναι $1 - c$, όπου η παράμετρος c επηρεάζεται άμεσα από την ποσότητα που είναι διαθέσιμη προς κάλυψη του εκάστοτε φορτίου [28]. Επομένως, το συνδυασμένο πλάτος των δύο δοχείων είναι ίσο με τη μονάδα. Ο συνδυασμένος όγκος οπότε των δοχείων είναι ίσος με q_{\max} και αφού έχουμε επιφάνεια μοναδιαία, θα ισχύει ότι $q_{\max} = h_{\max}$. Η βαλβίδα που παρατηρείται ενδιάμεσα στα δύο δοχεία διαθέτει καθορισμένη αγωγιμότητα (conductance) k' . Τέλος, ο ρυθμιστής έντασης ρεύματος λειτουργεί έτσι ώστε το ρεύμα και άρα η ισχύς που αντλείται από το φορτίο διατηρείται σταθερό ως προς το χρονικό βήμα που έχει θεωρηθεί [35].

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις χωρητικότητες των δοχείων 1 και 2 δίνονται μέσω μετασχηματισμών Laplace από τις εξής σχέσεις:

$$q_1 = q_{1,0}e^{-kt} + \frac{(q_0kc-1)(1-e^{-kt})}{k} \quad 4.3.3$$

$$q_2 = q_{2,0}e^{-kt} + q_0(1-c)(1-e^{-kt}) - \frac{I(1-c)(kt-1+e^{-kt})}{k} \quad 4.3.4$$

$$q_0 = q_{1,0} + q_{2,0} \quad 4.3.5$$

[35]

$$SOC(t) = \frac{q_{tot}(t)}{q_{nom}} - \frac{I_{d,c}t}{q_{nom}} \quad 4.3.6$$

[28]

όπου:

$q_{1,0}$ = ποσότητα διαθέσιμης φόρτισης, Ah

$q_{2,0}$ = ποσότητα χημικά δεσμευμένης φόρτισης, Ah

t = χρονικό βήμα, h

q_{tot} = άθροισμα διαθέσιμου όγκου q_1 και χημικά δεσμευμένου όγκου q_2 , Ah

$I_{d,c}$ = ρεύμα φόρτισης/αποφόρτισης, A

Παρακάτω, το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους, ανάλογα εάν η τάση θεωρείται με αναλυτικό τρόπο ή όχι. Όταν η μεταβολής τάσης της μπαταρίας ως προς της κατάσταση φόρτισης (SOC) δε φέρει κάποιο ενδιαφέρον, απαιτούνται 3 σταθερές παράμετροι για το μοντέλο που εξετάζεται, οι οποίες μπορούν να βρεθούν από τα στοιχεία χωρητικότητας της μπαταρίας που παρέχονται από τον κατασκευαστή: η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας q_{max} , το κλάσμα χωρητικότητας (fraction of capacity) που δύναται να κρατήσει διαθέσιμη φόρτιση c και η σταθερά ρυθμού (rate constant) k [35]. Από την άλλη μεριά, όταν η τάση στα άκρα φέρει ενδιαφέρον ή όταν οι σταθερές καθορίζονται από δοκιμές, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν η εσωτερική αντίσταση R_0 .

- **Χωρίς αναλυτική θεώρηση μεταβολών τάσης V**

Πρώτα από όλα, θα χρειαστεί να υπολογιστεί η μέγιστη χωρητικότητα του συσσωρευτή q_{max} . Έχοντας λάβει τις τιμές από τον κατασκευαστή για τις παραμέτρους $c = 0.361$ και $k = 0.379$. Ακόμη, μέσω του κατασκευαστή βρίσκεται και το ρεύμα αποφόρτισης για ρυθμό αποφόρτισης 20 ωρών (h) από τη σχέση:

$$I_{t=20} = \frac{q_{t=20}SOC_{min}}{20} \quad 4.3.7$$

[35]

όπου:

$q_{t=20}$ = χωρητικότητα 20 h = $q_{nom} = 200$ Ah

Οπότε, για ρυθμό αποφόρτισης 20 h, υπολογίζεται η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας:

$$q_{max} = \frac{q_{t=20}\{(1-e^{-k20})(1-c)+kc20\}}{kc20} \quad 4.3.8$$

Τώρα, για να υπολογισθεί η ένταση ρεύματος που απαιτείται για να αδειάσει η μπαταρία σε χρόνο t ($q_1 = 0$) θα γίνει χρήση της εξής σχέσης:

$$I_t = \frac{q_{max}ck}{\{(1-e^{-kt})(1-c)+kct\}} \quad 4.3.9$$

Εν συνεχεία, για να βρούμε το μέγιστο ρεύμα αποφόρτισης $I_{d,max}$ που μπορεί να επιτευχθεί για να αδειάσει η μπαταρία σε χρόνο t και η μέγιστη χωρητικότητα αποφόρτισης $Q_{d,max}$, υπάρχει και ένας τύπος πιο γενικώς που καλύπτει και την παραπάνω περίπτωση:

$$I_{d,max} = \frac{kq_{1,0}e^{-kt} + q_0kc(1-e^{-kt})}{1-e^{-kt} + c(kt-1+e^{-kt})} \quad 4.3.10$$

$$Q_{d,max} = I_{d,max}t \quad 4.3.11$$

Αντιστοίχως, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης $I_{c,max}$ που μπορεί να εισαχθεί στη μπαταρία σε χρόνο t ($q_1 = cq_{max}$), καθώς και η μέγιστη χωρητικότητα φόρτισης για εκείνο το χρονικό διάστημα $Q_{c,max}$ δίνονται από τις σχέσεις:

$$I_{c,max} = \frac{-kcq_{max} + kq_{1,0}e^{-kt} + q_0kc(1-e^{-kt})}{1-e^{-kt} + c(kt-1+e^{-kt})} \quad 4.3.12$$

$$Q_{c,max} = I_{c,max}t \quad 4.3.13$$

- **Με αναλυτική θεώρηση μεταβολών τάσης V**

Όταν οι μεταβολές τελικής τάσης V θεωρούνται σημαντικές, το μοντέλο επεκτείνεται και ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

$$V = E - IR_0 \quad 4.3.14$$

Για την εσωτερική τάση της μπαταρίας E διακρίνονται δύο περιπτώσεις: φόρτιση και αποφόρτιση.

Για τη φόρτιση θα ισχύει:

$$E = E_{0,c} + \frac{(E_{max} - E_{0,c})q_1}{q_{max}} \quad 4.3.15$$

όπου:

$E_{0,c}$ = η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση φόρτισης, V

E_{max} = η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση φόρτισης, V

Και για την αποφόρτιση ισχύει:

$$E = E_{min} + \frac{(E_{0,d} - E_{min})q_1}{q_{max}} \quad 4.3.16$$

όπου:

$E_{0,d}$ = η μέγιστη επιτρεπόμενη εσωτερική τάση αποφόρτισης, V

E_{min} = η ελάχιστη επιτρεπόμενη εσωτερική τάση αποφόρτισης, V

Για να υπολογίσουμε τις παραπάνω μεταβλητές, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των μεταβλητών τάσης για ένα κελί της μπαταρίας που αναγράφονται στο φυλλάδιο προδιαγραφών του κατασκευαστή [37] και οι τιμές για ολόκληρη την μπαταρία δόθηκαν από τις εξής σχέσεις:

$$E_{0,c} = 2.45 * n_c \quad 4.3.17$$

$$E_{max} = 2.5 * n_c \quad 4.3.18$$

$$E_{0,d} = 2.1 * n_c \quad 4.3.19$$

$$E_{min} = 2.05 * n_c \quad 4.3.20$$

[38]

όπου:

n_c = αριθμός κελιών της μπαταρίας, -

Επί πρόσθετα, η εσωτερική αντίσταση R_0 είναι ίση με την εφαπτομένη (dV/dI) της καμπύλης V συναρτήσει I όταν η μπαταρία είναι γεμάτη. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε ένας απλοϊκός τρόπος υπολογισμού, βασισμένος στο Διάγραμμα 14 και υπολογίζεται η εσωτερική αντίσταση μέσω της σχέσης:

$$R_0 = \frac{V_{full}}{I_{@20h}} \quad 4.3.21$$

όπου:

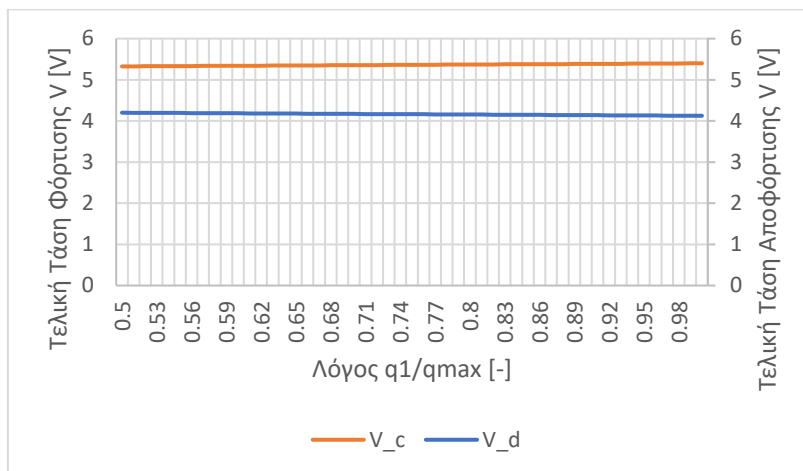
V_{full} = τελική τάση όταν η μπαταρία είναι γεμάτη και έτοιμη για αποφόρτιση = 2.1 V

$I_{@20h}$ = ένταση ρεύματος για ρυθμός αποφόρτισης 20 h = 33.16 A

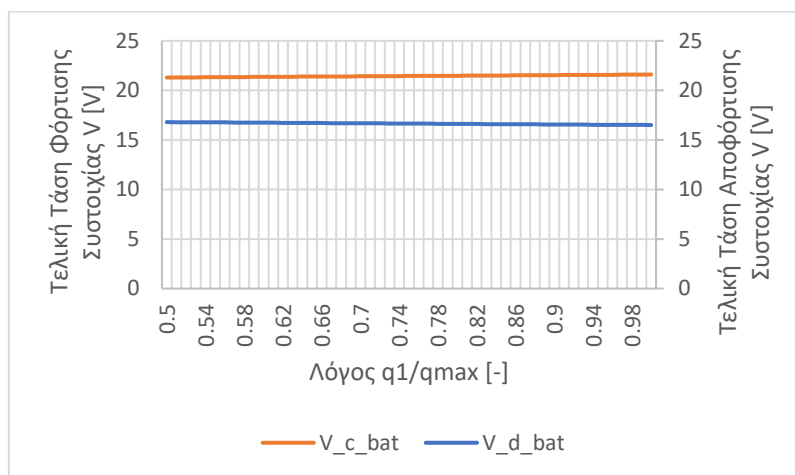
DISCHARGE	0%	25%	50%	75%	100%
20 HR AH RATE	2.10 V	2.05 V	2.02 V	1.96 V	1.75 V
6 HR AH RATE	2.10 V	2.04 V	2.00 V	1.95 V	1.75 V
1 HR AH RATE	2.10 V	2.03 V	1.99 V	1.94 V	1.75 V

Διάγραμμα 13 Μεταβολή τελικής τάσης συναρτήσει Βάθους Αποφόρτισης (DOD) [37]

Επομένως, με βάση τα παραπάνω μπορεί να προκύψει το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 14 Μεταβολή τελικής τάσης σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης με ρυθμό αποφόρτισης 20 h



Διάγραμμα 15 Μεταβολή τελικής τάσης συστοιχίας (σύνδεση σε σειρά) σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης με ρυθμό αποφόρτισης 20 h

Στο Διάγραμμα 14 φαίνεται ότι κατά τη μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας της μπαταρίας, η τελική τάση μειώνεται με γραμμικό τρόπο, έως ότου φτάσει το προκαθορισμένο $SOC_{min} = 50\%$. Από την άλλη, όταν φορτίζεται η μπαταρία και άρα αυξάνεται η διαθέσιμη χωρητικότητα της, αυξάνεται και τελική τάση της μπαταρίας μέχρι το $SOC_{max} = 100\%$, όπως είναι αναμενόμενο.

Στην περίπτωση που θεωρούνταν η ελάχιστη κατάσταση φόρτισης $SOC_{min} = 0\%$, τότε θα λέγαμε ότι είναι άδεια η μπαταρία για μία ελάχιστη εσωτερική τάση και η τελική τάση θα οριζόταν ως:

$$V_{min} = E_{min} - IR_0 \quad 4.3.22$$

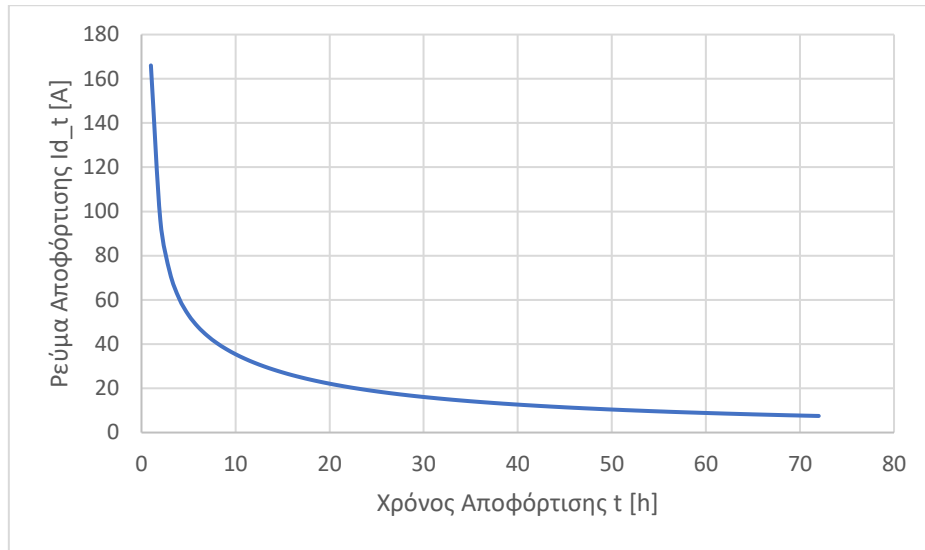
4.3.3 Προσομοίωση Μπαταρίας

Όπως είχε αναφερθεί και στην αρχή περιγραφής του συστήματος, υπάρχουν 2 συστοιχίες μπαταριών (4 μπαταρίες σε σειρά ανά συστοιχία), με 24 V συνολικής ονομαστικής τάσης και ονομαστική χωρητικότητα 820 Ah, η καθεμιά. Το χρονικό πλαίσιο προσομοίωσης είναι 72 ώρες, με βήμα 1 ώρα. Θα παρουσιαστεί λοιπόν η προσομοίωση μίας εκ των δύο συστοιχιών και τα αποτελέσματα αυτής όσον αφορά την τελική τάση της αλλά και τα αποτελέσματα προσομοίωσης της συμπεριφοράς μίας μπαταρίας ονομαστικής χωρητικότητας 200 Ah και τάσης 12 V, με $SOC_{min} = 50\%$ και $SOC_{max} = 100\%$.

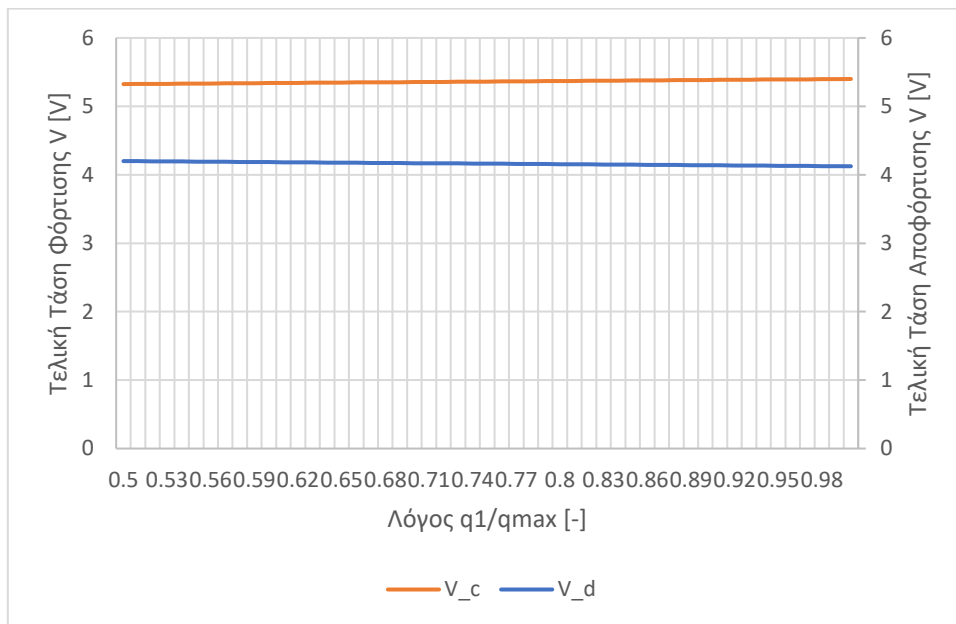
Στον Πίνακα 3 Δεδομένα και σταθερές παράμετροι παρουσιάζονται τα δεδομένα και οι τιμές συντελεστών, παραμέτρων και σταθερών του υποσυστήματος:

Πίνακας 3 Δεδομένα και σταθερές παράμετροι

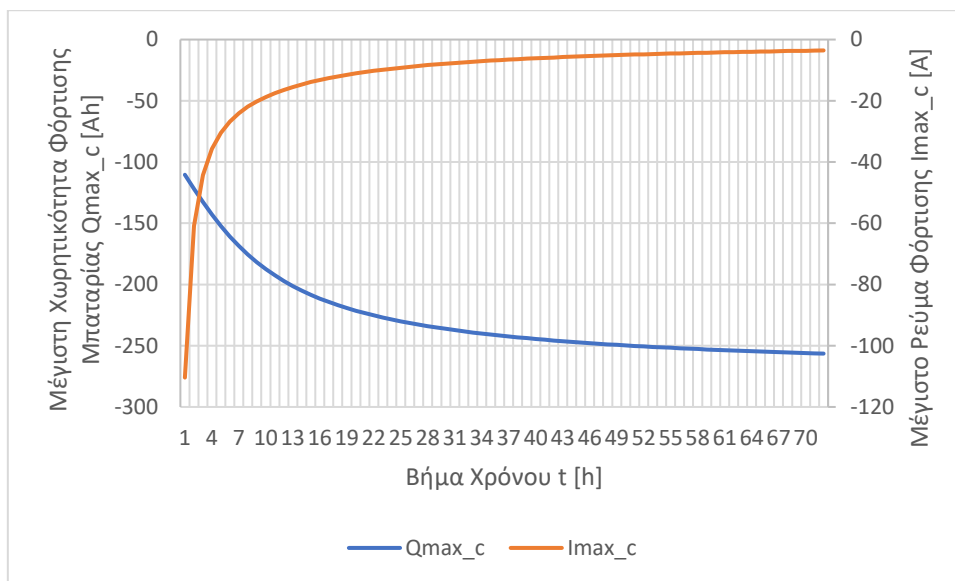
Surrette 6 CS 25P	
V_{nom}	6 V
q_{nom}	820 Ah
q_{max}	1182 Ah
c	0.237
k	0.478
E_{min}	6.15 V
E_{0,d}	6.3 V
E_{max}	7.5 V
E_{0,c}	7.35 V
R₀	0.063 Ω
SOC_{max}	1
SOC_{min}	0.5
n_c	3
SOC_{initial}	1
C rate	20 h



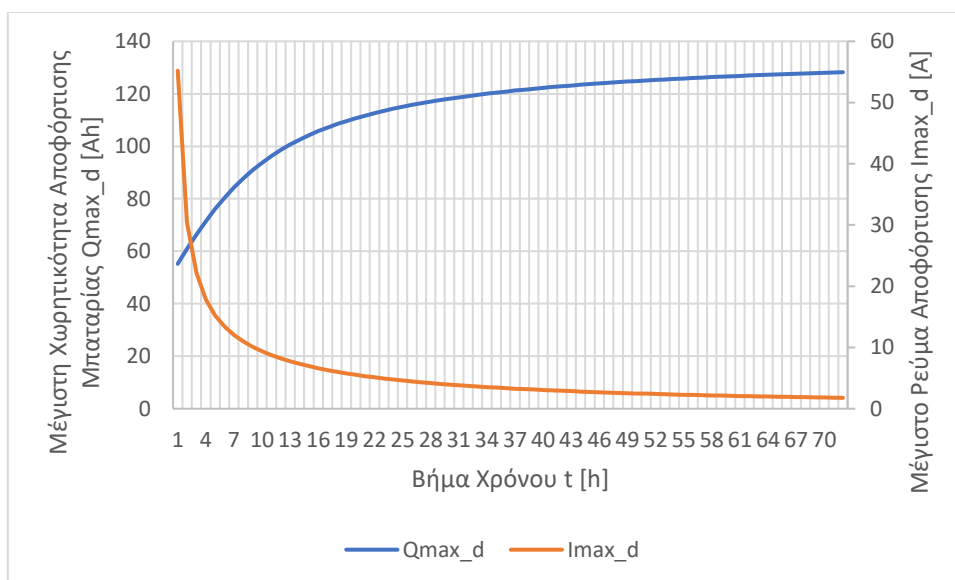
Διάγραμμα 16 Μεταβολή ρεύματος αποφόρτισης συναρτήσει καθορισμένου χρόνου αποφόρτισης



Διάγραμμα 17 Μεταβολή τελικής τάσης φόρτισης και αποφόρτισης μπαταριών συναρτήσει λόγου διαθέσιμης φόρτισης και μέγιστη χωρητικότητας



Διάγραμμα 18 Μεταβολή μέγιστης χωρητικότητας φόρτισης και μέγιστου ρεύματος φόρτισης συναρτήσει ωριαίου χρονικού θήματος



Διάγραμμα 19 Μεταβολή μέγιστης χωρητικότητας αποφόρτισης και μέγιστου ρεύματος αποφόρτισης συναρτήσει ωριαίου χρονικού θήματος

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται άμεσα αντιληπτό αρχικά ότι το ρεύμα αποφόρτισης μειώνεται με λογαριθμικό ρυθμό όσο αυξάνεται ο χρόνος αποφόρτισης της μπαταρίας το οποίο είναι λογικό αφού εάν υπάρχει έλλειμμα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, το αυτόνομο σύστημα μας θα χρειαστεί να το καλύψει αυτό με τη βοήθεια των μπαταριών αυτών. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος που οι τιμές της μέγιστης χωρητικότητας φόρτισης (Διάγραμμα 18) είναι αρνητικές είναι διότι λήφθηκε ως παραδοχή ότι η μπαταρία λειτουργεί ως γεννήτρια για το σύστημα και άρα, το ρεύμα αποφόρτισης θεωρείται θετικό και το ρεύμα φόρτισης αρνητικό. Στο Διάγραμμα 18 και

στο Διάγραμμα 19 τώρα, η μέγιστη χωρητικότητα φόρτισης η οποία φαίνεται να οδεύει προς μικρότερες αρνητικές τιμές αλλά αυτό είναι λόγω της παραδοχής και στην πραγματικότητα αυξάνει προς μεγαλύτερες θετικές τιμές και η μέγιστη χωρητικότητα αποφόρτισης αντιστοίχως μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου. Τα μεγέθη λοιπόν $Q_{c,max}$, $I_{c,max,t}$ και $Q_{d,max}$, $I_{d,max,t}$ παρατηρείται πως είναι ανάλογα μεταξύ τους και βάσει τις προηγούμενες σχέσεις μαθηματικής μοντελοποίησης. Ωστόσο, για να αυξηθούν οι μέγιστες χωρητικότητες του συσσωρευτή με ελεγχόμενο τρόπο όπως και είναι το λογικό με την αύξηση του χρόνου φόρτισης και αποφόρτισης, θα πρέπει τα ρεύματα φόρτισης και αποφόρτισης αντιστοίχως να μειώνονται. Εάν αυξανόντουσαν και ο χρόνος και το ρεύμα φόρτισης και αποφόρτισης τότε η μπαταρία θα οδηγούνταν σε εκτεταμένη λειτουργία κάτω από καταπονητικές και επιβαρυντικές συνθήκες για τη μακροζωία και την ορθή λειτουργία της.

Είναι εμφανές ότι σε ένα αυτόνομο σύστημα σαν αυτό που αναλύεται στην παρούσα εργασία η ενέργεια που λαμβάνεται από τις μπαταρίες αλλά και από άλλα υποσυστήματα θα είναι σε ορισμένα χρονικά στάδια διαλειμματικής μορφής. Επομένως, οι μπαταρίες είθισται να ανταποκρίνονται σε αυτά τα σενάρια εναλλαγών μεταξύ ενεργειακού ελλείμματος και πλεονάσματος και άρα, να διαθέτουν μία χαρακτηριστική συμπεριφορά η οποία είναι ιδιαίτερος δυναμική στην πραγματικότητα και έτσι, είναι απαραίτητο να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία τους, οποιεσδήποτε κι αν είναι οι συνθήκες.

4.4 Ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης (electrolyzer) διαδραματίζει έναν από τους βασικότερους ρόλους στο αυτόνομο υβριδικό σύστημα που αναλύεται. Όπως αναφέρθηκε και στα εισαγωγικά κομμάτια της εργασίας, ο ηλεκτρολύτης είναι υπεύθυνος για την παραγωγή του υδρογόνου με χρήση της πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας που προμηθεύεται από τα φωτοβολταϊκά. Ο τύπος ηλεκτρολύτη που αναλύεται παρακάτω είναι ο αλκαλικός υπό πίεση (AEL). Οι βασικότεροι λόγοι υιοθέτησης αυτής της τεχνολογίας για το σύστημα είναι το σχετικά χαμηλό κόστος της επένδυσης συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, από 192\$ μέχρι 270\$ για ονομαστική ισχύ μικρότερη του 1 MW [19], [39] αλλά και η ωριμότητα της τεχνολογίας σε εφαρμογές βιομηχανικού αλλά και μικρούς σκέλους εδώ και πολλές δεκαετίες. Επιγραμματικά, με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και νερού (H_2O), ο ηλεκτρολύτης διασπά τα μόρια νερού σε υδρογόνο (H_2) στην κάθοδο και οξυγόνο (O_2) στην άνοδο, με ενδιάμεσο προϊόν ανιόντα υδροξειδίου (OH^-) τα οποία μεταφέρονται από την κάθοδο στην άνοδο, με τη βοήθεια μεμβρανών, ηλεκτροδίων νικελίου(Ni) και υδροξειδίου του καλίου

(ΚΟΗ). Το παραγόμενο υδρογόνο, με τη σειρά του, αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή υψηλής πίεσης ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν είναι απαραίτητο και υπάρχει έλλειμμα ενέργειας στο σύστημα.

4.4.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η μελέτη ενός ηλεκτρολύτη δεν αποτελεί εύκολη διαδικασία και αυτό αντανακλάται στην πληθώρα επιστημονικών άρθρων, βιβλίων αλλά και διδακτορικών αναλύσεων που πραγματεύονται εκτενώς διάφορες μεθόδους μοντελοποίησης μίας τέτοιας συσκευής. Ο λόγος για αυτό είναι ότι η μοντελοποίηση ενός ηλεκτρολύτη αποτελεί πολυπαραγοντικό πρόβλημα αφού η επίδοση και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται επηρεάζονται από πολλές μεταβλητές. Ενδεικτικά η ένταση του ρεύματος, η πίεση λειτουργίας, η θερμοκρασία λειτουργίας, οι μεταβολές της τάσης λειτουργίας είναι ορισμένες από τις συνιστώσες που λαμβάνονται υπόψιν από αυτά τα μοντέλα που παρουσιάζουν οι παραπάνω πηγές, δίνοντας πολλές φορές περισσότερη σημασία σε ορισμένες και αψηφώντας άλλες και τις περισσότερες φορές βασίζοντας παραμέτρους και συντελεστές σε πειραματικά αποτελέσματα. Επομένως, αφού η βιβλιογραφία είναι τόσο εκτενής, η παρούσα ανάλυση, μοντελοποίηση και προσομοίωση βασίστηκε σε 4 έγκριτες επιστημονικές πηγές έπειτα από αναζήτηση και μελέτη.

Ως βασικές πηγές για τη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν η διδακτορική διατριβή του Øystein Ulleberg το 1998 με θέμα τη μοντελοποίηση αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής πράσινου υδρογόνου, σύμφωνα με το σύστημα PHOEBUS που λειτουργεί στη Γερμανία [24], η δημοσίευση του στο International Journal of Hydrogen Energy το 2003 με θέμα τη μοντελοποίηση αναβαθμισμένων αλκαλικών ηλεκτρολυτών έχοντας ως βάση στοιχειώδη θερμοδυναμικά αξιώματα, θεωρίες μεταφοράς θερμότητας, εμπειρικές ηλεκτροχημικές σχέσεις και θερμικά μοντέλα [40], καθώς και η δημοσίευση των Mónica Sánchez, Ernesto Amores, Lourdes Rodríguez και Carmen Clemente – Jul το 2018 η οποία παρουσιάζει αρκετά αναλυτικά ένα ημί – εμπειρικό μοντέλο και πειραματική επικύρωση αυτού για την αξιολόγηση των επιδόσεων ενός αλκαλικού ηλεκτρολύτη των 15 kW [41].

Μέσω της διδακτορικής διατριβής [24], είναι δυνατή η πλήρης μαθηματική μοντελοποίηση του υποσυστήματος του ηλεκτρολύτη, καθώς και όλων των άλλων υποσυστημάτων του αυτόνομου συστήματος, γεγονός το οποίο βοηθά πολύ στην παρούσα ανάλυση η οποία άντλησε διάφορα σημεία από αυτήν. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση του ηλεκτρολύτη χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις με πλήθος παραμέτρων οι οποίες προέκυψαν από πειραματικές

δοκιμές. Το μοντέλο που περιγράφεται παρουσιάζει μία ισχυρή διασύνδεση με τις τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας του ηλεκτρολύτη και της έντασης ρεύματος, χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψιν άλλες μεταβλητές όπως η πίεση και οι μεταβολές τάσης. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση αυτή αποδίδει και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται πλησιάζουν την πραγματική συμπεριφορά του ηλεκτρολύτη, χωρίς ταυτόχρονα να προβάλλουν σοβαρά εμπόδια σε μαθηματικό και υπολογιστικό επίπεδο και για αυτό προτιμήθηκε σε μεγάλο βαθμό το μοντέλο αυτό το οποίο και παρουσιάζεται και στο επιστημονικό άρθρο του ίδιου συγγραφέα [40] με πειραματική επικύρωση μέσω των συστημάτων PHOEBUS και HYSOLAR, για διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις.

Από την άλλη, το ημί – εμπειρικό μοντέλο που συμπεριλαμβάνεται στις πηγές αυτές [41], αποτέλεσε σημαντικό μέσο διασταύρωσης πληροφοριών και παρουσίασης ελαφρώς διαφορετικών και πληρέστερων μοντέλων, με περισσότερες παραμέτρους, 4 και 5 σε αριθμό για ορισμένες σχέσεις που υπακούει ο ηλεκτρολύτης (όπως η απόδοση Faraday). Επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας που λήφθηκε υπόψιν και συμπεριλαμβάνεται και στην παρούσα ανάλυση είναι και οι ατέλειες των αερίων που παράγονται, συγκεκριμένα στη μορφή της διάχυσης του υδρογόνου στο οξυγόνου, περισσότερο σε χαμηλές ονομαστικές τιμές ισχύος [41]. Τέλος, το επιστημονικό αυτό άρθρο δίνει αξιόλογο διαγραμματικό υλικό μέσω MATLAB, το οποίο καθοδήγησε και την μοντελοποίηση.

Από την άλλη μεριά, ένα μεγάλο κομμάτι της ανάλυσης αυτού του υποσυστήματος του ηλεκτρολύτη αποτελεί και η χρήση του προγράμματος ASPEN Plus για την προσομοίωση του σε διάφορες εντάσεις ρεύματος με απώτερο σκοπό να παρατηρηθεί η λειτουργία όλων των εξαρτημάτων του υποσυστήματος και να διασταυρώσουμε τα αποτελέσματα της μαθηματικής μοντελοποίησης με αυτά του προγράμματος. Σε αυτό το εγχείρημα, το επιστημονικό άρθρο των Mónica Sánchez, Ernesto Amores, David Abad, Lourdes Rodríguez και Carmen Clemente – Jul το 2020 αποτέλεσε σημαντική πηγή πληροφοριών διαμόρφωσης του συστήματος εντός του περιβάλλοντος του προγράμματος καθώς και σημαντική πηγή απαραίτητων μεταβολών που είθισται να απεικονιστούν διαγραμματικά και αφορούν τον πιο βελτιστοποιημένο σχεδιασμό αυτού του συστήματος, κυρίως των μεταβολών της απόδοσης του συστήματος και της ηλεκτρολυτικής «στοίβας» (stack) συναρτήσει μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η ονομαστική ισχύς του ηλεκτρολύτη.

4.4.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Αρχικά, από τις αρχές της θερμοδυναμικής είναι γνωστό ότι για μία αναστρέψιμη αντίδραση το ηλεκτρικό έργο που χρειάζεται για να διασπαστούν τα αντιδρώντα και στην περίπτωση του

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ηλεκτρολύτη το νερό είναι ίσο με τη μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs ΔG . Επομένως, προκύπτει η παρακάτω σχέση για την απαιτούμενη ενέργεια του ηλεκτρολύτη:

$$W_{el} = \Delta G = zFE \quad 4.4.1$$

[24]

όπου:

z = αριθμός μολ ηλεκτρονίων που μεταφέρονται ανά μολ νερού = 2

E = διαφορά δυναμικού στα δύο ηλεκτρόδια ενός κελιού, V

F = σταθερά Faraday = 96485 C/mol

Η διαφορά δυναμικού E για μία αναστρέψιμη ηλεκτροχημική διαδικασία είναι γνωστή και ως αναστρέψιμη τάση. Από την παραπάνω σχέση, η αναστρέψιμη τάση του ηλεκτρολύτη μπορεί να δοθεί από τη σχέση:

$$V_{rev} = \frac{\Delta G}{zF} \quad 4.4.2$$

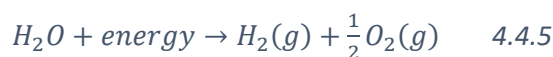
Αναλόγως, η συνολική απαίτηση ενέργειας ΔH (μεταβολή ενθαλπίας) είναι γνωστή και ως θερμοουδέτερη τάση και εκφράζεται ως:

$$V_{tn} = \frac{\Delta H}{zF} \quad 4.4.3$$

Τώρα, η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs συνδέεται με τη μεταβολή ενθαλπίας μέσω της σχέσης:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad 4.4.4$$

Είναι γνωστές οι σχέσεις που δίνουν τη διαφορά ενθαλπίας ΔH και τη διαφορά εντροπίας ΔS μίας αντίδρασης από τη θερμοδυναμική. Οπότε, για την αντίδραση διαχωρισμού του νερού ισχύει:



$$\Delta H = \Delta H_{H_2} + \frac{1}{2}\Delta H_{O_2} - \Delta H_{H_2O} \quad 4.4.6$$

$$\Delta H_x = Cp_x(T - T_{ref}) + \Delta H_{f,x}^\circ \quad 4.4.7$$

[24],[28]

όπου:

Cp_x = ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, J/Kmol

ΔH_x = μεταβολή ενθαλπίας του στοιχείου x , J/mol

$\Delta H_{f,x}^\circ$ = ενθαλπία σχηματισμού, J/mol

T = θερμοκρασία, K

T_{ref} = θερμοκρασία αναφοράς, K

x = H_2 , O_2 , H_2O

$$\Delta S = \Delta S_{H_2} + \frac{1}{2} \Delta S_{O_2} - \Delta S_{H_2O} \quad 4.4.8$$

$$\Delta S_y = C p_y \ln \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) - R \ln \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) + S_{f,y}^o \quad 4.4.9$$

$$\Delta S_{H_2O} = C p_{H_2O} \ln \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) + S_{f,H_2O}^o \quad 4.4.10$$

[24],[28]

όπου:

ΔS_y = αλλαγή στην εντροπία του στοιχείου y , J/mol

$S_{f,y}^o$ = εντροπία σχηματισμού του στοιχείου y , J/mol

S_{f,H_2O}^o = εντροπία σχηματισμού νερού H_2O , J/mol

p = πίεση συστήματος, bar

p_{ref} = πίεση αναφοράς, bar

y = H_2 , O_2

R = παγκόσμια σταθερά αερίων = 8.314 J/molK

Σε STC (Standard Test Conditions – 25 °C, 1 bar) τώρα, οι τιμές των παραπάνω τάσεων είναι:

$$V_{rev} = 1.229 \text{ V}$$

$$V_{tn} = 1.482 \text{ V}$$

[42]

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι αυτές οι τιμές αλλάζουν όταν επέλθουν αλλαγές πίεσης και ιδιαίτερα θερμοκρασίας [24], όπως φαίνεται και από τις παραπάνω σχέσεις. Στην παρούσα ανάλυση, λήφθηκε υπόψιν μόνο η επίδραση της θερμοκρασίας στις τιμές αυτές και όχι η πίεση αφού η θερμοκρασία είναι και αυτή που ασκεί τη μεγαλύτερη επιρροή. Επομένως, η εξάρτηση των V_{rev} και V_{tn} από τη θερμοκρασία φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{rev} = 1.5184 - 1.5421 * 10^{-3}T + 9.523 * 10^{-5} \ln T + 9.84 * 10^{-8}T^2$$

$$V_{tn} = 1.4850 - 1.490 * 10^{-4}T - 9.84 * 10^{-8}T^2$$

[42]

όπου:

T = θερμοκρασία ηλεκτρόλυσης, K

Η κινητική των ηλεκτροδίων του ηλεκτρολύτη μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις ρεύματος – τάσης ($I - V$). Για την περίπτωση που εξετάζεται χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της τάσης λειτουργίας το πλέον διαδεδομένο μοντέλο:

$$V = V_{rev} + rJ + s \log(tJ + 1)$$

[24]

όπου:

V = τάση λειτουργίας, V

V_{rev} = αναστρέψιμη τάση, V

r = παράμετρος ωμικής αντίστασης ηλεκτρολύτη, Ω

s, t = παράμετροι της υπέρτασης των ηλεκτροδίων

J = πυκνότητα ρεύματος, A/m^2

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση, παρουσιάζονται νέοι όροι οι οποίοι χρήζουν εξήγησης αφού είναι ιδιαιτέρως σημαντικοί και για μεταγενέστερα κεφάλαια. Με τον όρο υπέρταση στην ηλεκτροχημεία ορίζεται η διαφορά μεταξύ της θεωρητικής τάσης και της πραγματικής τάσης που είναι απαραίτητη για να προκληθεί ηλεκτρόλυση. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στο υποσύστημα της εργασίας που είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια, την κυψέλη καυσίμου [43]. Ωστόσο, αφού για τον ηλεκτρολύτη η υπέρταση συνιστά το άθροισμα το άθροισμα της θεωρητικής τάσης με τις απώλειες αυτές, για την κυψέλη καυσίμου η υπέρταση θα είναι ίση με τη διαφορά τους. Για τον ηλεκτρολύτη άρα θα ισχύει:

$$V = V_{rev} + \hat{\eta} = V_{rev} + (\hat{\eta}_{cat} + \hat{\eta}_{an} + \hat{\eta}_{ohm} + \hat{\eta}_{conc})$$

[44]

Παρατηρείται ότι στην παραπάνω σχέση υπάρχουν 3 είδη υπέρτασης:

- Υπέρταση ενεργοποίησης (η_{cat}, η_{an}): Σχετίζεται με την πυκνότητα ρεύματος
- Ωμική υπέρταση (η_{ohm}): Είναι αποτέλεσμα διεργασιών διάχυσης και παίζει καίριο ρόλο στην απόκριση της συσκευής (σε πόσο χρόνο θα μεταβεί σε σταθερή κατάσταση)

- Υπέρταση συγκέντρωσης (η_{conc}): Είναι αποτέλεσμα της συνολικής αντίστασης που παρουσιάζει η συσκευή λόγω της ωμικής αντίστασης των στοιχείων που την απαρτίζουν (ηλεκτρόδια, καταλύτης κ.τ.λ.)

[28]

Τελικά, η εξίσωση της τάσης του ηλεκτρολύτη έχει ως μεταβλητές την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον ηλεκτρολύτη και τη θερμοκρασία λειτουργίας του ηλεκτρολύτη ως εξής:

$$V = V_{rev} + ((r_1 + d_1) + r_2 T + d_2 p) J + (s_1 + s_2 T + s_3 T^2) \log \left(\left(t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2} \right) J + 1 \right) \quad 4.4.11$$

[44]

όπου:

r_i = παράμετροι σχετιζόμενοι με την ωμική αντίσταση του ηλεκτρολύτη

d_i = παράμετροι σχετιζόμενοι με την πίεση του ηλεκτρολύτη

s_i, t_i = παράμετροι σχετιζόμενοι με την υπέρταση συγκέντρωσης και ενεργοποίησης

T = θερμοκρασία λειτουργίας ηλεκτρολύτη, °C

Οι εμπειρικές παράμετροι (r_i, s_i και t_i) που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω εξίσωση υπολογίζονται με αριθμητικό τρόπο, μέσω μη γραμμικής τεχνικής παλινδρόμησης [24] και οι τιμές τους λήφθηκαν από επιστημονικό άρθρο που είχε διενεργήσει τις απαραίτητες πειραματικές διαδικασίες, όπως θα παρατεθούν και παρακάτω [44].

Τώρα, η παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου από τον ηλεκτρολύτη είναι άμεσα ανάλογη των ηλεκτρονίων που διαρρέουν το σύστημα στα ηλεκτρόδια και άρα, άμεσα ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος J του ηλεκτρολύτη, σύμφωνα με το Νόμο του Faraday. Επομένως, ο συνολικός ρυθμός παραγωγής υδρογόνου από τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος απαρτίζεται από ένα αριθμό κελιών συνδεδεμένων εν σειρά, θα οριζόταν ως εξής:

$$\dot{n}_{H_2 th} = \frac{n_c I}{zF} \quad 4.4.12$$

όπου:

n_{H_2} = ρυθμός παραγωγής υδρογόνου, mol/s

n_c = αριθμός κελιών ηλεκτρολύτη σε σειρά

Ωστόσο, ο παραπάνω τύπος δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και περιγράφει παρά μόνο τη θεωρητική ποσότητα υδρογόνου που δύναται να παραχθεί εντός ενός χρονικού διαστήματος. Ο λόγος λοιπόν μεταξύ του πραγματικού ρυθμού παραγωγής και του θεωρητικού ρυθμού παραγωγής ορίζεται ως η απόδοση Faraday και οφείλεται στις παρασιτικές απώλειες του ρεύματος κατά μήκος των αγωγών αερίων του ηλεκτρολύτη [24]. Η απόδοση Faraday λοιπόν και η επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτήν μοντελοποιήθηκαν με χρήση 2 μοντέλων: το πρώτο με 4 παραμέτρους το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στη συνέχεια της ανάλυσης και το δεύτερο με 5 παραμέτρους, για λόγους σύγκρισης. Τα 2 αυτά μοντέλα δίνονται αντιστοίχως από τις εξής σχέσεις:

$$\eta_F = \left(\frac{J^2}{f_{11} + f_{12}T + J^2} \right) (f_{21} + f_{22}T) \quad 4.4.13$$

$$\eta_F = B_1 + B_2 e^{\frac{B_3 + B_4 T + B_5 T^2}{J}} \quad 4.4.14$$

[41], [44]

όπου:

f_{ij} = παράμετροι σχετιζόμενοι με τη θερμοκρασία

B_i = παράμετροι σχετιζόμενοι με τη θερμοκρασία

Όπως παρατηρούμε και από τα δύο μοντέλα παραπάνω μόνον η θερμοκρασία λαμβάνεται υπόψιν ως παράγοντας επιρροής μαζί με την πυκνότητα ρεύματος και αυτό γιατί η επίδραση της πίεσης είναι συγκριτικά πολύ μικρή [41].

Επομένως, ο πραγματικός ρυθμός παραγωγής υδρογόνου δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{n}_{H_2 th} = \eta_F \frac{n_c I}{zF} \quad 4.4.15$$

Επίσης, ο ρυθμός κατανάλωσης νερού και ο ρυθμός παραγωγής οξυγόνου βρίσκονται εύκολα από τη στοιχειομετρία των μολ της αντίδρασης διάσπασης του νερού, όπως φαίνεται ακριβώς από κάτω:

$$\dot{n}_{H_2 O} = \dot{n}_{H_2} = 2\dot{n}_{O_2} \quad 4.4.16$$

[24]

Τώρα, η «καθαρότητα» των αερίων υδρογόνου και οξυγόνου που προκύπτουν από την ηλεκτρολυτική διαδικασία συνιστά σημαντικό παράγοντα για τη σωστή λειτουργία και της κυψέλης καυσίμου στην οποία θα προμηθευθούν αυτά. Πιο συγκεκριμένα, η διάχυση του υδρογόνου σε οξυγόνο (ΗΤΟ) είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος, λόγω του υψηλότερου ρυθμού

παραγωγής υδρογόνου και λόγω της μειωμένης «καθαρότητας» του οξυγόνου σε χαμηλή ονομαστική παροχή ισχύος στον ηλεκτρολύτη. Επίσης, η διάχυση οξυγόνου στο υδρογόνο δε μας απασχολεί αφού τα ποσοστά του φαινομένου Oxygen To Hydrogen (ΟΤΗ) είναι αμελητέα (0.1% - 0.5 %) [41].

Για τον υπολογισμό λοιπόν του ΗΤΟ είναι απαραίτητη η χρήση παραμέτρων διάχυσης οι οποίες δεν είναι και τόσο εύκολες να προσδιοριστούν. Ωστόσο, παρατίθενται ένα μοντέλο το οποίο συμπεριλαμβάνει και τις μεταβολές της θερμοκρασίας και αυτές τις πίεσης αφού η μεταβλητή που εξετάζεται εμφανίζει ισχυρή εξάρτηση στην πίεση του συστήματος [41].

$$HTO = \left[C_1 + C_2T + C_3T^2 + (C_4 + C_5T + C_6T^2)e^{\frac{C_7+C_8T+C_9T^2}{J}} \right] + \left[E_1 + E_2p + E_3p^2 + (E_4 + E_5p + E_6p^2)e^{\frac{E_7+E_8p+E_9p^2}{J}} \right] \quad 4.4.17$$

[41]

όπου:

C_i = παράμετροι σχετιζόμενοι με τη θερμοκρασία

E_i = παράμετροι σχετιζόμενοι με την πίεση

T = θερμοκρασία λειτουργίας ηλεκτρολύτη, °C

p = πίεση λειτουργίας ηλεκτρολύτη, bar

Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης τώρα ο οποίος υποδεικνύει το ποσοστό της ενέργειας που χάνεται με τη μορφή θερμότητας δίνεται από το λόγο της θερμοουδέτερης τάσης με την ολική τάση λειτουργίας του ως εξής:

$$\eta_e = \frac{V_{tn}}{V} \quad 4.4.18$$

[24]

όπου:

V_{tn} = θερμοουδέτερη τάση ηλεκτρολύτη, V

V = ολική τάση ηλεκτρολύτη, V

Ενδιαφέρον αποτελεί και το γεγονός ότι η ενεργειακή απόδοση μπορεί να είναι και μεγαλύτερη του 100% με τη διατήρηση της τάσης του ηλεκτρολύτη V στην περιοχή μεταξύ της αναστρέψιμης τάσης V_{rev} και την θερμοουδέτερης τάσης V_{tn} . Πρακτικά αυτό γίνεται εάν

προσθεθεί θερμική ενέργεια στο σύστημα και ονομάζεται ηλεκτρόλυση υψηλών θερμοκρασιών (High Temperature Electrolysis) [24]. Στην περίπτωση όμως χαμηλών θερμοκρασιών που εξετάζονται στην παρούσα περίπτωση, η τάση V θα είναι πάντοτε μεγαλύτερη της V_{th} .

Τέλος, για την προσομοίωση μέσω ASPEN Plus που θα ακολουθήσει παρακάτω, υπολογίζονται με πιο πρακτικές σχέσεις ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ηλεκτρόλυσης μέχρι την αποθήκευση του υδρογόνου η_{system} , ο βαθμός απόδοσης της «στοίβας» (stack) του ηλεκτρολύτη η_{stack} και η ειδική κατανάλωση ενέργειας SEC ανά κιλό παραγόμενου υδρογόνου ως εξής:

$$\eta_{system} = \frac{\dot{m}_{H_2,FC} LHV_{H_2}}{W_{system}} \quad 4.4.19$$

$$\eta_{system} = \frac{\dot{m}_{H_2,FC} LHV_{H_2}}{W_{stack}} \quad 4.4.20$$

$$SEC = \frac{W_{stack}}{\dot{m}_{H_2,FC}} \quad 4.4.21$$

[45]

όπου:

$n_{H_2,FC}$ = ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου, kg/h

LHV_{H_2} = χαμηλό θερμικό δυναμικό υδρογόνου (Lower Heating Value), kWh/kg

W_{system} = παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρόλυσης, MWe

W_{stack} = παροχή ηλεκτρική ενέργειας στη στοίβα (stack) κελιών ηλεκτρόλυσης, MWe

4.4.3 Προσομοίωση Μαθηματικού Μοντέλου

Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης υπό πίεση (AEL) που εξετάζεται και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παρουσιάζονται παρακάτω έχει ονομαστική ισχύ 3.5 kW, θερμοκρασία λειτουργίας 80 °C και πίεση λειτουργίας 10 bar. Ωστόσο, με μεταβολές της πυκνότητας ρεύματος J μεταβάλλεται αναλόγως και η ισχύς του ηλεκτρολύτη W_{stack} , με τον αριθμό των κελιών συνδεδεμένα σε σειρά και την επιφάνεια που καταλαμβάνουν να παραμένουν σταθερά, οπότε αυτό θα παρουσιαστεί και παρακάτω για διάφορες τιμές του J .

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι διάφορες παράμετροι και συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του μοντέλου που παρουσιάστηκε παραπάνω.

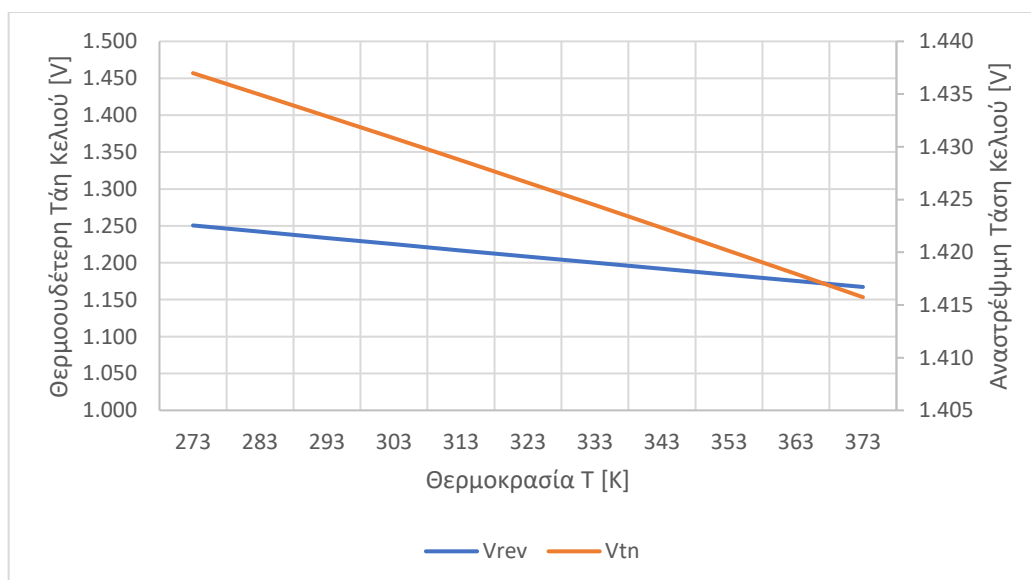
Πίνακας 4 Τιμές παραμέτρων και συντελεστών προσομοίωσης

AEL Ηλεκτρολύτης

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

r_1	4.45153E-05	$\Omega \text{ m}^2$	C_8	-23.60345	$\text{A m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
r_2	6.88874E-09	$\Omega \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	C_9	-0.25774	$\text{A m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$
d_1	-3.12996E-06	$\Omega \text{ m}^2$	E_1	3.71417	-
d_2	4.47137E-07	$\Omega \text{ m}^2 \text{ bar}^{-1}$	E_2	-0.93063	bar^{-1}
s	0.33824	V	E_3	0.05817	bar^{-2}
t_1	-0.01539	$\text{m}^2 \text{ A}^{-1}$	E_4	-3.72068	-
t_2	2.00181	$\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C A}^{-1}$	E_5	0.93219	bar^{-1}
t_3	15.24178	$\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}^2 \text{ A}^{-1}$	E_6	-0.05826	bar^{-2}
f_{11}	478645.74	$\text{A}^2 \text{ m}^{-4}$	E_7	-18.38215	A m^{-2}
f_{12}	-2953.15	$\text{A}^2 \text{ m}^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	E_8	5.87316	$\text{A m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$
f_{21}	1.0396	-	E_9	-0.46425	$\text{A m}^{-2} \text{ bar}^{-2}$
f_{22}	-0.00104	$^\circ\text{C}^{-1}$	B_1	4.50424E-05	-
C_1	0.09901	-	B_2	1.02116	-
C_2	-0.00207	$^\circ\text{C}^{-1}$	B_3	-247.26	A m^{-2}
C_3	1.31064E-05	$^\circ\text{C}^{-2}$	B_4	2.06972	$\text{A m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
C_4	-0.08483	-	B_5	-0.03571	$\text{A m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$
C_5	0.00179	$^\circ\text{C}^{-1}$	A_c	0.1	m^2
C_6	-0.000011339	$^\circ\text{C}^{-2}$	n_c	10	-
C_7	1481.45	A m^{-2}	F	96485	C/mol

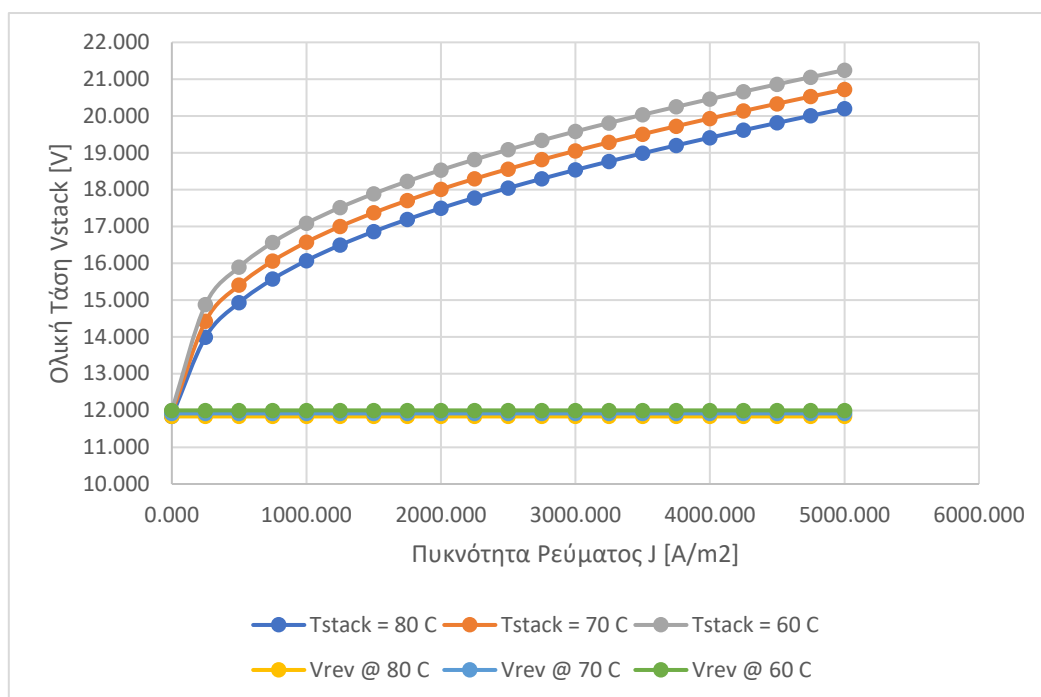
Τα διαγράμματα που ακολουθούν θα συνοδεύονται το καθένα από επεξηγήσεις για τα αποτελέσματα που προέκυψαν ώστε να κατανοηθεί επαρκώς η επιρροή των μεταβλητών του ηλεκτρολύτη στη συμπεριφορά του.



Διάγραμμα 20 Μεταβολή αναστρέψιμης και θερμοουδέτερης τάσης συναρτήσει θερμοκρασίας

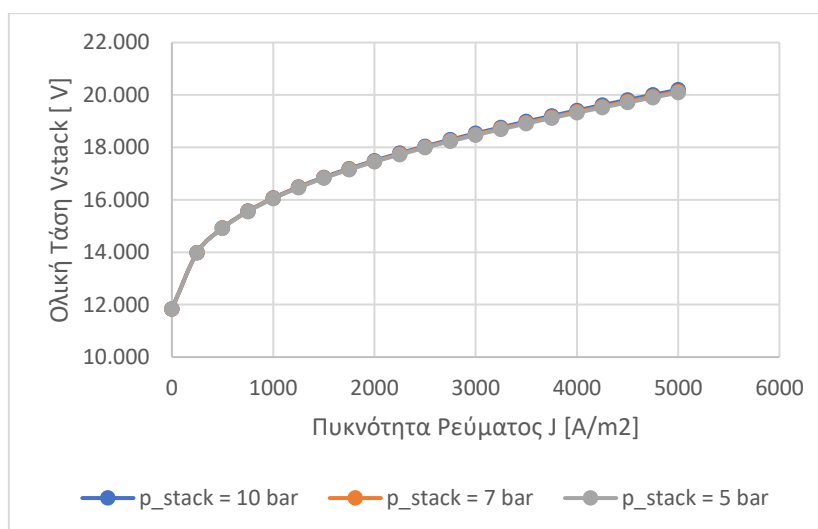
Αρχικά, πρέπει να παρουσιαστεί διαγραμματικά η μεταβολή της αναστρέψιμης τάσης και της θερμοουδέτερης τάσης. Πιο συγκεκριμένα, αμφότερες οι μεταβολές συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας φαίνεται πως είναι γραμμικές και οι τιμές αμφοτέρων των τάσεων να είναι μειούμενες με αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, η κλίση της καμπύλης της V_{rev} δεν

είναι το ίδιο απότομη με αυτήν της V_{tn} , γεγονός που μαρτυρά το βαθμό επίδρασης της θερμοκρασίας στην κάθε μία.



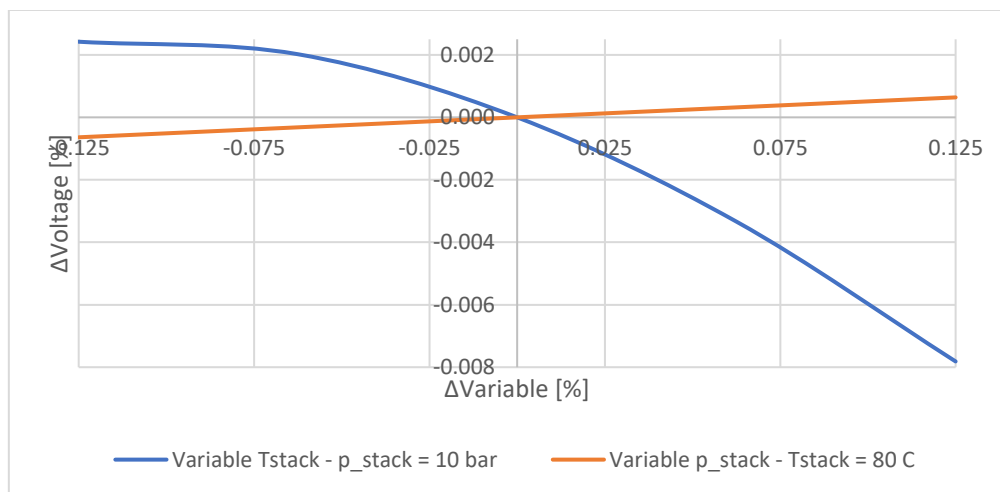
Διάγραμμα 21 Μεταβολή αναστρέψιμη και ολικής τάσης συναρτήσει θερμοκρασίας λειτουργίας για πίεση 10 bar

Παρατηρείται για την τάση λειτουργίας όλης της «στοίβας» (stack) του ηλεκτρολύτη ότι μεταβάλλεται με λογαριθμικό τρόπο και όσο μεγαλώνει η πυκνότητα ρεύματος αποκλίνει όλο και περισσότερο από την αναστρέψιμη τάση. Ακόμη, είναι εμφανές ότι με αύξηση της θερμοκρασίας, με την πίεση σταθερή στα 10 bar, η αναστρέψιμη τάση μειώνεται και μειώνεται, σε μεγαλύτερο βαθμό, και η τάση λειτουργίας λόγω της αύξησης των παρασιτικών απωλειών και κατά συνέπεια, της υπέρτασης.



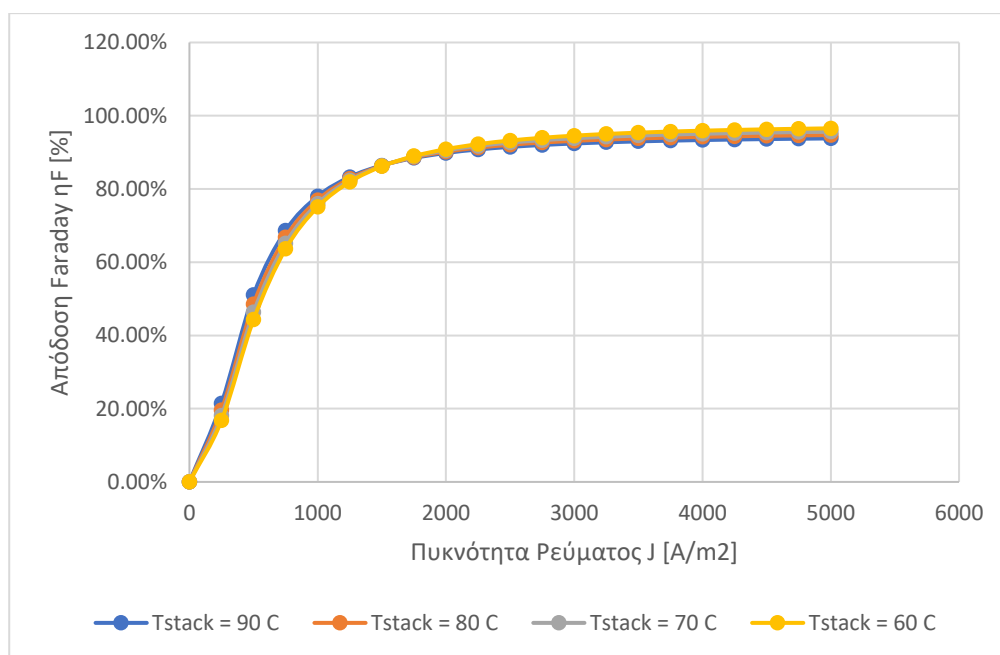
Διάγραμμα 22 Μεταβολή ολικής τάσης συναρτήσει πίεσης λειτουργίας για θερμοκρασία 80 C

Από την άλλη, διατηρώντας τη θερμοκρασία σταθερή και μεταβάλλοντας την πίεση, το μοτίβο είναι το αντίστροφο. Πιο συγκεκριμένα, με αύξηση της πίεσης η ολική τάση λειτουργίας του ηλεκτρολύτη αυξάνεται και αυτή, ωστόσο η επίδραση της πίεσης δεν είναι στα ίδια επίπεδα με την επίδραση της θερμοκρασίας. Σημειωτέων, η αναστρέψιμη τάση δεν εμφανίζεται στο Διάγραμμα 22 διότι η παρούσα μοντελοποίηση δε λαμβάνει υπόψιν μεταβολές πίεσης όσον αφορά τη V_{rev} .

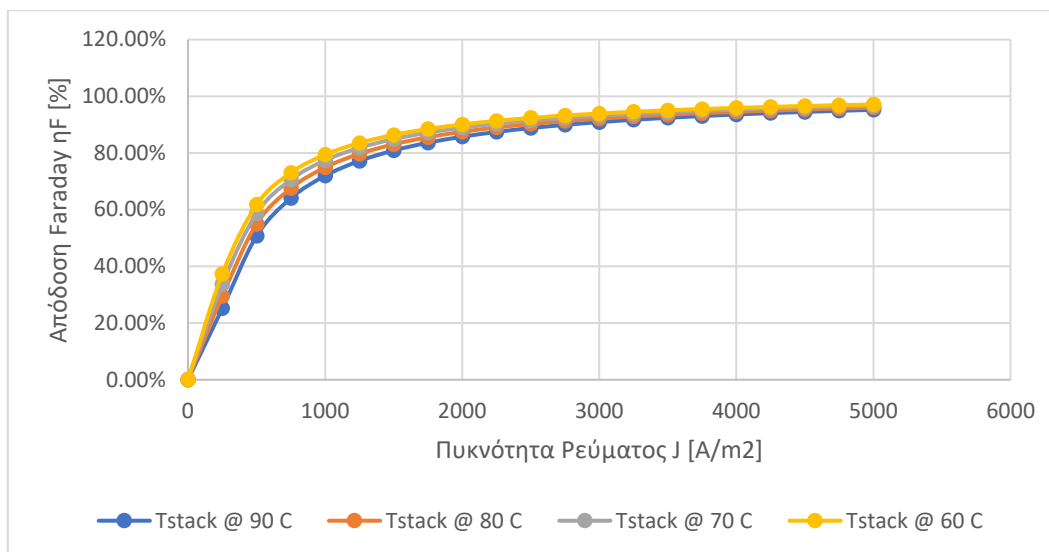


Διάγραμμα 23 Ποσοστιαία μεταβολή ολικής τάσης συναρτήσει πίεσης με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας και θερμοκρασίας με περιπτώσεις σταθερής πίεσης

Αυτά που ειπώθηκαν παραπάνω όσον αφορά το βαθμό επίδρασης της πίεσης και της θερμοκρασίας στις μεταβολές της ολικής τάσης παρουσιάζονται με ποσοστιαία μορφή η οποία βοηθάει περαιτέρω στην κατανόηση αυτού του φαινομένου.

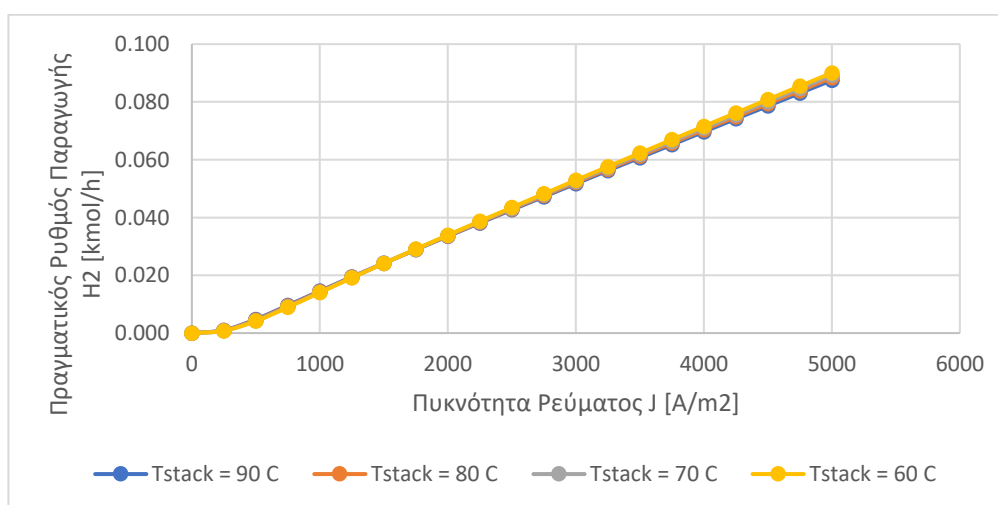


Διάγραμμα 24 Μεταβολή απόδοσης Faraday συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος (4 παράμετροι)



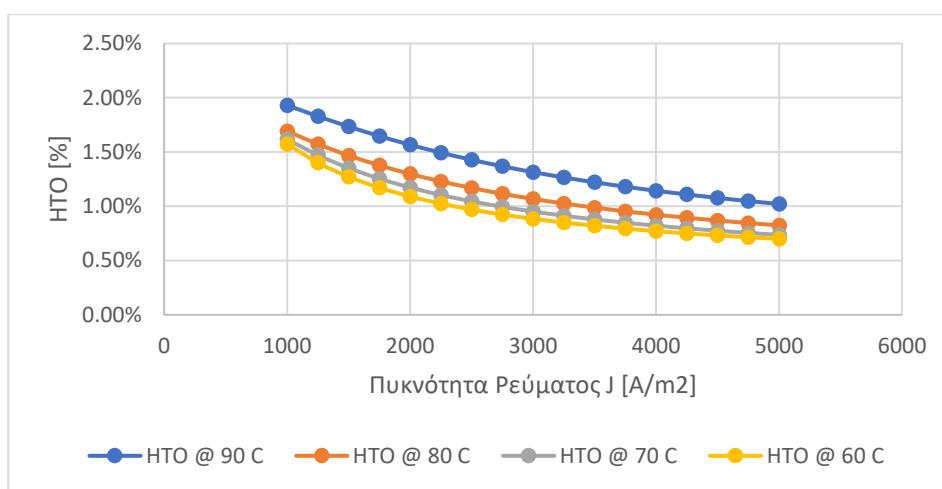
Διάγραμμα 25 Μεταβολή απόδοσης Faraday συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος (5 παράμετροι)

Όπως αναφέρθηκε και πριν στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης, στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται για τον υπολογισμό της απόδοσης Faraday 2 μοντέλα: αυτό με 4 παραμέτρους και το άλλο με 5 παραμέτρους. Οι διαφορές μεταξύ των δύο αυτών μοντέλων φαίνονται στα παραπάνω διαγράμματα στην περιοχή μεταξύ (**κοντά** στο) 0 και 1500 A/m², δηλαδή ο τρόπος μοντελοποίησης τους για χαμηλές πυκνότητες ρεύματος. Όπως φαίνεται επίσης το μοντέλο 4 παραμέτρων η κλίση των καμπυλών για χαμηλές πυκνότητες ρεύματος είναι πιο μικρή οπότε αυτό το μοντέλο προβλέπει χαμηλότερες τιμές απόδοσης Faraday σε σύγκριση με το μοντέλο 5 παραμέτρων όταν μειώνεται το J. Για υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος ($J > 2000 \text{ A/m}^2$), η διαγραμματική απεικόνιση των δύο μοντέλων σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους και παρατηρείται, σε εκείνη την περιοχή, ότι με μείωση της θερμοκρασίας, αυξάνεται η απόδοση Faraday.

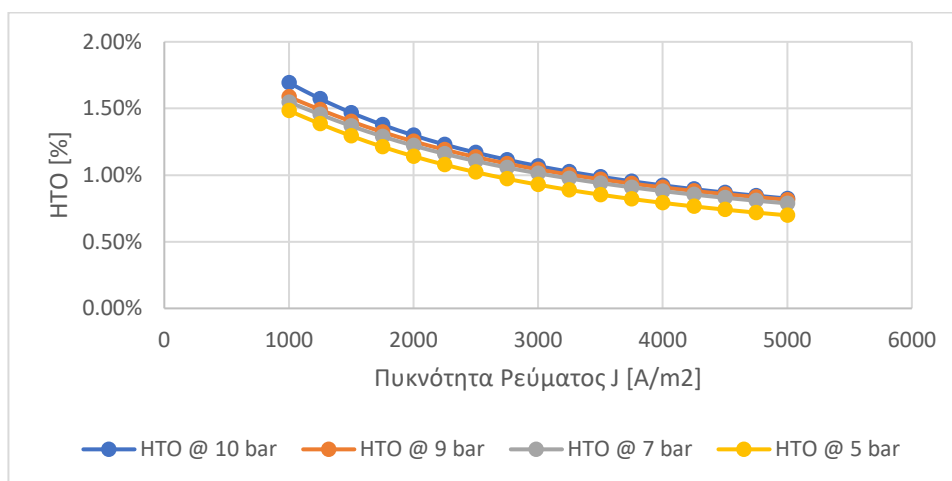


Διάγραμμα 26 Μεταβολή πραγματικού ρυθμού παραγωγής υδρογόνου συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για πίεση 10 bar

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 26, ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με το μοντέλο 4 παραμέτρων για την απόδοση Faraday. Οπότε, όπως και στην απόδοση Faraday, έπειτα από τα 2000 A/m², είναι εμφανές ότι έχοντας χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας επιτυγχάνεται υψηλότερος ρυθμός παραγωγής υδρογόνου, λόγω της αύξησης της αντίστασης (λιγότερες παρασιτικές απώλειες) και κατά συνέπεια, της υψηλότερης απόδοσης Faraday. Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι το μοτίβο που παρατηρείται στο διάγραμμα αυτό οφείλεται κατά μεγάλο βαθμό και στη μειωμένη «καθαρότητα» των αερίων για χαμηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος και στην αυξημένη «καθαρότητα» για υψηλές τιμές, όπως θα φανεί και στα επόμενα διαγράμματα.



Διάγραμμα 27 Ποσοστιαία μεταβολή HTO συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για πίεση 10 bar



Διάγραμμα 28 Ποσοστιαία μεταβολή HTO συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για θερμοκρασία 80 C

Το φαινόμενο διάχυσης υδρογόνου σε οξυγόνο (HTO) παρατηρείται διαρκώς σε ηλεκτρολυτικές διαδικασίες και η ένταση του ρυθμίζεται από τη θερμοκρασία αλλά και την πίεση λειτουργίας του ηλεκτρολύτη όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 27 και Διάγραμμα 28. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται τόσο συχνά, συγκριτικά με το οξυγόνο και το αντίστροφο

φαινόμενο ΟΤΗ, λόγω του μειωμένου μεγέθους των μορίων του υδρογόνου και άρα της αυξημένης διαχυτότητάς τους μέσω των κελιών και διαφραγμάτων του ηλεκτρολύτη, σε σύγκριση με τα μόρια του υδρογόνου [46]. Τώρα, τα διαγράμματα αυτά αποδεικνύουν ότι το φαινόμενο εντείνεται και με την αύξηση αμφότερων της θερμοκρασίας και της πίεσης, ωστόσο, η επίδραση της θερμοκρασίας φαίνεται να είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτήν της πίεσης, ιδιαίτέρως σε χαμηλότερες πυκνότητες ρεύματος. Επομένως, για λόγους ασφαλείας και «αγνότητας» των παραγόμενων αερίων, το κατώτατο όριο της πυκνότητας ρεύματος θα πρέπει να είναι γενικώς στις εφαρμογές 1000 – 1500 A/m².

4.4.4 Μοντελοποίηση ASPEN Plus

Εκτός της μαθηματικής μοντελοποίησης της ηλεκτρολυτικής μονάδας παραγωγής υδρογόνου πραγματοποιήθηκε και μία πιο πρακτική και ενδεδειγμένη μοντελοποίηση μέσω του προγράμματος ASPEN Plus. Απώτερος σκοπός ήταν η απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε πιο άμεση και συμπυκνωμένη μορφή, καθώς και η παρουσίαση όλων των ενδιάμεσων σταδίων που βρίσκουν σημαντική εφαρμογή για τη διασφάλιση αυξημένης καθαρότητας των αερίων που προκύπτουν και ιδιαίτερα, του υδρογόνου.

Αρχικά, μέσω της βιβλιογραφίας {[6], [19], [20]}, γίνεται άμεσα κατανοητό ότι τα χαρακτηριστικά ενός αλκαλικού ηλεκτρολύτη, ως προς τα κάτω και άνω όρια των τιμών τους, διαφέρουν από έρευνα σε έρευνα. Στον φαίνεται παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρολύτη ΑΕΛ και τα όρια στα οποία κινούνται οι τιμές αυτών.

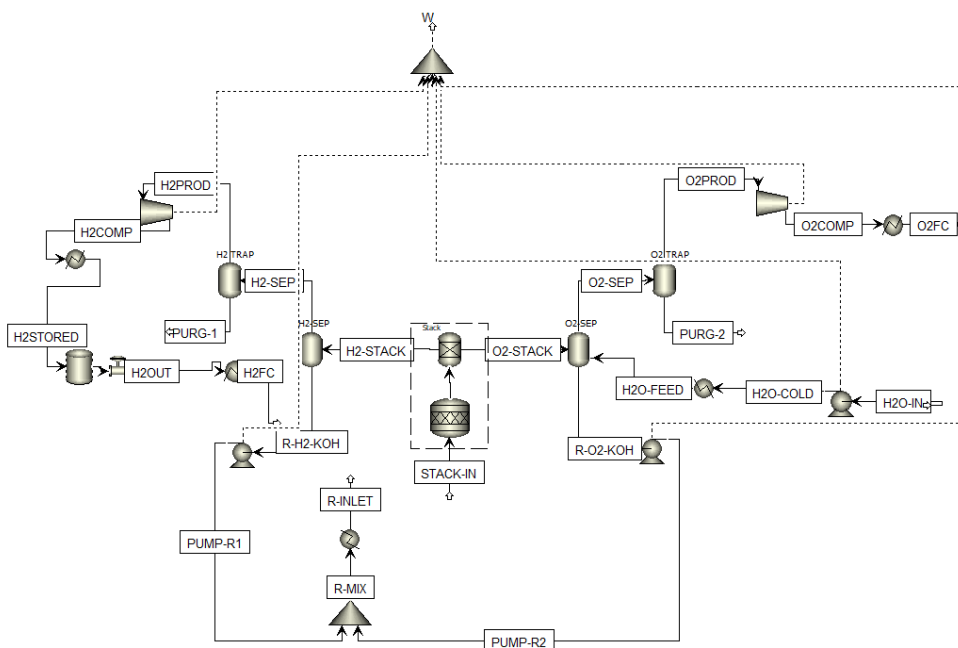
Πίνακας 5 Τυπικές τιμές βασικών χαρακτηριστικών αλκαλικού ηλεκτρολύτη

ΑΕΛ Ηλεκτρολύτης		
Θερμοκρασία Λειτουργίας	60 – 90	°C
Πίεση Λειτουργίας	10 – 30	bar
Πυκνότητα Ρεύματος	2000 - 6000	A/m ²
Ευελιξία Φορτίου	20 – 100	% της ονομαστικής ισχύος
Χρόνος «κρύας» εκκίνησης	1 – 2	h
Χρόνος «θερμής» εκκίνησης	1 – 5	h
Ονομαστική Απόδοση Στοίβας Ηλεκτρόλυσης	63 – 71	%
Ειδική Κατανάλωση Ενέργειας Στοίβας	46.7 – 53.4	kWh/kg
Ονομαστική Απόδοση Συστήματος	51 – 60	%
Ειδική Κατανάλωση Ενέργειας Συστήματος	55.6 – 65.6	kWh/kg
Μέγιστη Ονομαστική Ισχύς Ηλεκτρολυτικής Στοίβας	6	MW
Μέγιστος Ρυθμός Παραγωγής Υδρογόνου	125.86	kg/h

Έκταση Κελιού Στοίβας	<3.6	m ²
Χρονικό Όριο «Ζωής»	55 – 120	kh (χιλιάδες ώρες)
Ετήσια Μείωση Απόδοσης	0.25 – 1.5	%
Κόστος Επένδυσης Συστήματος (CAPEX)	850 – 1500	(\$/kW)
Κόστος Συντήρησης	2 – 3	% CAPEX ανά χρόνο

Πρέπει να αποσαφηνιστεί για τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα ότι οι τιμές που φαίνονται είναι τυπικές οπότε με τα παραπάνω στοιχεία δεν καλύπτεται το 100% των αλκαλικών ηλεκτρολυτών και άρα, μερικά μοντέλα και εγκαταστάσεις αποκλίνουν από αυτά τα όρια.

Τώρα, η αλκαλική ηλεκτρολυτική διαδικασία μοντελοποιήθηκε με έμμεσο τρόπο, κάνοντας χρήση των δυνατοτήτων και των ήδη υπάρχοντων λογισμικών «πυλώνων» (blocks) του προγράμματος αφού η άμεση μοντελοποίηση των διεργασιών ηλεκτρόλυσης χαμηλής θερμοκρασίας δεν είναι διαθέσιμη μέσω του λογισμικού [45]. Επίσης η βασική παραδοχή που λήφθηκε υπόψιν κατά τη δημιουργία του μοντέλου που φαίνεται στην ήταν ότι όλα τα υποσυστήματα βρίσκονται σε μόνιμη κατάσταση και σταθερές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 22 Διάγραμμα ροής και διεργασιών αλκαλικού ηλεκτρολύτη (AEL), συμπιεστή και αποθηκευτικής δεξαμενής υδρογόνου με χρήση ASPEN Plus

Αρχικά, το τελικό διάγραμμα ροής και διεργασιών αυτής της μοντελοποίησης φαίνονται στην Εικόνα 22. Μέσω αυτού καθορίστηκαν οι λειτουργίες και η ισορροπία ολόκληρης της ηλεκτρολυτικής εγκατάστασης (Balance of Plant – BoP), συμπεριλαμβανομένων των διεργασιών συμπίεσης και αποθήκευσης του υδρογόνου και του οξυγόνου σε κατάλληλες συνθήκες προς μελλοντική τους χρήση από την κυψέλη καυσίμου.

Τώρα, η ηλεκτρολυτική «στοίβα» (STACK) βρίσκεται στο επίκεντρο αυτού του υποσυστήματος. Με την παροχή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας στα κελιά που την απαρτίζουν διεκπεραιώνεται η αποσύνθεση του νερού που εισέρχεται σε υδρογόνο και οξυγόνο, όπως φάνηκε και στην **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**.

Το υδρογόνο (H₂-STACK) και το οξυγόνο (O₂-STACK) που παράγονται στα κελιά της στοίβας καταλήγουν εμποτισμένα με την ηλεκτρολυτική ουσία (KOH, 30% wt) στα δοχεία διαχωρισμού υγρής – αέριας φάσης (H₂-SEP και O₂-SEP, αντιστοίχως), όπου το ηλεκτρολυτικό μείγμα διαχωρίζεται από τα αέρια και επιστρέφει στην ηλεκτρολυτική δεξαμενή με χρήση αντλιών επανακυκλοφορίας (PUMP-R1 για το κύκλωμα της καθόδου και PUMP-R2 για το κύκλωμα της ανόδου). Αμφότερες οι ανακυκλωθούσες ροές KOH (R-H₂-KOH και R-O₂-KOH) εισέρχονται στη συσκευή ανάμειξης (R-MIX) και έπειτα περνούν από τον εναλλάκτη θερμότητας (R-INLET), ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη πριν εισέλθει στην ηλεκτρολυτική δεξαμενή (STACK).

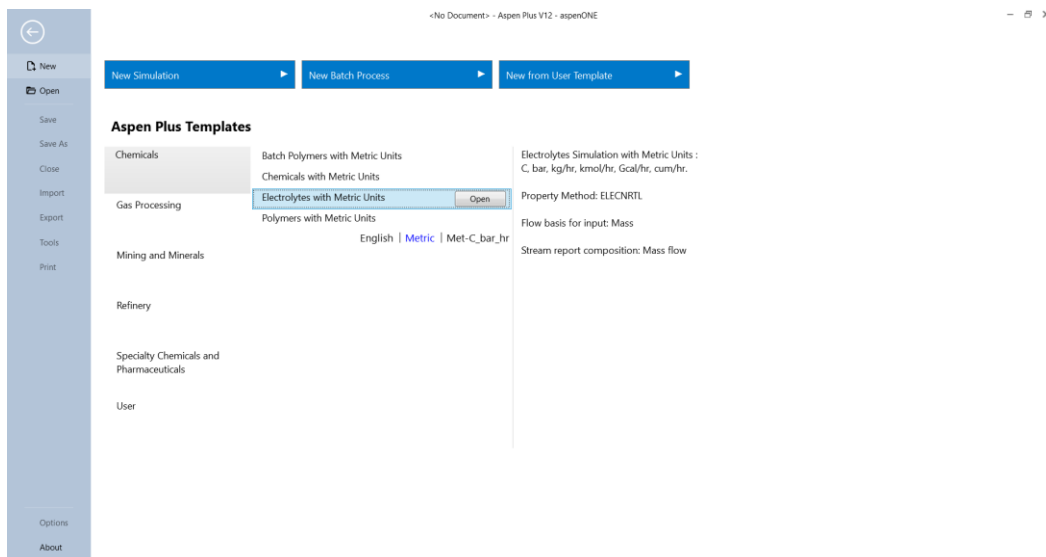
Το υδρογόνο και το οξυγόνο οδηγούνται από τις διφασικές δεξαμενές διαχωρισμού απευθείας στις παγίδες νερού (H₂-TRAP και O₂-TRAP, αντιστοίχως), ώστε να απομακρυνθεί η μεγαλύτερη ποσότητα συμπυκνώματος νερού. Έπειτα το υδρογόνο και το οξυγόνο που προκύπτουν συμπιέζονται μέσω πολυτροπικού συμπιεστή (H₂COMP και O₂COMP, αντιστοίχως) και η θερμότητα που τους παρέχεται από τη διαδικασία αυτή αφαιρείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας. Το οξυγόνο που προκύπτει οδηγείται απευθείας στην κυψέλη καυσίμου υπό κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (O₂FC), ενώ το υδρογόνο αφού αποθηκεύεται σε μία τυπική δεξαμενή, την οποία θα εξετάσουμε σε επόμενο κεφάλαιο, αποσυμπιέζεται μέσω μίας βαλβίδας και θερμαίνεται από έναν εναλλάκτη θερμότητας έως τις απαραίτητες συνθήκες για να το προμηθευθεί η κυψέλη καυσίμου (H₂FC).

Τέλος, απιονισμένο νερό με ηλεκτρική αγωγιμότητα 500 μS/m (H₂O-IN), συμπιέζεται με χρήση ισεντροπικής αντλίας, θερμαίνεται από έναν εναλλάκτη θερμότητας και εισέρχεται με τη βοήθεια της ίδιας αντλίας στη διφασική δεξαμενή διαχωρισμού οξυγόνου (O₂-SEP), ώστε να παρέχει στην ηλεκτρολυτική εγκατάσταση την απαραίτητη ποσότητα νερού που θα οδηγηθεί προς ηλεκτρόλυση (H₂O-FEED).

4.4.5 Αναλυτική Περιγραφή Διαδικασίας Μοντελοποίησης ASPEN Plus

Η επιτυχής μοντελοποίηση της διάταξης που φαίνεται στην Εικόνα 22 δεν θα μπορούσε να θεωρηθεί εύκολο εγχείρημα λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος και της αναγκαίας συνεργασίας όλων των εξαρτημάτων της ηλεκτρολυτικής εγκατάστασης με άριστο συγχρονισμό. Για το λόγο αυτό και επίσης εξαιτίας της σπανιότητας επιστημονικά τεκμηριωμένου βιβλιογραφικού υλικού επί του θέματος αυτού, παρατίθενται μία σειρά εικόνων και επεξηγήσεων σχετικά με την δόμηση αυτής της διάταξης ηλεκτρόλυσης. Τα στοιχεία αυτά θα παρουσιαστούν σε μορφή κουκκίδων (bullet points), όπου θα περιγράφεται το εκάστοτε βήμα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και θα συνοδεύεται από μία εικόνα που θα λειτουργεί ως επικουρικό έρεισμα ως εξής:

- Αρχικά, η δημιουργία ενός νέου, κενού πρότζεκτ προϋποθέτει τον καθορισμό μονάδων, μοντέλου εκτέλεσης και χαρακτηριστικών παροχής και ροών. Ωστόσο, για τη διευκόλυνση του δημιουργού, το πρόγραμμα συνοδεύεται από ορισμένα πρότυπα που καλύπτουν ορισμένες σειρές προβλημάτων που χρήζουν μοντελοποίησης. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε το πρότυπο 'Electrolytes with Metric Units', όπως φαίνεται ακριβώς από κάτω.

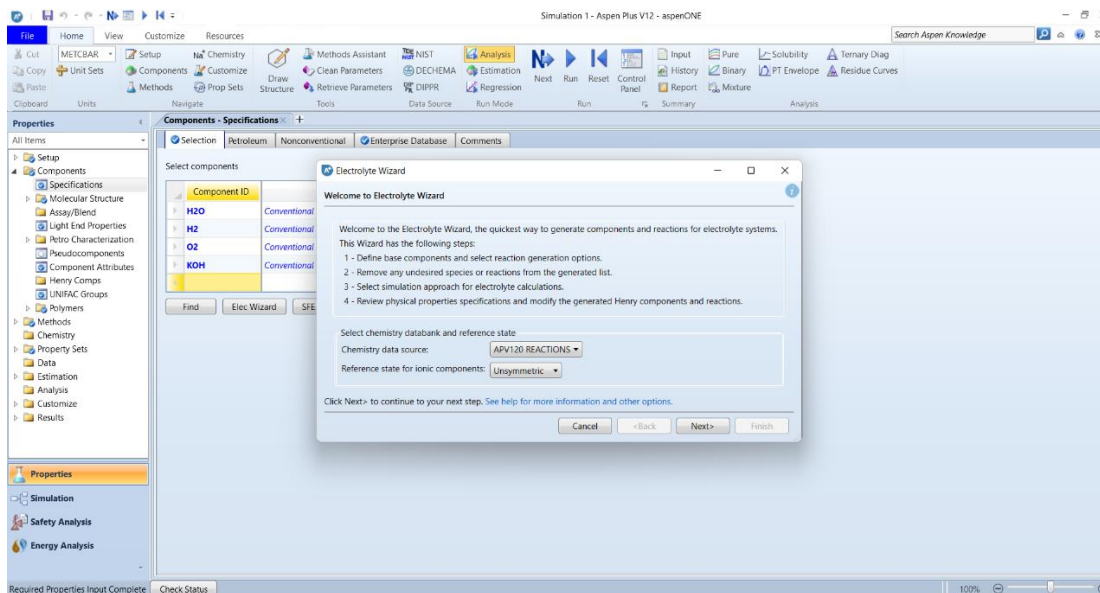


Εικόνα 23 Επιλογή προτύπου μοντελοποίησης

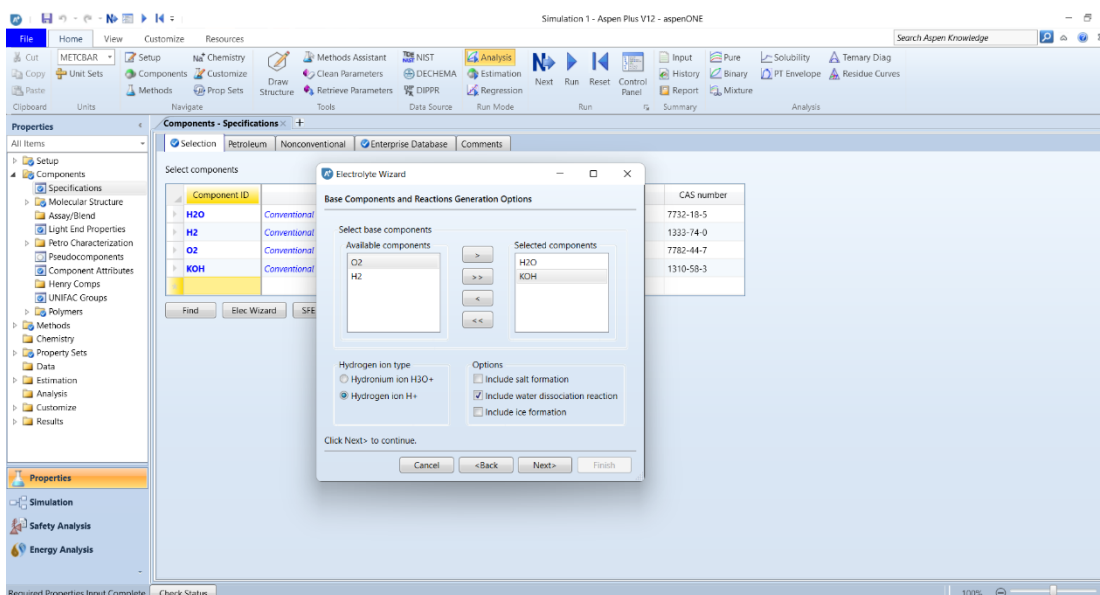
- Συνεχίζοντας, επιλέγονται τα συστατικά που θα αποτελούν το μοντέλο που θα εκτελεσθεί και τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα διαθέσιμα – αντιδρώντα (available – H₂O, KOH) και τα επιλεγμένα – προϊόντα (selected – H₂, O₂), με τη βοήθεια του 'Electrolyte Wizard' και των χημικών βιβλιοθηκών (APV120) που το συνοδεύουν. Επιπλέον, επιλέγοντας την κατάσταση αναφοράς των ιόντων ως 'Unsymmetric'

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

επειδή έτσι δεν απαιτείται είσοδος σταθερών ισορροπίας ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας για τις αντιδράσεις διαχωρισμού επειδή αυτές λαμβάνονται από την ελεύθερη ενέργεια Gibbs στην κατάσταση αναφοράς του εκάστοτε συστατικού [47].



Εικόνα 24 Καθορισμός χημικών βάσεων δεδομένων και κατάστασης αναφοράς ιόντων μοντέλου

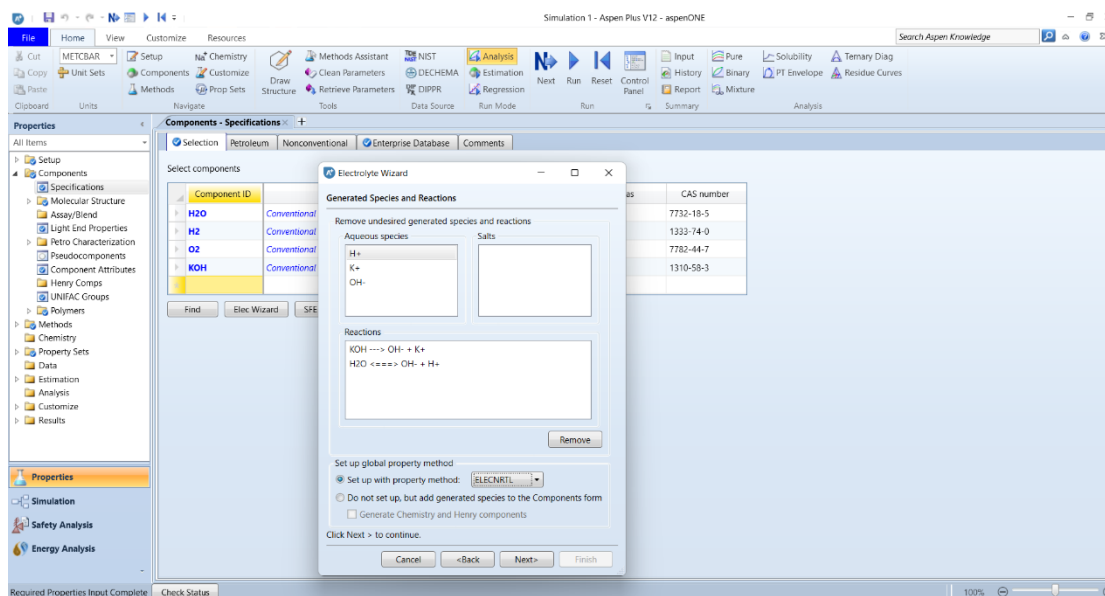


Εικόνα 25 Καθορισμός αντιδρώντων και προϊόντων αντιδράσεων

- Έπειτα, στο επόμενο παράθυρο του 'Electrolyte Wizard', ο χρήστης καλείται να αξιολογήσει την επιλογή των ιόντων από το πρόγραμμα καθώς και των διαθέσιμων αντιδράσεων που αντιστοιχούν σε αυτά. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα επιλογής της μεθόδου επίλυσης, με την 'ELECNRTL' να είναι επιλεγμένη αυτόματα. Γενικώς, οι μέθοδοι επίλυσης που αφορούν τους ηλεκτρολύτες είναι μακράν του ιδεατού λόγω

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

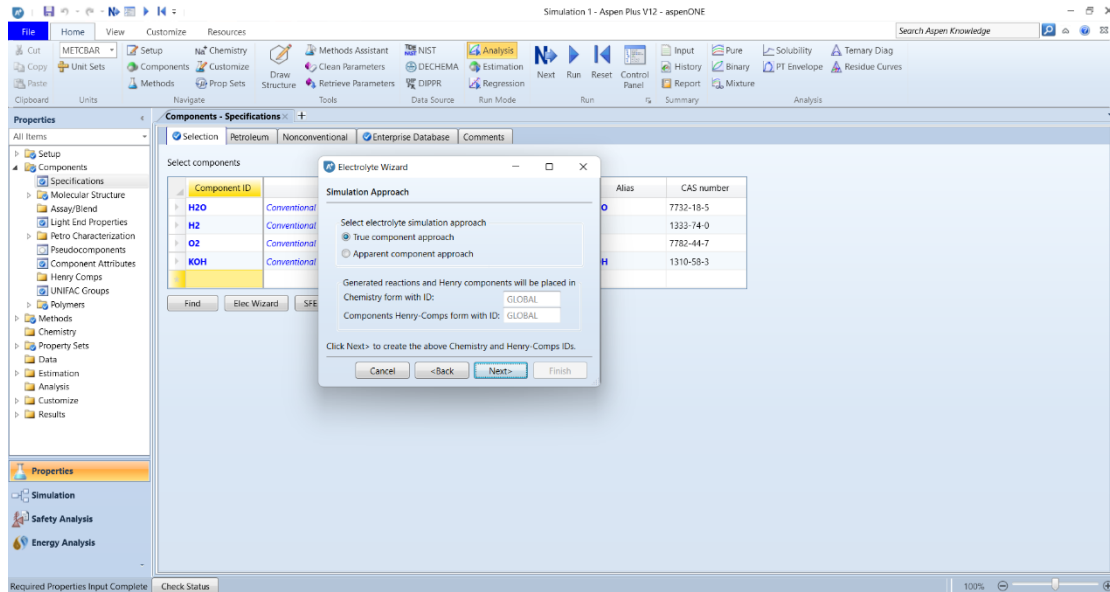
της παρουσίας φορτισμένων στοιχείων. Ωστόσο, η μέθοδος 'ELECRTL' είναι η πιο ευέλικτη χάρη στη δυνατότητα διαχείρισης χαμηλών αλλά και υψηλών συγκεντρώσεων συστημάτων με πολλαπλούς διαλύτες. Η μέθοδος, επίσης, υπακούει στο νόμο του Henry και οι σταθερές των συστατικών Henry (μη υγροποιημένων συστατικών, πχ O_2 , H_2) υποδεικνύουν τη διαλυτότητα των αερίων αυτών εντός υγρών, μέσω δεδομένων από τις βάσεις δεδομένων του προγράμματος [47].



Εικόνα 26 Επιλογή προτεινόμενων ιόντων, χημικών εξισώσεων και καθορισμός μεθόδου επίλυσης τους

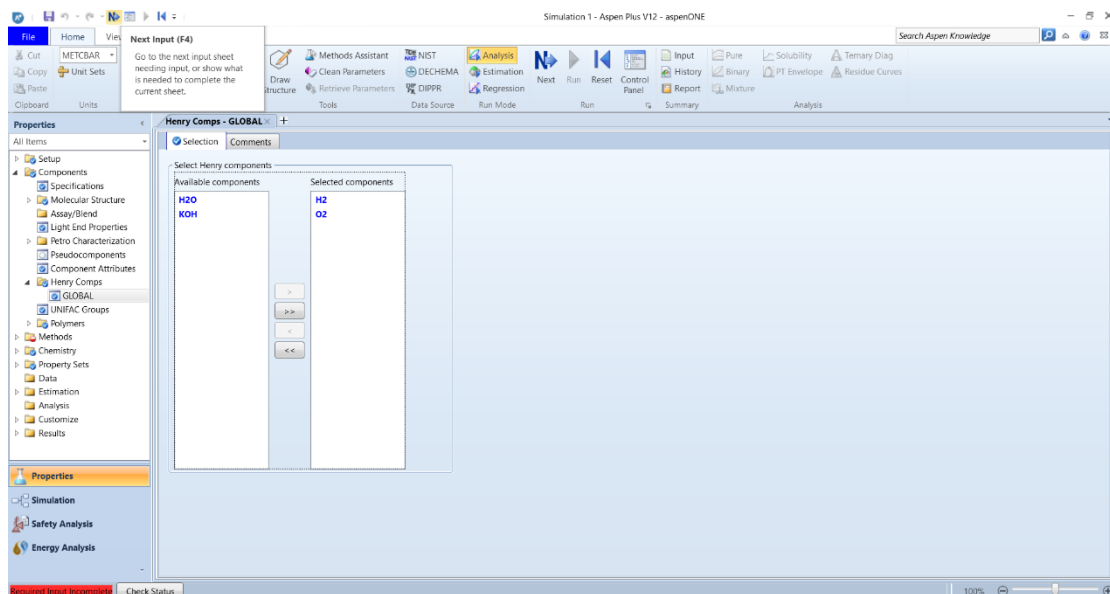
- Τώρα, στο επόμενο παράθυρο, επιλέγεται η προσέγγιση προσομοίωσης της ανάλυσης μέσω της επιλογής 'True component approach'. Ωστόσο, και η επιλογή της 'Apparent component approach' θα παράξει παρεμφερή αποτελέσματα. Η μόνη διαφορά των δύο είναι ότι η πρώτη αποτυπώνει αποτελέσματα σε μορφή ιόντων, αλάτων και μοριακών ειδών, παρουσιάζοντας έτσι τις λεπτομέρειες της χημείας του διαλύματος, ενώ η δεύτερη αποτυπώνει τα αποτελέσματα σύμφωνα μόνο με τα βασικά συστατικά, χωρίς λεπτομέρειες επί της χημείας της διεργασίας.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



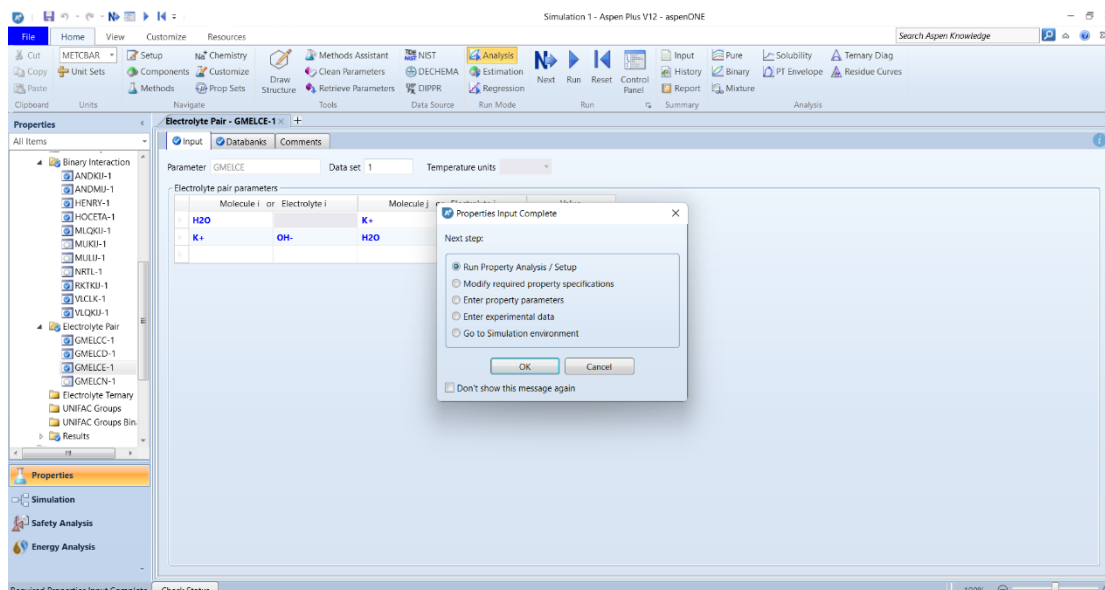
Εικόνα 27 Καθορισμός προσέγγισης ανάλυσης αντιδράσεων

- Ακολουθεί η επιλογή των συστατικών Henry, αντιδρώντων και προϊόντων, για τα οποία θα ανακτηθούν οι σταθερές. Προχωρώντας τη διαδικασία παρακάτω, δύναται ο χρήστης να «τρέξει» το κομμάτι της 'Property Analysis/Setup', με ένα μήνυμα ενημέρωσης ότι οι σταθερές Henry ανακτώνται για το εκάστοτε συστατικό από τις βάσεις δεδομένων, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

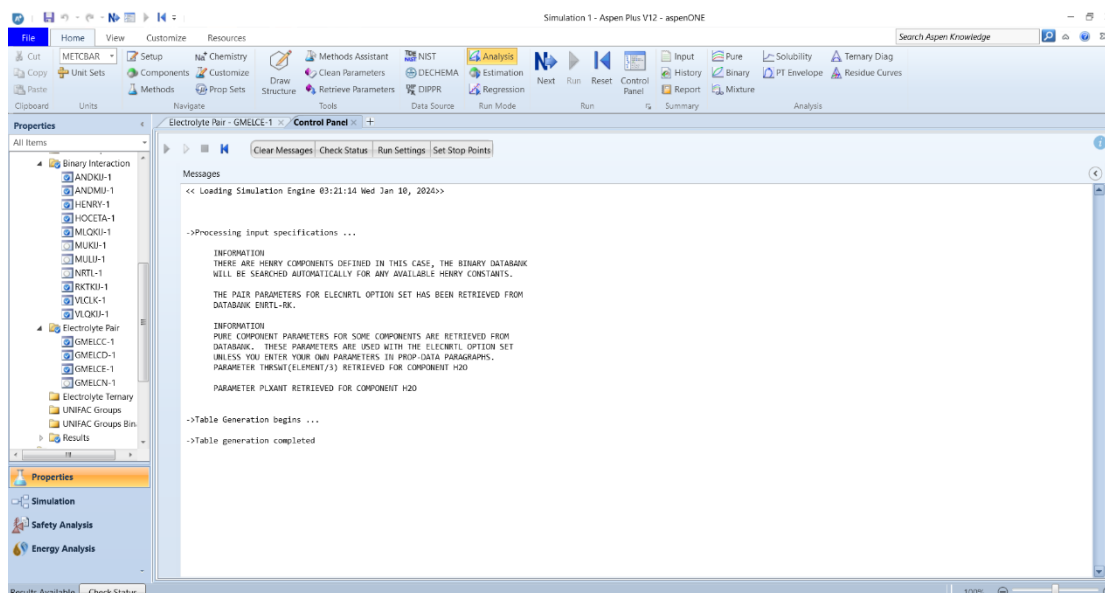


Εικόνα 28 Ανασκόπηση επιλεγμένων αντιδρώντων και προϊόντων αντιδράσεων

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



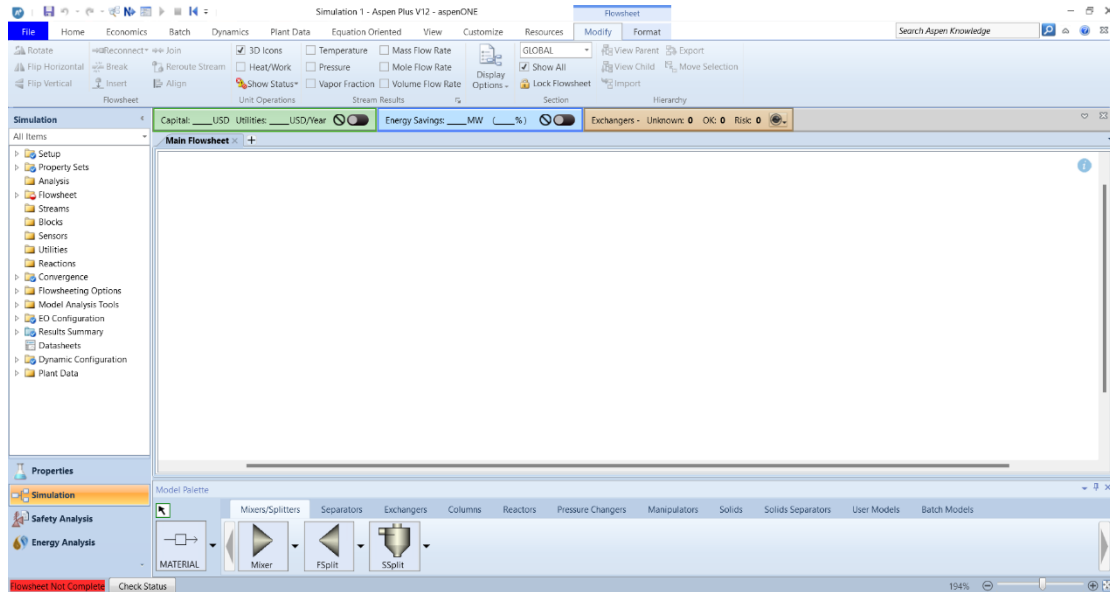
Εικόνα 29 Τελικό στάδιο εκκίνησης ανάλυσης και διαμόρφωσης βασικού προτύπου



Εικόνα 30 Ενημέρωση σχετικά με την προέλευση των στοιχείων όσον αφορά τα συστατικά Henry

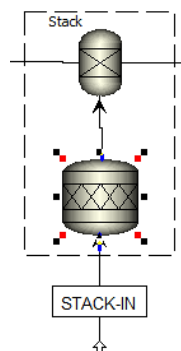
Τώρα, η παραπάνω διαδικασία ήταν απαραίτητη για να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά των συστατικών των αντιδράσεων που θα διεκπεραιωθούν εντός της ηλεκτρολυτικής εγκατάστασης. Προχωρώντας, η διαμόρφωση της διάταξης προσομοίωσης αποτελεί σημαντικό βήμα όσον αφορά τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μέσω του προγράμματος. Ακριβώς από κάτω, φαίνεται ο χώρος εργασίας όπου θα δομηθεί η διάταξη αυτή, με τη βιβλιοθήκη των προκαθορισμένων μοντέλων στο κάτω μέρος της εικόνας, τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν το μοντέλο στην αριστερή μεριά και τις υπόλοιπες δυνατότητες του προγράμματος να φαίνονται στο πάνω μέρος.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 31 Αρχικό παράθυρο εργασίας (flowsheet) δόμησης μοντέλου προσομοίωσης

Τώρα, το σημαντικότερο κομμάτι της εγκατάστασης που αναλύεται είναι η ροή εισόδου και η ηλεκτρολυτική βαθμίδα, γνωστή και ως «στοίβα» (Stack) κελιών, η οποία απαρτίζεται από δύο μοντέλα που εμπεριέχονται στο πρόγραμμα (blocks): ένα στοιχειομετρικό αντιδραστήρα (RSTOIC) και ένα διαχωριστή (SEP). Ο στοιχειομετρικός αντιδραστήρας χρησιμοποιείται αντί των άλλων μοντέλων διότι είναι γνωστή η στοιχειομετρία των αντιδράσεων και δεν υπάρχει πληροφόρηση επί της κινητικής των αντιδράσεων και δεν είναι απαραίτητη. Από την άλλη, το είδος αυτό του διαχωριστή επιλέχθηκε για να λειτουργήσει ως 'black box', αφού οι λεπτομέρειες επί του διαχωρισμού δεν είναι ιδιαίτερης σημασίας και άρα, μειώνεται κατά πολύ ο χρόνος των υπολογισμών. Τα βασικά αυτά μέρη του ηλεκτρολυτικού υποσυστήματος παρατίθενται ως εικόνα ακριβώς από κάτω.

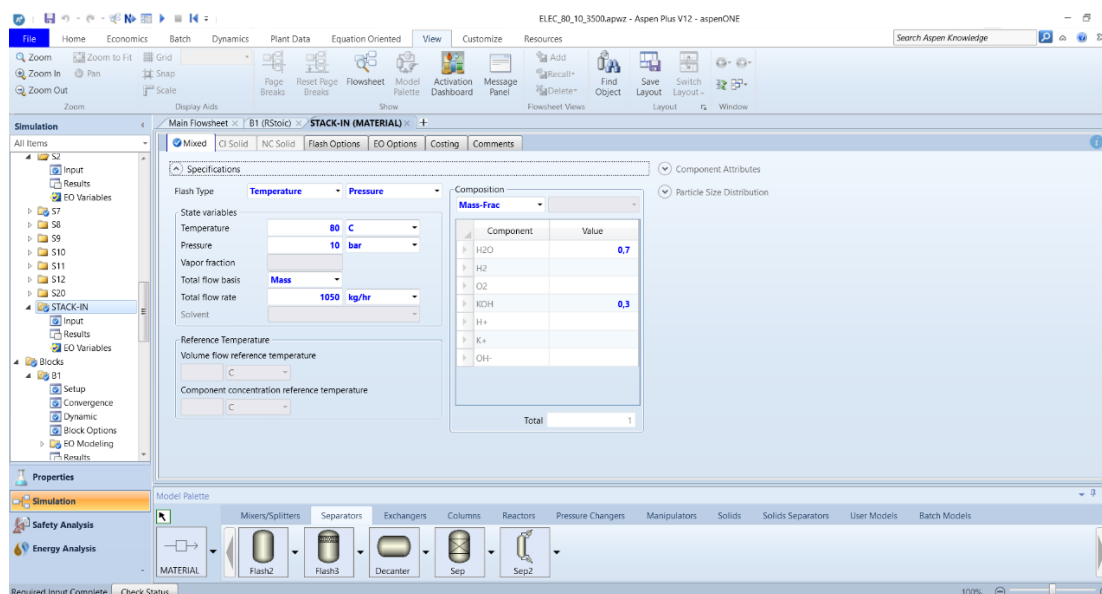


Εικόνα 32 Ηλεκτρολυτική βαθμίδα RSTOIC και SEP ροής εισόδου STACK-IN συστήματος

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Εν συνεχεία, για την πλέον αποτελεσματική λειτουργία της ηλεκτρολυτικής βαθμίδας είναι απαραίτητος ο καθορισμός των συνθηκών και χαρακτηριστικών λειτουργίας αυτής αλλά και όλων των εξαρτημάτων της εγκατάστασης, των οποίων η ανάλυση θα ακολουθήσει:

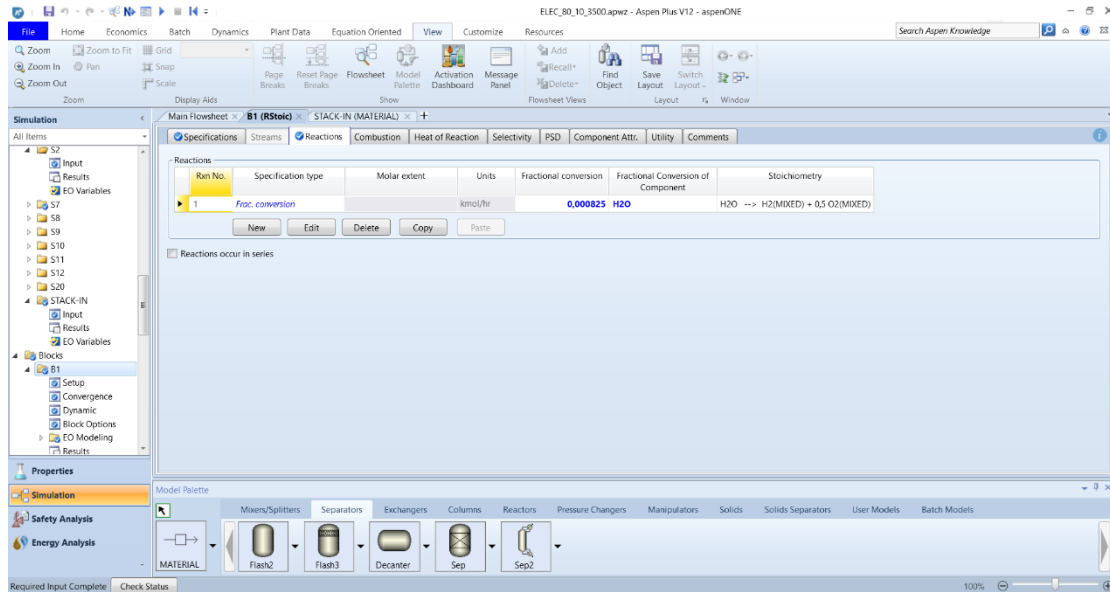
- Παρατίθενται επομένως οι παράμετροι της θερμοκρασίας και τη πίεσης εισόδου της ροής (STACK-IN) του υδατικού διαλύματος KOH 30% wt, καθώς και ο συνολικός ρυθμός παροχής αυτού.



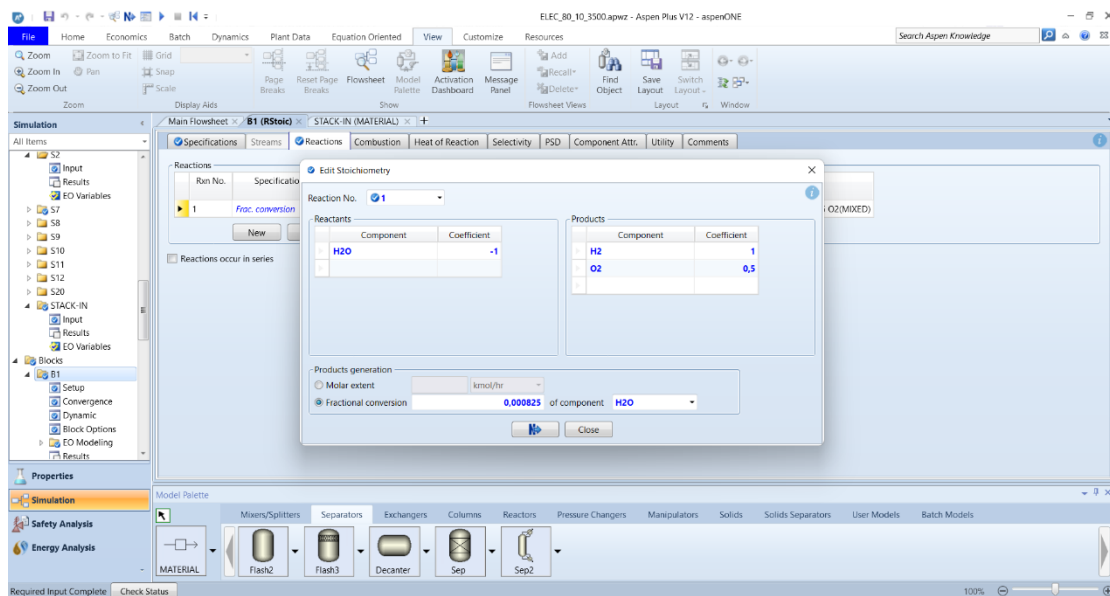
Εικόνα 33 Καθορισμένες συνθήκες ροής εισόδου STACK-IN

- Εν συνεχεία, καθορίζονται η πίεση λειτουργίας, η ισχύς εισόδου (Duty) του αντιδραστήρα καθώς και το κλάσμα αντίδρασης του νερού κατά την ηλεκτρόλυση που ορίστηκε 0,0825%, βασισμένο στη μαθηματική προσέγγιση του ηλεκτρολύτη και σύμφωνα πάντα με το ρυθμό παροχής του διαλύματος που ορίστηκε 1050 kg/h και με τη στοιχειομετρία της αντίδρασης ηλεκτρόλυσης.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

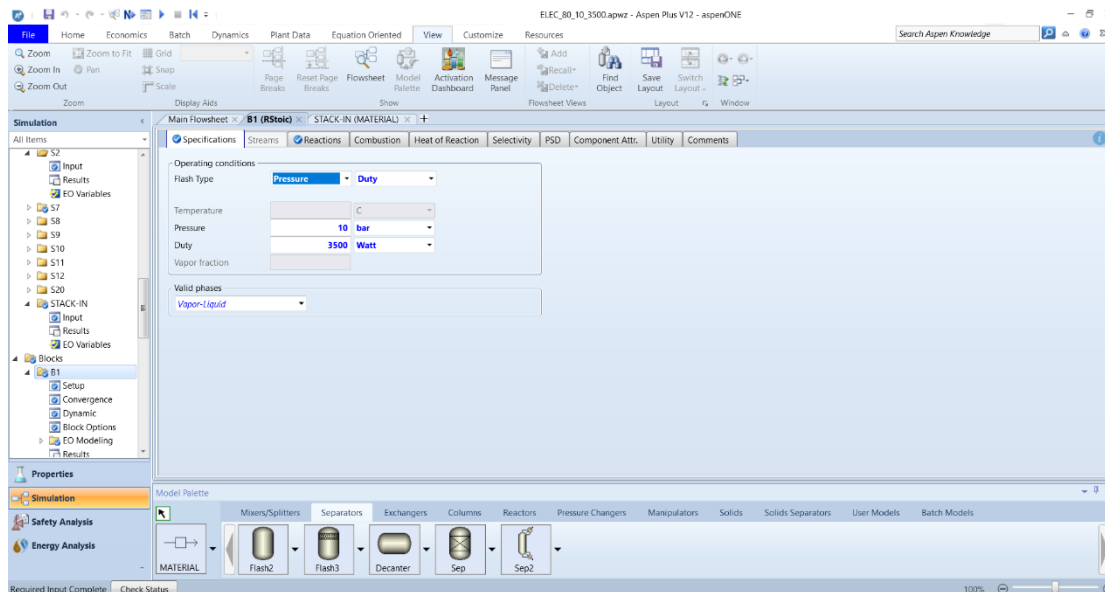


Εικόνα 34 Λόγος αντιδρώντος νερού κατά την ηλεκτρόλυση



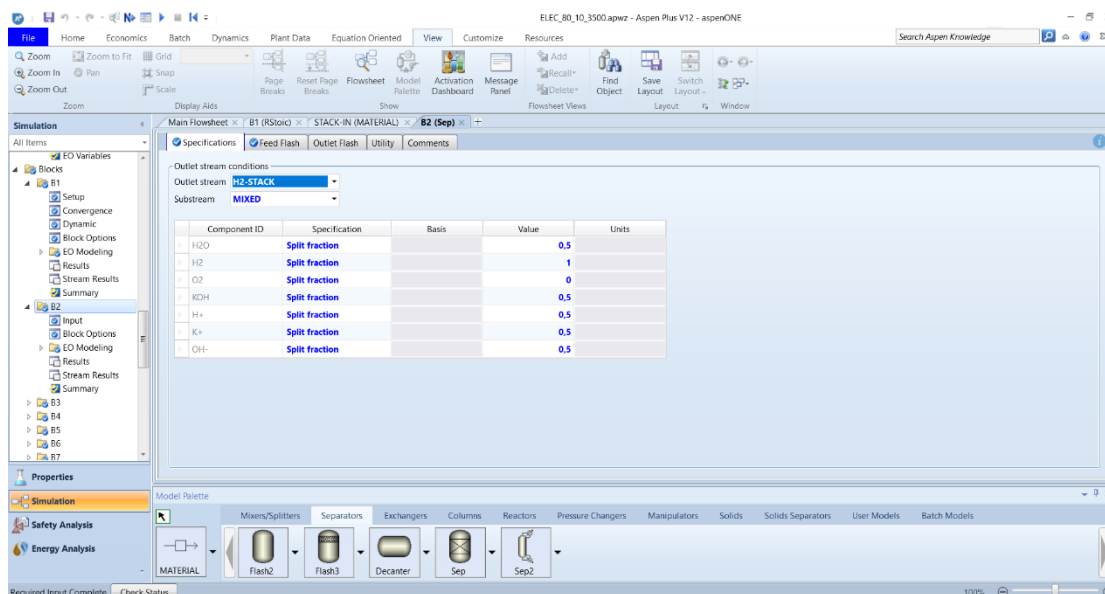
Εικόνα 35 Καθορισμός λόγου αντιδρώντος νερού

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



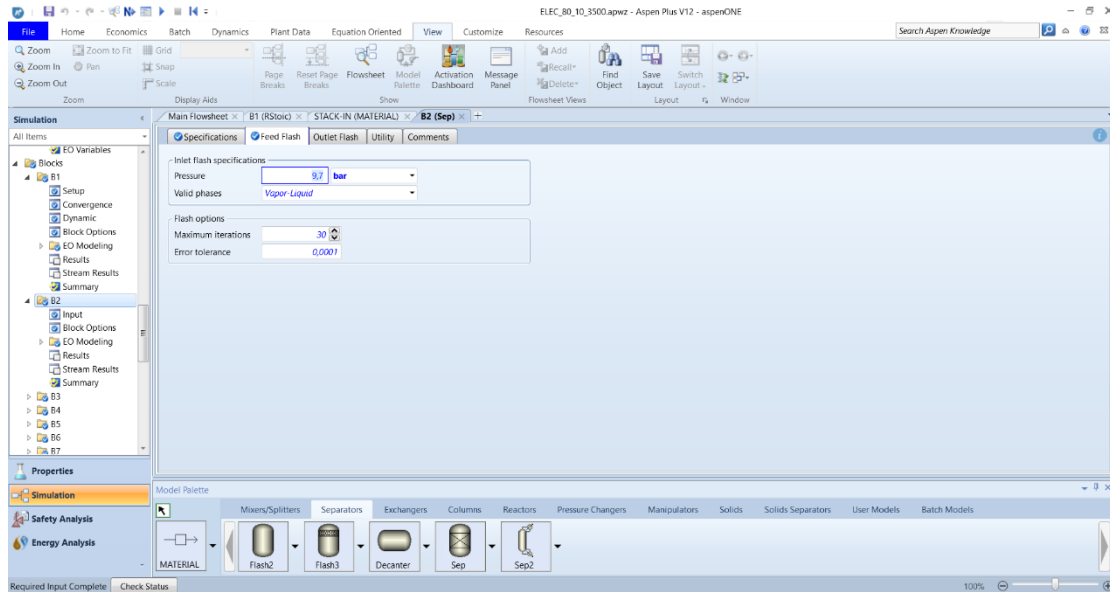
Εικόνα 36 Καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας βασικού αντιδραστήρα RSTOIC

- Έπειτα, το μοντέλο του διαχωριστή αυτοπροσδιορίστηκε σύμφωνα με τη στοιχειομετρία του διαχωρισμού σε δύο ροές. Επιπλέον, σύμφωνα με την πίεση λειτουργίας που ορίστηκε για το στοιχειομετρικό αντιδραστήρα, η πίεση των δύο ροών εξόδου ορίστηκε να παρουσιάζουν μία πτώση πίεσης από 10 bar σε 9,7 bar ώστε να ανταποκρίνεται σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες.



Εικόνα 37 Στοιχειομετρία ροής εξόδου H2-STACK από το βασικό διαχωριστή SEP

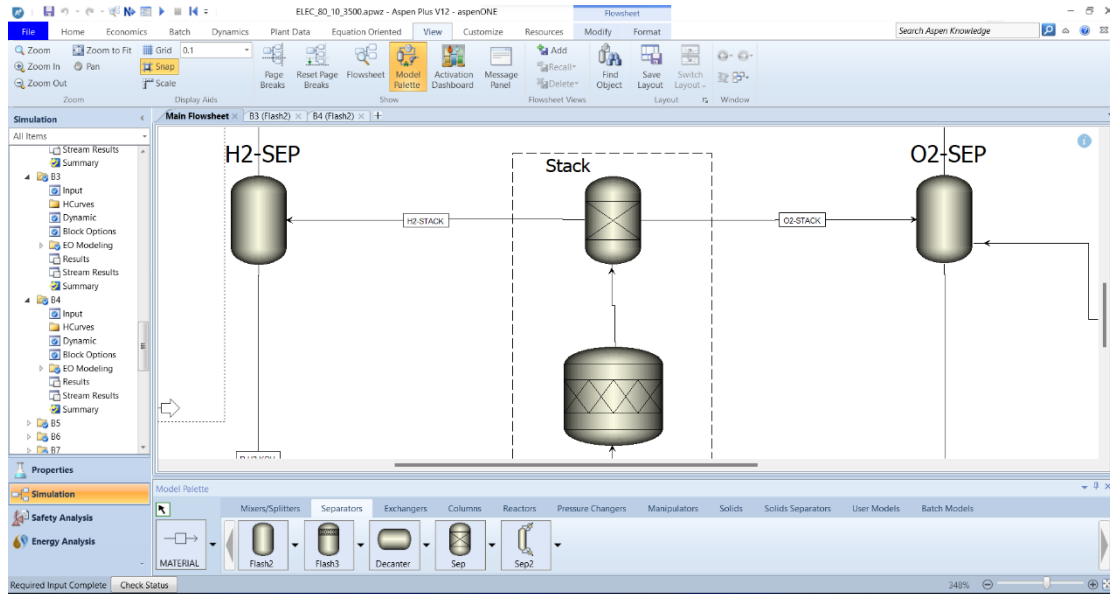
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



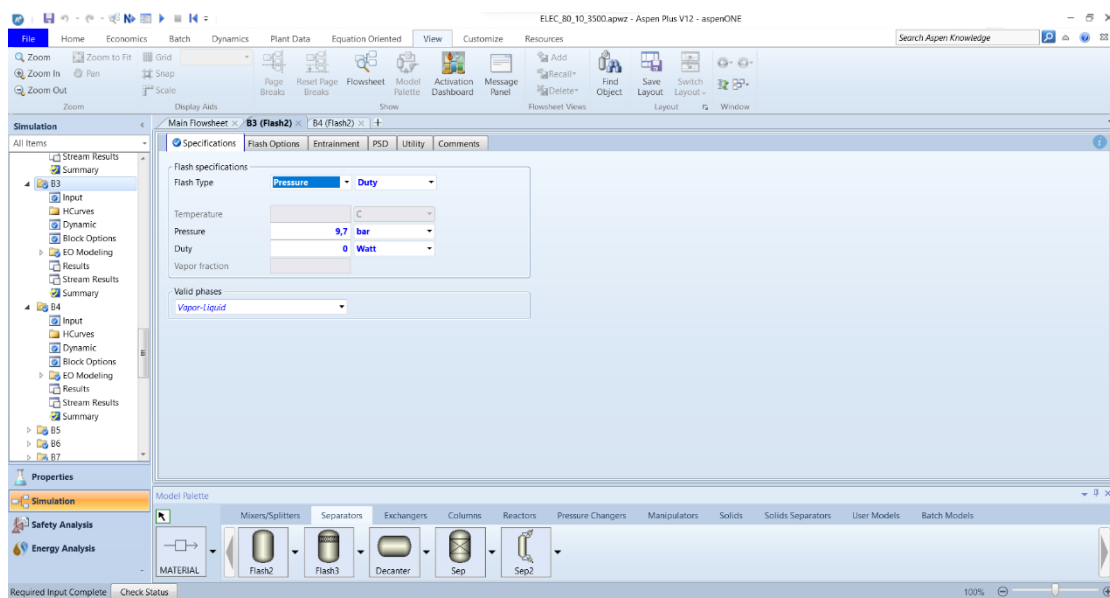
Εικόνα 38 Καθορισμός συνθηκών εξόδου αμφοτέρων των ροών από το βασικό διαχωριστή της βαθμίδας

- Σε αμέσως επόμενο στάδιο, οι δύο αυτές διαχωρισμένες ροές H₂-STACK και O₂-STACK πρέπει να υποστούν περαιτέρω διαχωρισμό και απομάκρυνση του υδατικού διαλύματος KOH και άρα, αύξηση της καθαρότητας της ροής υδρογόνου και οξυγόνου, αντιστοίχως.
- Αυτή τη φορά, το είδος του διαχωριστή που επιλέχθηκε είναι ο τύπος 'Flash2' από την παλέτα μοντέλων του προγράμματος διότι διαχωρίζει το εισερχόμενο μείγμα σε αέρια (υδρογόνο) και υγρή (υδατικό διάλυμα KOH) ροή χρησιμοποιώντας μία ενδεδειγμένη διαδικασία ώστε να επιτευχθεί ισορροπία. Ακόμη, η πίεση της εισερχόμενης ροής διατηρείται για αμφοτέρες τις ροές εξόδου και θεωρείται ότι η απαιτούμενη ισχύς εισόδου αυτής της διεργασίας είναι μηδενική.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

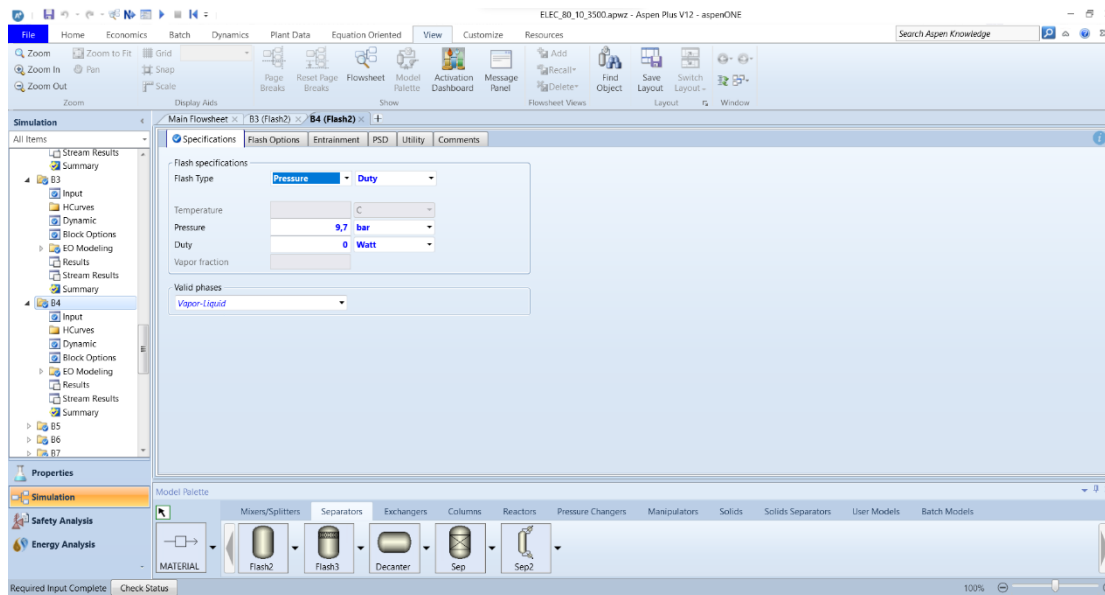


Εικόνα 39 Απεικόνιση βασικής ηλεκτρολυτικής βαθμίδας και επακόλουθων διαχωριστών H2-SEP και O2-SEP



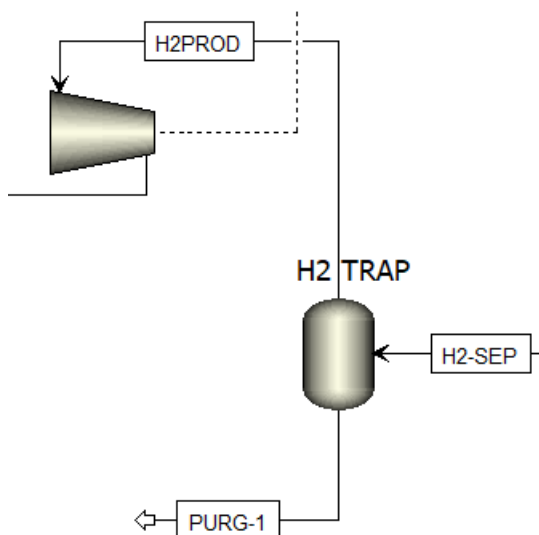
Εικόνα 40 Καθορισμός συνθηκών λειτουργίας H2-SEP και ροών εξόδου

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



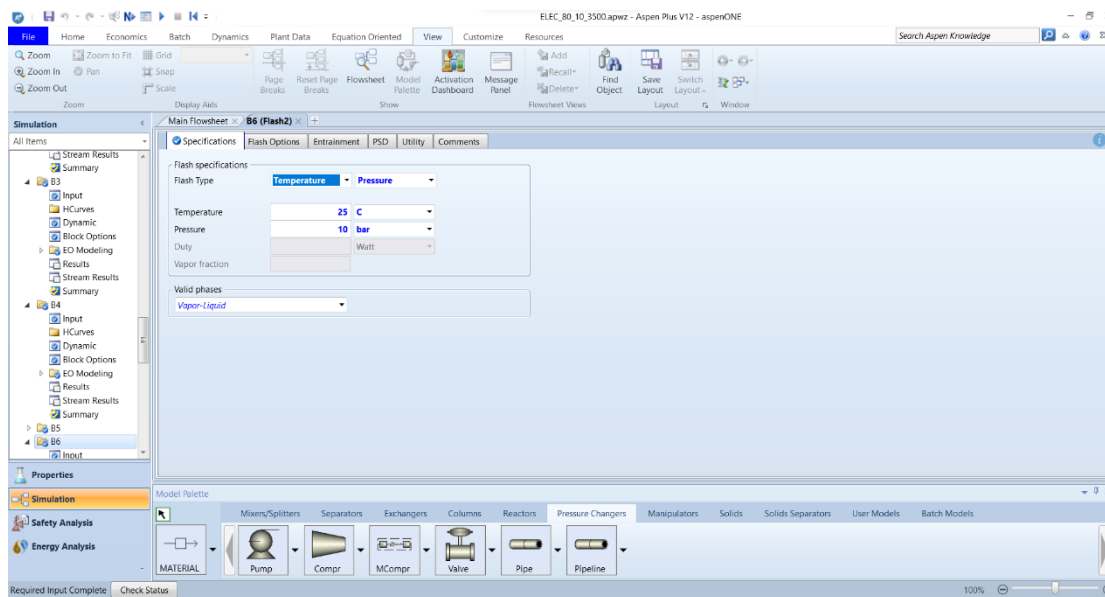
Εικόνα 41 Καθορισμός συνθηκών λειτουργίας O2-SEP και ρών εξόδου

- Η ροή του υδρογόνου, έπειτα από το διαχωρισμό της μέσω του H2-SEP, οδηγείται στο δεύτερο διαχωριστή H2-TRAP τύπου 'Flash2' που διαδραματίζει τον ίδιο ρόλο διαχωρισμού του μεγαλύτερου υπολειπόμενου ποσοστού «ακαθαρσιών» και έτσι, οι ακαθαρσίες ακολουθούν τη ροή PURG-1 και η καθαρή πλέον ροή υδρογόνου οδηγείται, υπό μειωμένη θερμοκρασία 25 °C, για συμπίεση στα 16 bar από ένα πολυτροπικό συμπιεστή που ακολουθεί τη μέθοδο ASME η οποία είναι πολύ ενδεδειγμένη και ανταποκρίνεται στην πραγματική λειτουργία μίας συσκευής αλλαγής πίεσης.

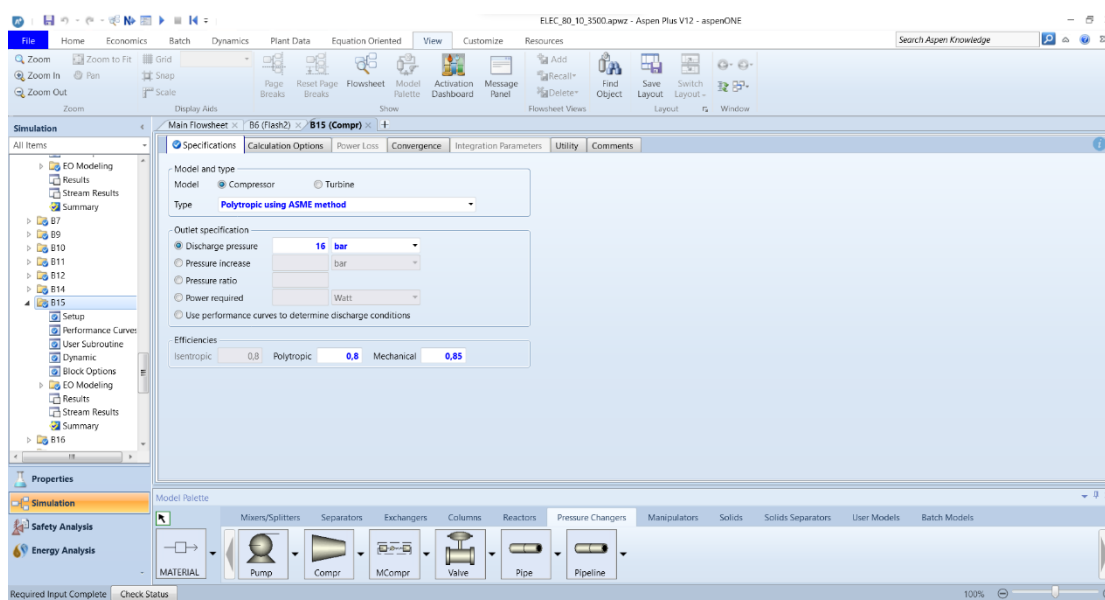


Εικόνα 42 Τελική "παγίδα" υδρογόνου H2-TRAP και επακόλουθη συμπίεση ροής υδρογόνου από πολυτροπικό συμπιεστή

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



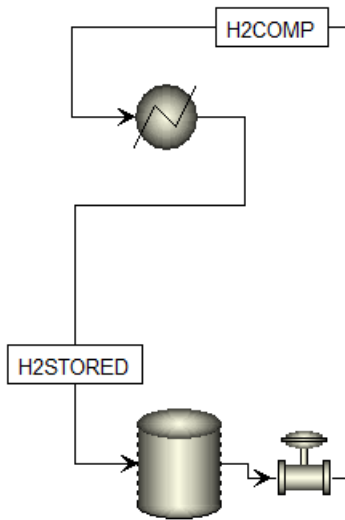
Εικόνα 43 Καθορισμός συνθηκών εξόδου ροής υδρογόνου από H2-TRAP



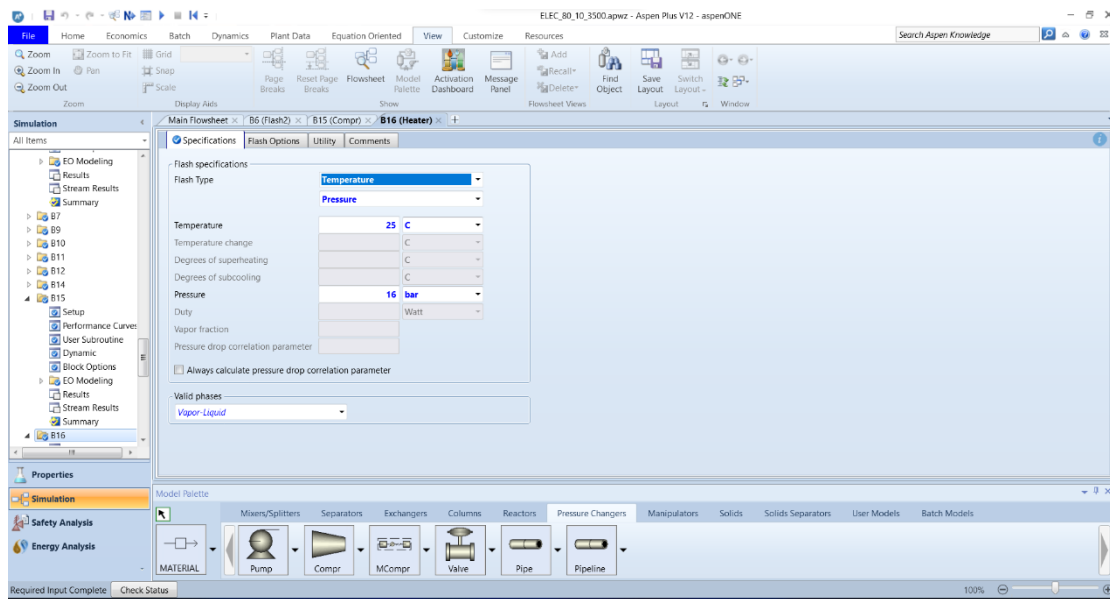
Εικόνα 44 Καθορισμός χαρακτηριστικών συμπίεση και πίεση ροής εξόδου

- Ακολούθως, η συμπίεση ροή υδρογόνου H2COMP οδηγείται σε εναλλάκτη για την απαγωγή της θερμότητας, που προέκυψε από τη συμπίεση της, έως ότου μειωθεί στους 25 °C ξανά, χωρίς να έχει σημασία που καταλήγει αυτή η αποβαλλόμενη θερμότητα, ώστε να αποθηκευτεί σε μία δεξαμενή και έπειτα, όταν απαιτηθεί (δεν καθορίζεται στο πρόγραμμα η απαίτηση αλλά υποδεικνύει τη λειτουργία μίας ρεαλιστικής δομής), να εξέλθει αυτής και να αποσυμπίεστεί, μέσω μίας βαλβίδας η οποία λειτουργεί αδιαβατικά για καθορισμένη πίεση εξόδου, έως τα 5 bar.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

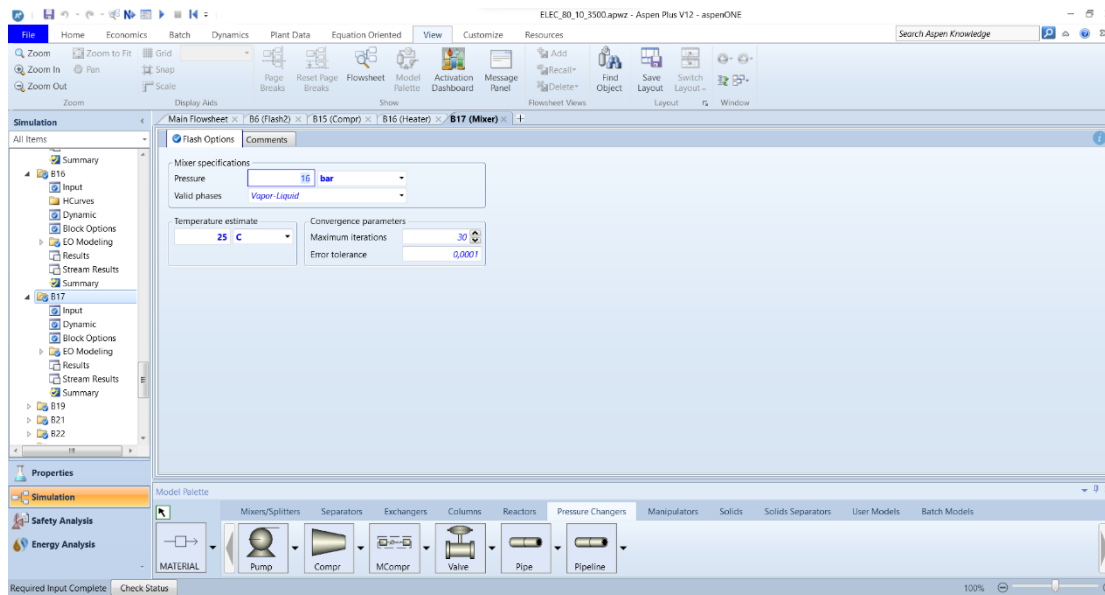


Εικόνα 45 Επακόλουθη αποβολή θερμότητας, αποθήκευση και αποσυμπίεση ροής υδρογόνου (προετοιμασία προς τροφοδότηση στην κυβέλη καυσίμου)

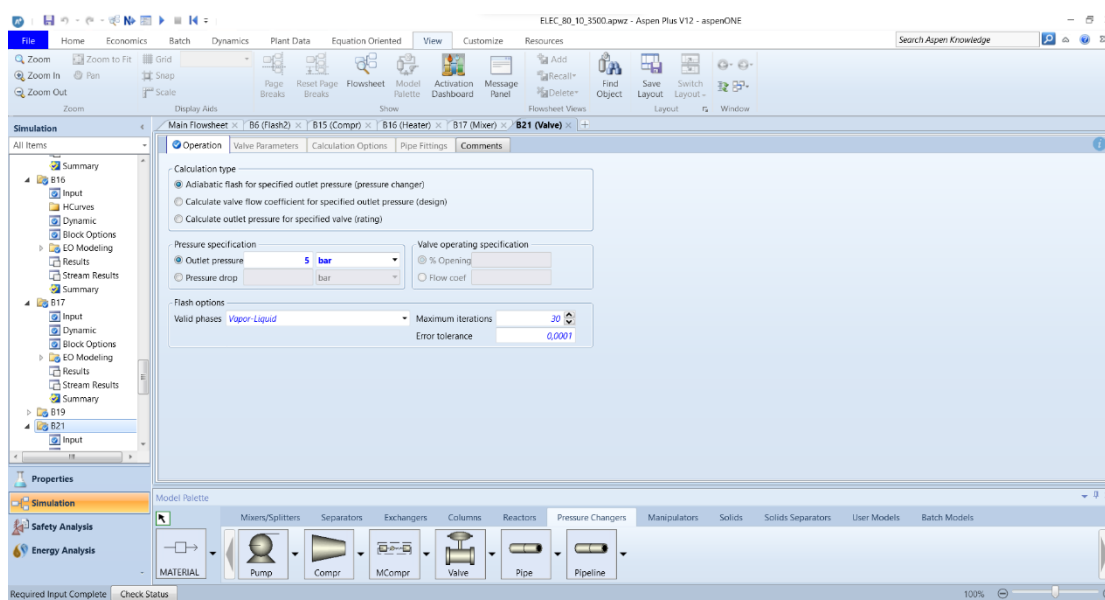


Εικόνα 46 Καθορισμός συνθηκών εξόδου ροής υδρογόνου από εναλλάκτη

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



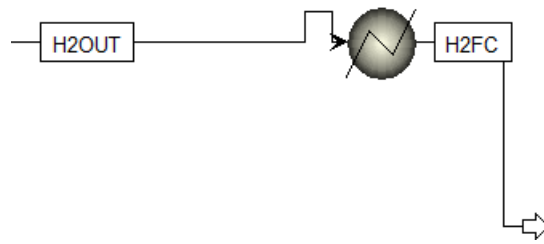
Εικόνα 47 Καθορισμός συνθηκών αποθήκευσης υδρογόνου



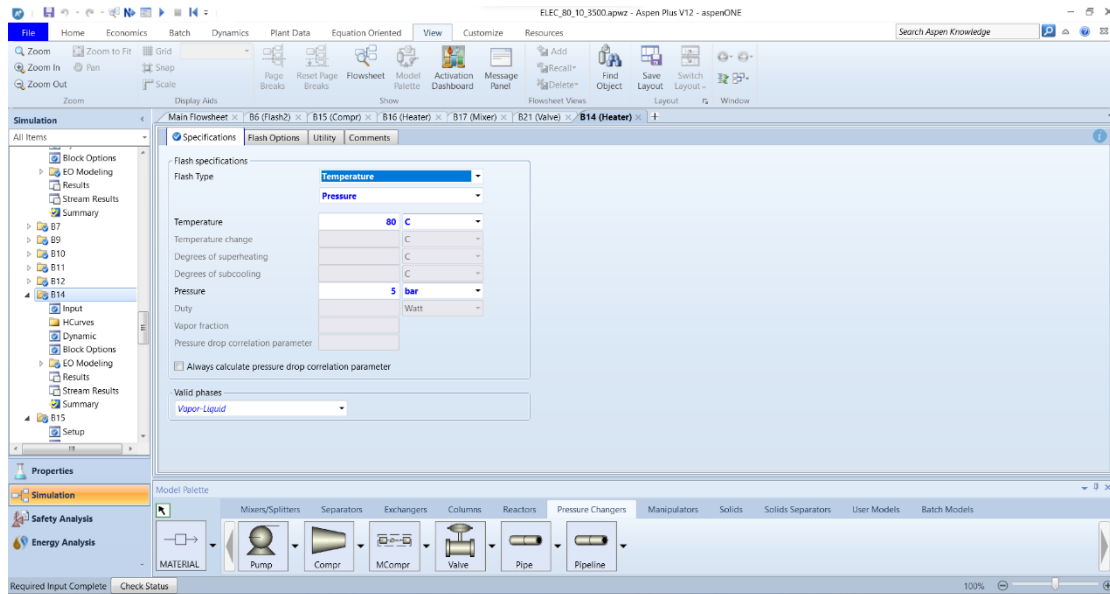
Εικόνα 48 Καθορισμός πίεσης εξόδου υδρογόνου από βαλβίδα, μέσω αδιαβατικής διεργασίας

- Όταν η ροή υδρογόνου εξέλθει λοιπόν από τη βαλβίδα αποσυμπίεσης, χρειάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας της ώστε να καταλήξει στην κυψέλη καυσίμου έτοιμη προς κατανάλωση. Για αυτόν το λόγο, παρεμβάλλεται μεταξύ H₂O₂ και H₂FC εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος αυξάνει τη θερμοκρασία στους 80 °C, χωρίς να έχει σημασία από που προήλθε αυτή προσδιδόμενη θερμότητα, με την πίεση να παραμένει στα 5 bar.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

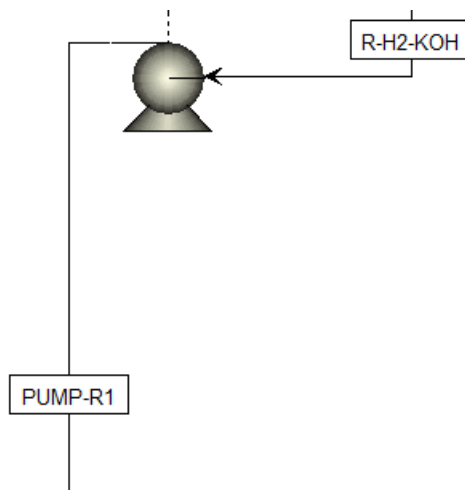


Εικόνα 49 Αναθέρμανση ρεύματος υδρογόνου από εναλλάκτη και τελική κατάληξη του στην κυψέλη καυσίμου

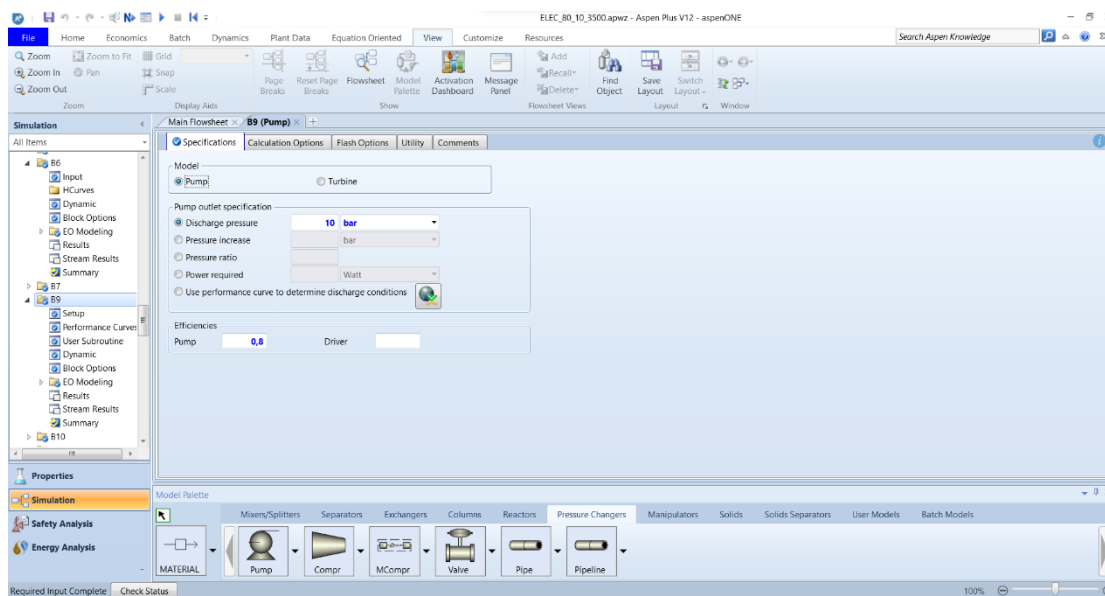


Εικόνα 50 Καθορισμός χαρακτηριστικών ροής εξόδου του εναλλάκτη προς την κυψέλη καυσίμου

- Τώρα, το υδατικό διάλυμα KOH που προέκυψε από τον πρώτο διαχωρισμό, με τη βοήθεια του διαχωριστή H2-SEP, θα οδηγηθεί προς ανακυκλοφορία και άρα, μέσω ορισμένων διεργασιών, θα καταλήξει στην είσοδο του συστήματος ως η ροή STACK-IN. Για να γίνει αυτό, μία αντλία παρεμβάλλεται ώστε να επαναφέρει την πίεση σε 10 bar, προφανώς καταναλώνοντας έργο κατά τη διαδικασία αυτή.



Εικόνα 51 Επαναφορά πίεσης της ροής ανακυκλοφορίας R-H2-KOH από το H2-SEP, με χρήση αντλίας

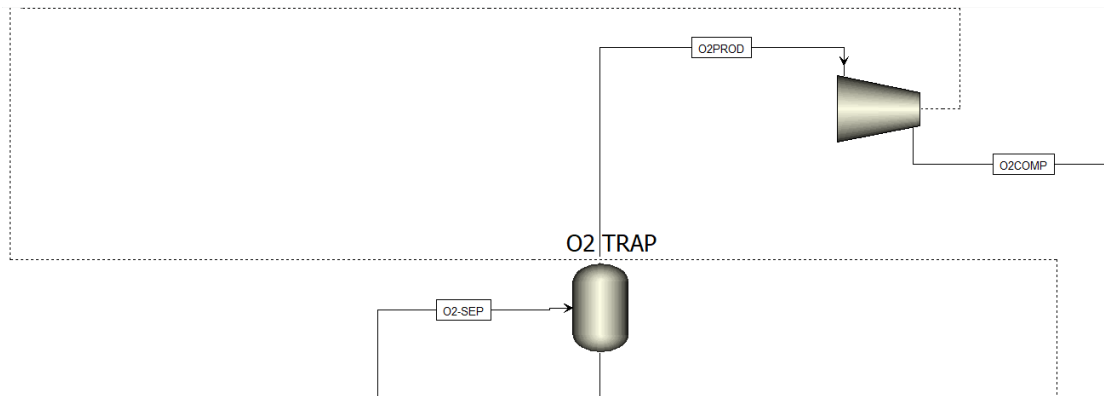


Εικόνα 52 Καθορισμός πίεσης ροής εξόδου και χαρακτηριστικών αντλίας

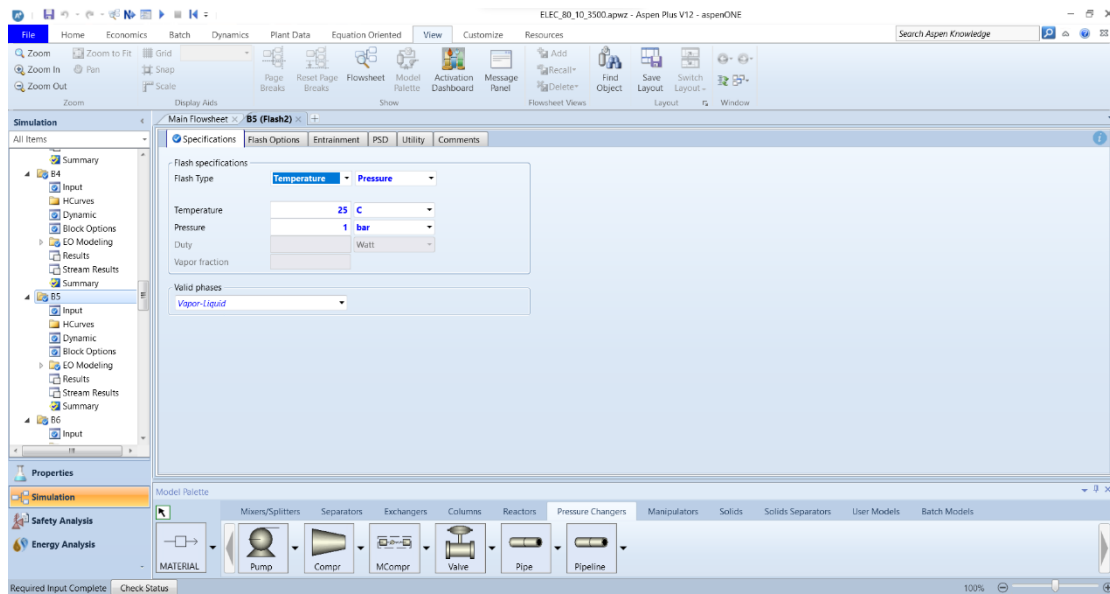
- Από την άλλη μεριά του αρχικού διαχωριστή της ηλεκτρολυτικής βαθμίδας, η ροή οξυγόνου O2-STACK καταλήγει στο διαχωριστή O2-SEP τύπου 'Flash2'. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και στη ροή υδρογόνου και άρα, δεν απαιτείται είσοδος ισχύος για την πραγματοποίηση αυτής της διεργασίας και η πίεση παραμένει σταθερή, με ταυτόχρονη αποβολή των αρχικών «ακαθαρσιών» και του διαλύματος που δεν αντέδρασε και οδηγείται προς ανακυκλοφορία, υπό τη μορφή της ροής R-O2-KOH και με καθοδήγηση του ρεύματος υδρογόνου O2-SEP προς τη δεύτερη «παγίδα» (διαχωριστή) O2-TRAP, ώστε να αποβληθούν οι υπολειπόμενες «ακαθαρσίες» ως η ροή PURG-2. Έπειτα, το καθαρό οξυγόνο, υπό θερμοκρασία και πίεση 25 °C και 1 bar, οδηγείται σε πολυτροπικό συμπιεστή, όπως και το υδρογόνο,

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

που αυξάνει την πίεση έως τα 5 bar η οποία έχει ορισθεί ως η πίεση λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου.

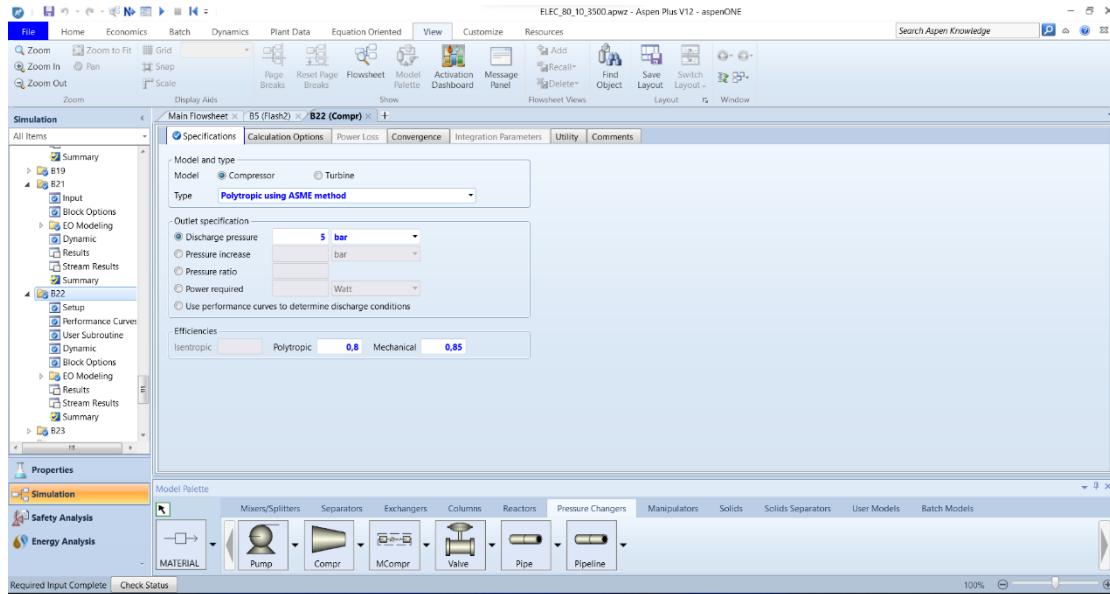


Εικόνα 53 Σύστημα "παγίδας" οξυγόνου O2-TRAP και συμπίεση ροής οξυγόνου, με χρήση πολυτροπικού συμπιεστή (προετοιμασία προς τροφοδότηση της στην κυψέλη καυσίμου)



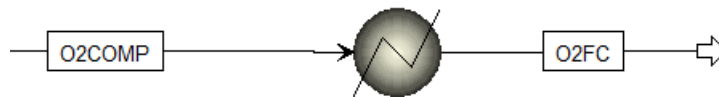
Εικόνα 54 Καθορισμός συνθηκών ροής εξόδου "παγίδας" O2-TRAP

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



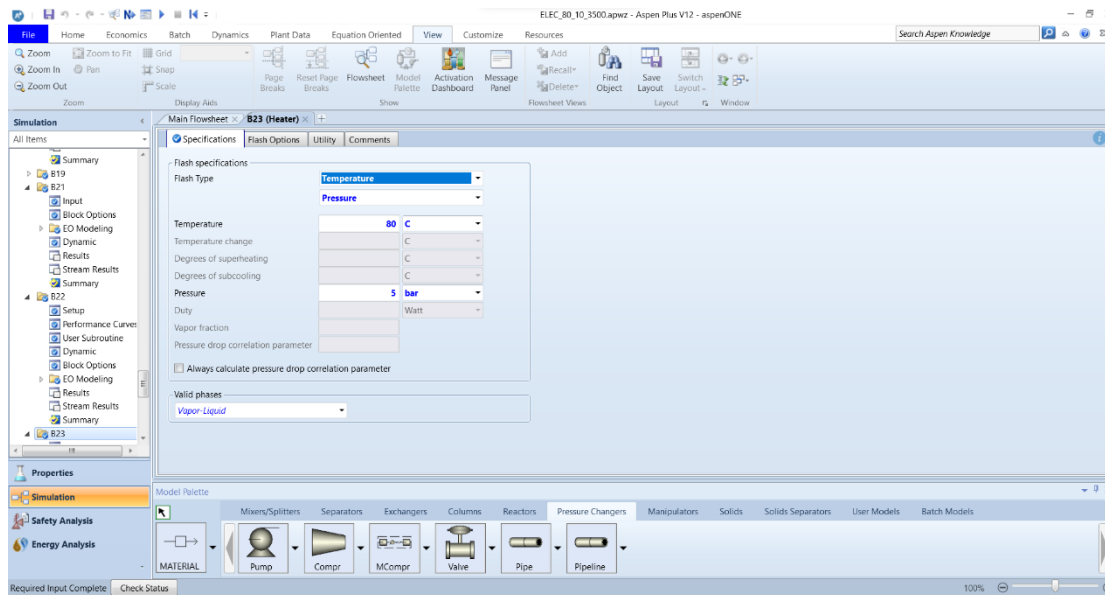
Εικόνα 55 Καθορισμός συνθηκών λειτουργίας και χαρακτηριστικών πίεσης ροής εξόδου συμπίεστη

- Τελικό στάδιο για τη ροή οξυγόνου αποτελεί η αποβολή θερμότητας που προκύπτει από τη συμπίεση της παροχής μάζας που προέκυψε και αυτό επιτυγχάνεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος ψυχραίνει τη ροή έως τους 80 °C. Η αποβαλλόμενη θερμότητα του ρεύματος δεν εκμεταλλεύεται κάπου στο σύστημα και δεν θεωρείται σημασίας η κατάληξη της.



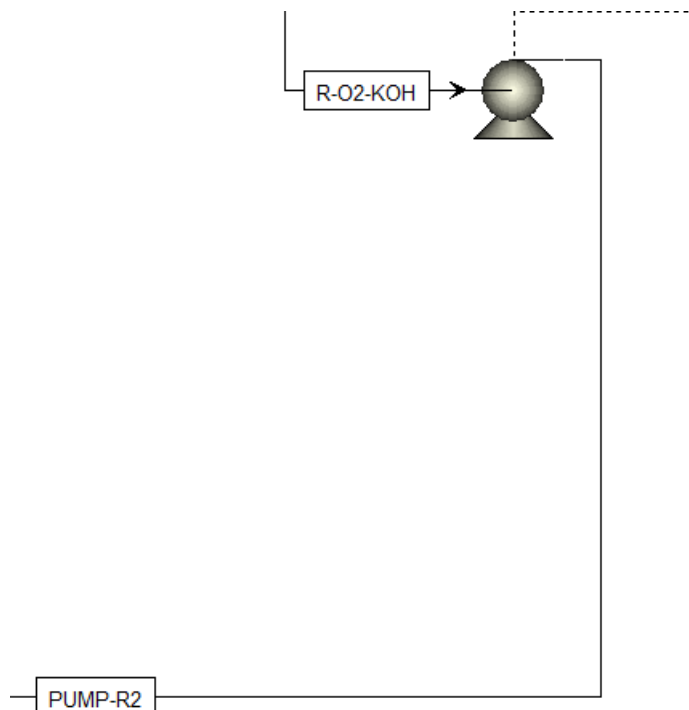
Εικόνα 56 Καθοδήγηση συμπίεσμνης ροής οξυγόνου προς εναλλάκτη για αποβολή περιττής θερμότητας και τελικό στάδιο τροφοδότησης της κυψέλης καυσίμου

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

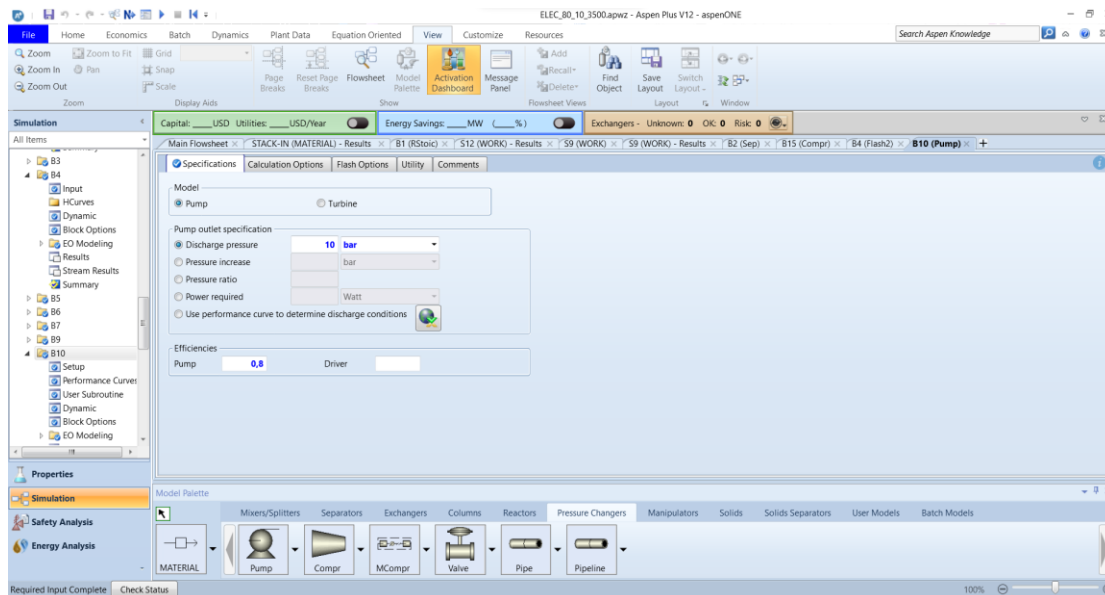


Εικόνα 57 Καθορισμός τελικής θερμοκρασίας και πίεσης ροής οξυγόνου κατά την έξοδο από τον εναλλάκτη

- Όπως ειπώθηκε και πιο πάνω, το εναπομείναν υδατικό διάλυμα KOH που δεν αντέδρασε οδηγείται προς ανακυκλοφορία με τη χρήση μία αντλίας η οποία επαναφέρει την πίεση του σε 10 bar, με κατανάλωση έργου, δηλαδή στην πίεση λειτουργίας της αρχική ηλεκτρολυτικής «στοίβας».

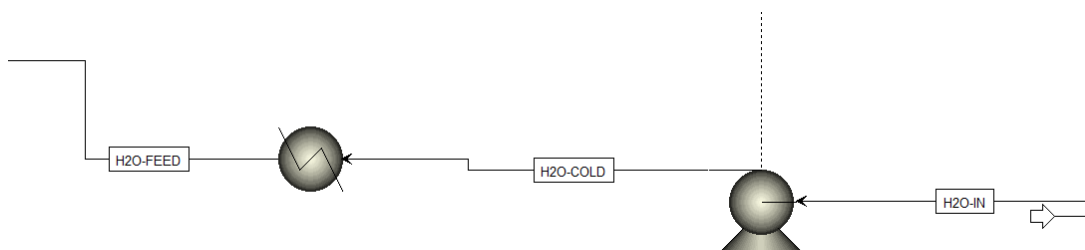


Εικόνα 58 Επαναφορά πίεσης της ροής ανακυκλοφορίας R-O2-KOH από το O2-SEP, με χρήση αντλίας



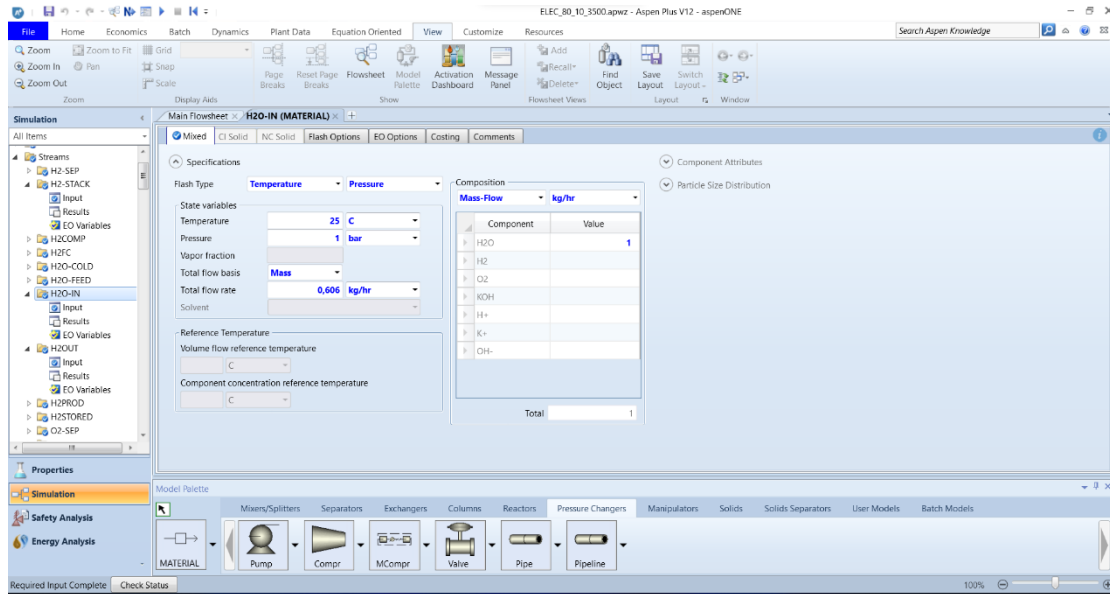
Εικόνα 59 Καθορισμός πίεσης ροής εξόδου και χαρακτηριστικών αντλίας

- Το πλέον σημαντικό κομμάτι εντός της εγκατάστασης ηλεκτρόλυσης το οποίο επιβάλλεται να αναπληρώνεται είναι το νερό που αντιδρά και προκύπτει η ροή υδρογόνου και οξυγόνου. Επομένως, η ροή εισόδου H₂O-IN, η μαζική παροχή της οποίας προέκυψε μέσω της προηγούμενης μαθηματικής προσέγγισης, συνιστά αυτό ακριβώς και με τη λειτουργία μίας αντλίας και ενός εναλλάκτη θερμότητας, η πίεση του αυξάνεται στα 9,7 bar και η θερμοκρασία του στους 81 °C, διότι το τελικό ρεύμα νερού H₂O-FEED καταλήγει εντός του διαχωριστή O₂-SEP, όπου ισχύουν αυτές ακριβώς οι συνθήκες.

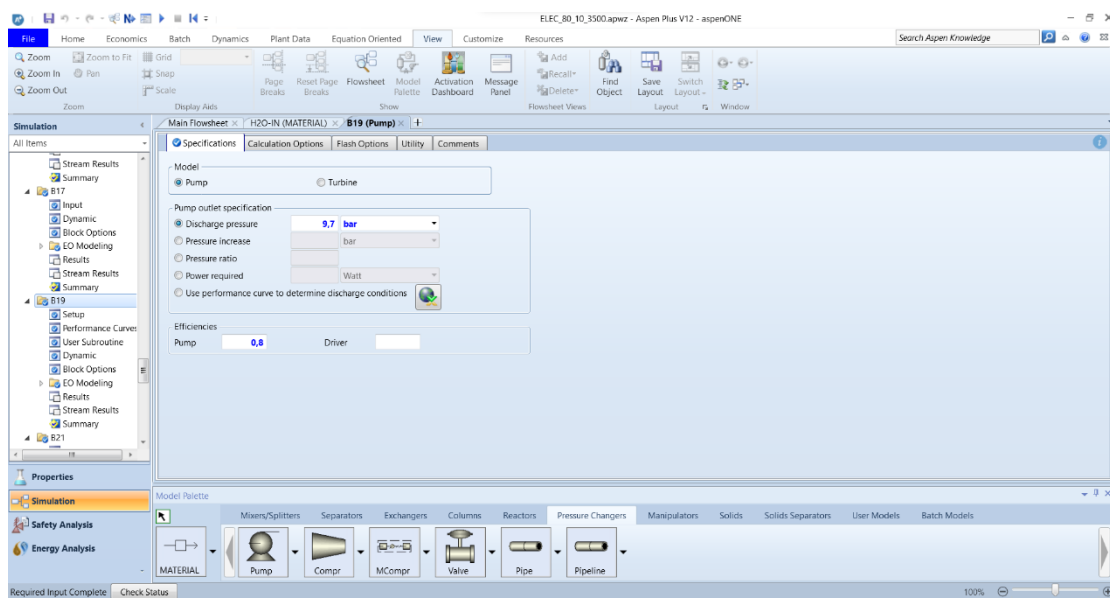


Εικόνα 60 Σύστημα αναπλήρωσης αντιδρώντος νερού εντός της ηλεκτρολυτικής εγκατάστασης

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

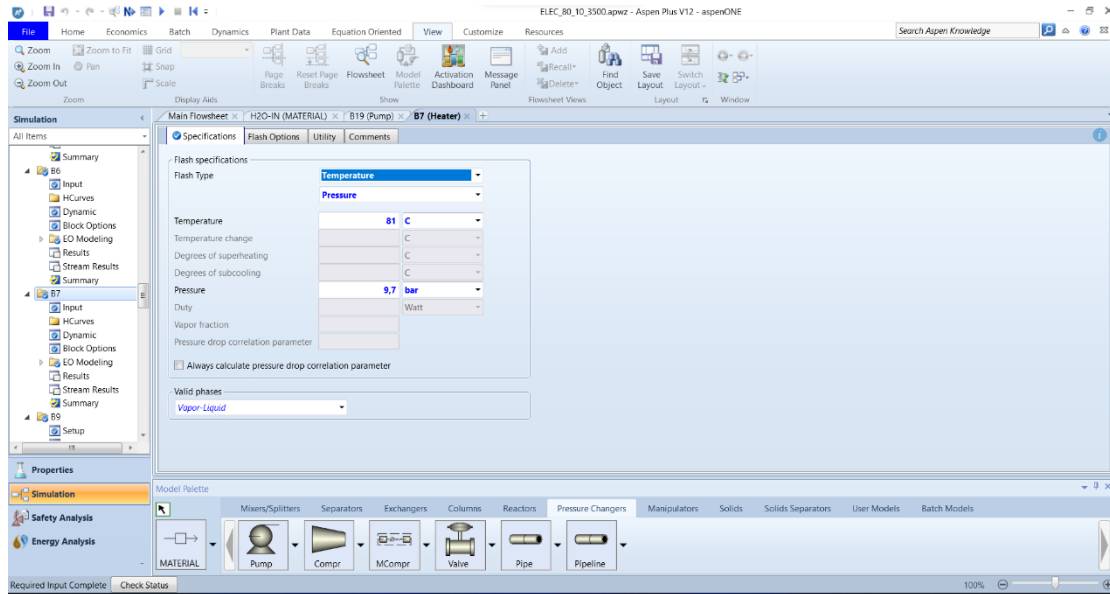


Εικόνα 61 Καθορισμός συνθηκών ροής εισόδου του απιονισμένου νερού H2O-IN



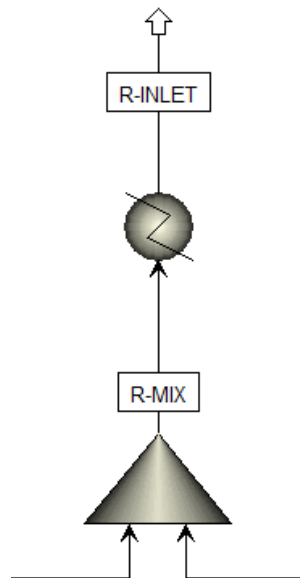
Εικόνα 62 Καθορισμός συνθηκών ροής εξόδου και χαρακτηριστικών αντλίας αναπλήρωσης νερού

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



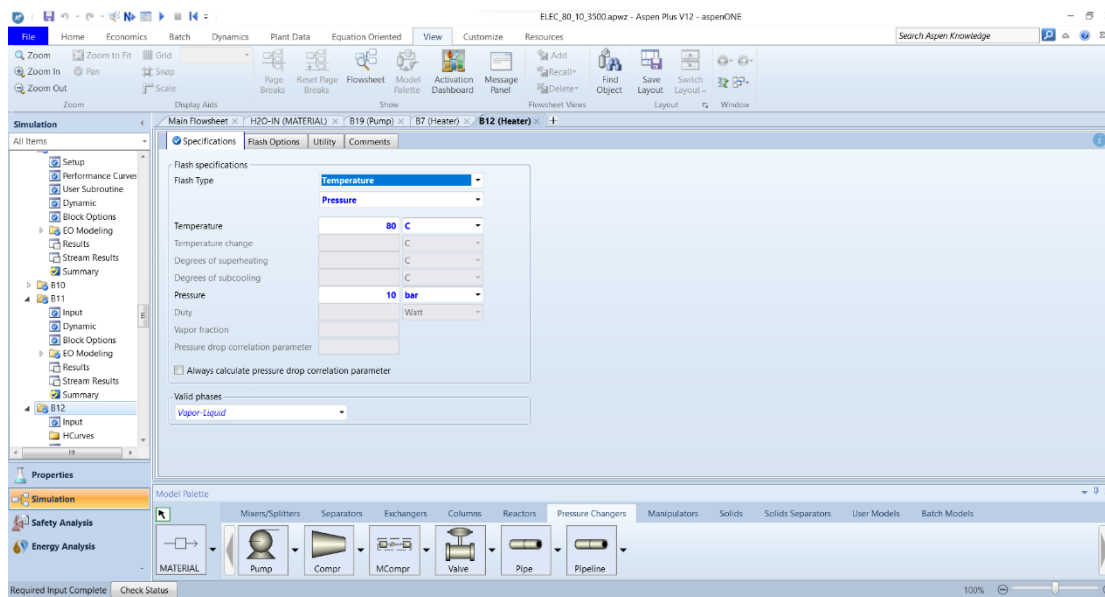
Εικόνα 63 Καθορισμός συνθηκών αναθέρμανσης ροής νερού από εναλλάκτη θερμότητας πριν την είσοδο του H₂O-FEED στο διαχωριστή O₂-SEP

- Για το «κλείσιμο» του κύκλου ανακυκλοφορίας που αναφέρθηκε, οι δύο ροές R-H₂-KOH και R-O₂-KOH οδηγούνται σε ένα μείκτη, ο οποίος τα συνδυάζει και μαζί με το προστιθέμενο νερό του ρεύματος H₂O-FEED, οδηγεί το ενιαίο, πλέον, ρεύμα σε έναν εναλλάκτη για την ακριβή ρύθμιση της θερμοκρασία εισόδου του διαλύματος στους 80 °C πριν την είσοδο του στην ηλεκτρολυτική εγκατάσταση.



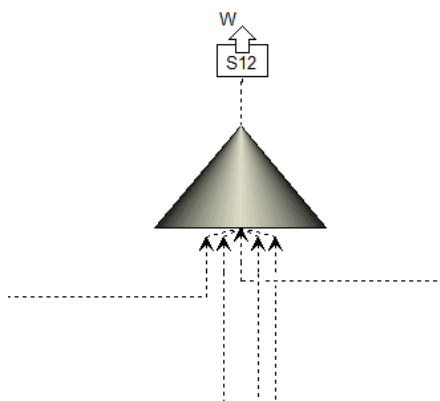
Εικόνα 64 Σύστημα ανάμειξης και αποβολής θερμότητας ροών ανακυκλοφορίας R-H₂-KOH και R-O₂-KOH

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 65 Καθορισμός συνθηκών αποβολής θερμότητας ροών ανακυκλοφορίας από εναλλάκτη θερμότητας πριν την εκ νέου είσοδο στην ηλεκτρολυτική βαθμίδα

- Τέλος, όλα τα βοηθητικά έργα που προκύπτουν από την παρούσα μοντελοποιημένη εγκατάσταση. αθροίζονται με χρήση του μοντέλου του μείκτη από την παλέτα και αυτό το άθροισμα θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί στο έργο που απαιτείται από συμπιεστές και αντλίες μόνο.



Εικόνα 66 Μοντέλο ανάμειξης (Mixer) υπεύθυνο για το άθροισμα όλων των βοηθητικών έργων της εγκατάστασης

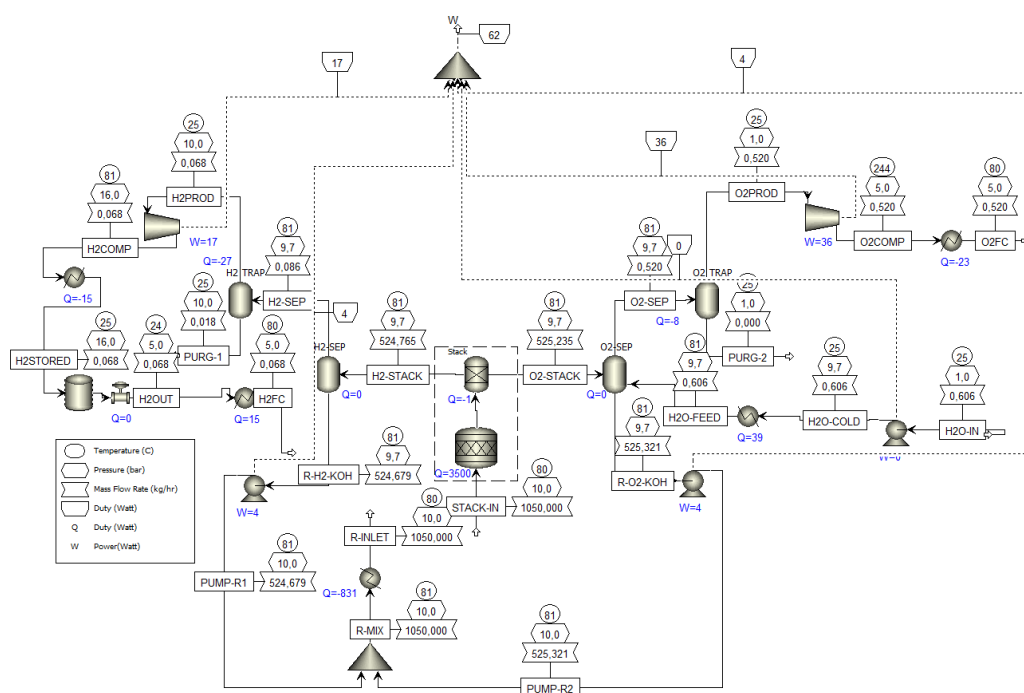
Η προηγούμενη αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας μοντελοποίησης του συστήματος που φαίνεται στην Εικόνα 22 αποτελεί έναν χρήσιμο οδηγό για οποιοδήποτε νέο χρήστη που επιθυμεί να δομήσει και προσομοιώσει μία υποτυπώδη αλκαλική ηλεκτρολυτική εγκατάσταση. Ωστόσο, όλα τα παραπάνω αποτελούν απλώς έναν λειτουργικό οδηγό και αποτυπώνουν μία προσέγγιση ατομική η οποία βασίστηκε σαφώς και σε παραδοχές και θεωρήσεις, όπως θα φανεί και παρακάτω. Η εκάστοτε μέθοδος διαμόρφωσης ενός τέτοιου συστήματος λοιπόν επαφίεται στις ανάγκες και στις απαιτήσεις του καθενός χρήστη.

4.4.6 Προσομοίωση Μοντέλου ASPEN Plus

Για την επιτυχή προσομοίωση του μοντέλου που αναλύθηκε παραπάνω χρειάστηκε να θεωρήσουμε ορισμένες παραδοχές ώστε να απλοποιηθεί η διαδικασία της προσομοίωσης:

- Όλες οι διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας [44]
- Όλα τα αέρια συμπεριφέρονται ως ιδανικά αέρια (ideal gases) [44]
- Υγρό απιονισμένο νερό τροφοδοτείται στην εγκατάσταση σε περιβαλλοντικές συνθήκες αναφοράς στους 25 °C [44]
- Το υδρογόνο και το οξυγόνο που εξέρχονται της εγκατάστασης βρίσκονται σε θερμοκρασία 80 °C και πίεση 5 bar (επίτευξη αυξημένης καθαρότητας αερίων), δηλαδή στις απαραίτητες συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου
- Η ηλεκτρολυτική δεξαμενή λειτουργεί σε ισορροπημένη πίεση μεταξύ καθόδου και ανόδου [44]

Στην Εικόνα 67 τώρα φαίνεται η ολοκληρωμένη προσομοίωση του παραπάνω υποσυστήματος, καθώς και οι τιμές για τη θερμοκρασία, την πίεση, το ρυθμό παροχής, τη θερμότητα και το έργο κάθε ροής και διεργασίας.



Εικόνα 67 Ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής και διεργασιών αλκαλικού ηλεκτρολύτη (AEL), συμπιεστή και αποθηκευτικής δεξαμενής υδρογόνου με χρήση ASPEN Plus

Για καλύτερη κατανόηση, παρέχεται ο Πίνακας 6 όπου παρουσιάζονται οι τιμές πίεσης θερμοκρασίας και ρυθμού παροχής μάζας, καθώς και η σύσταση του κάθε ροής μάζας εντός της εγκατάστασης.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πίνακας 6 Τιμές πίεσης, θερμοκρασίας, ρυθμού παροχής μάζας και σύστασης ρευμάτων εγκατάστασης

	T	p	Ρυθμός Παροχής Μάζας	Σύσταση (kg/h)		
	°C	bar	kg/h	H ₂ O	H ₂	O ₂
H2O-IN	25	1	0.606	0.606	0	0
H2O-COLD	25.07	9.7	0.606	0.606	0	0
H2O-FEED	81	9.7	0.606	0.606	0	0
H2-STACK	80.9	9.7	524.765	367.197	0.068	0
O2-STACK	80.9	9.7	525.235	367.197	0	0.539
R-H2-KOH	80.9	9.7	524.679	367.177	0.002	0
R-O2-KOH	80.93	9.7	525.321	367.793	0	0.028
PUMP-R1	80.9	10	524.679	367.177	0.002	0
PUMP-R2	80.94	10	525.321	367.793	0	0.028
R-MIX	80.92	10	1050	734.97	0.002	0.028
R-INLET	80	10	1050	734.97	0.002	0.028
STACK-IN	80	10	1050	735	0	0
H2-SEP	80.9	9.7	0.086	0.02	0.066	0
H2-PROD	25	10	0.068	0.002	0.066	0
H2COMP	80.73	16	0.068	0.002	0.066	0
H2STORED	25	16	0.068	0.002	0.066	0
H2OUT	23.54	5	0.068	0.002	0.066	0
H2FC	80	5	0.068	0.002	0.066	0
PURG-1	25	10	0.018	0.018	0	0
O2-SEP	80.9	9.7	0.52	0.01	0	0.51
O2PROD	25	1	0.52	0.01	0	0.51
O2COMP	243.86	5	0.52	0.01	0	0.51
O2FC	80	5	0.52	0.01	0	0.51
PURG-2	25	1	0.0005	0.0005	0	0

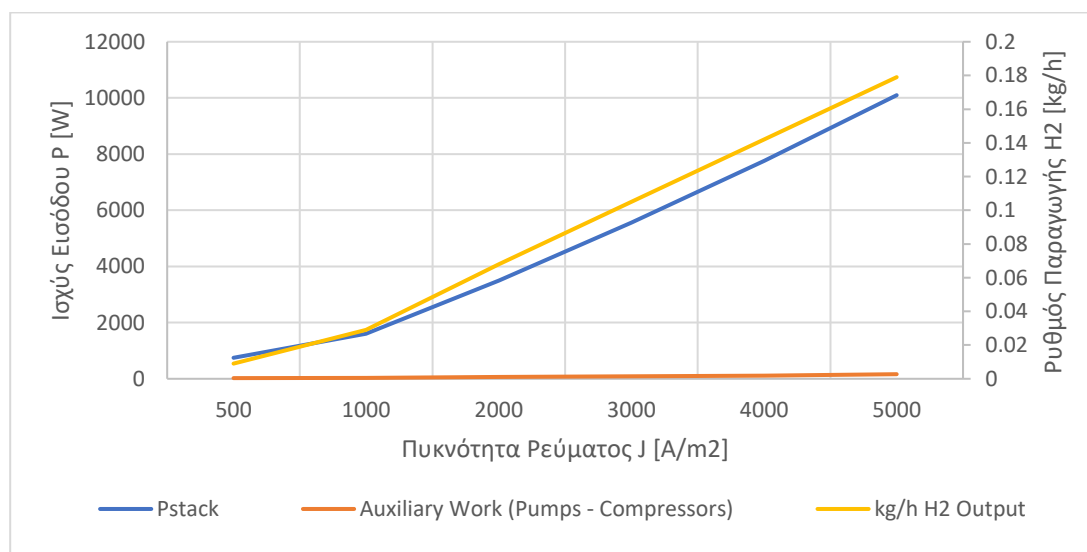
Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι το παραγόμενο υδρογόνο χαρακτηρίζεται από άλλες δύο πολύ σημαντικές τιμές: το Χαμηλότερο Θερμικό Δυναμικό (Lower Heating Value – LHV) και το Υψηλότερο Θερμικό Δυναμικό (Higher Heating Value – HHV). Αυτές οι δύο τιμές εξαρτώνται ιδιαίτερα από τη σύσταση του παραγόμενου υδρογόνου και την καθαρότητα του και λαμβάνουν τις εξής τιμές, όπως προέκυψε μέσω της προσομοίωσης, για όλες τις περιπτώσεις που θα εξεταστούν:

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πίνακας 7 Τιμές θερμικού δυναμικού παραγόμενου υδρογόνου εγκατάστασης προσομοίωσης

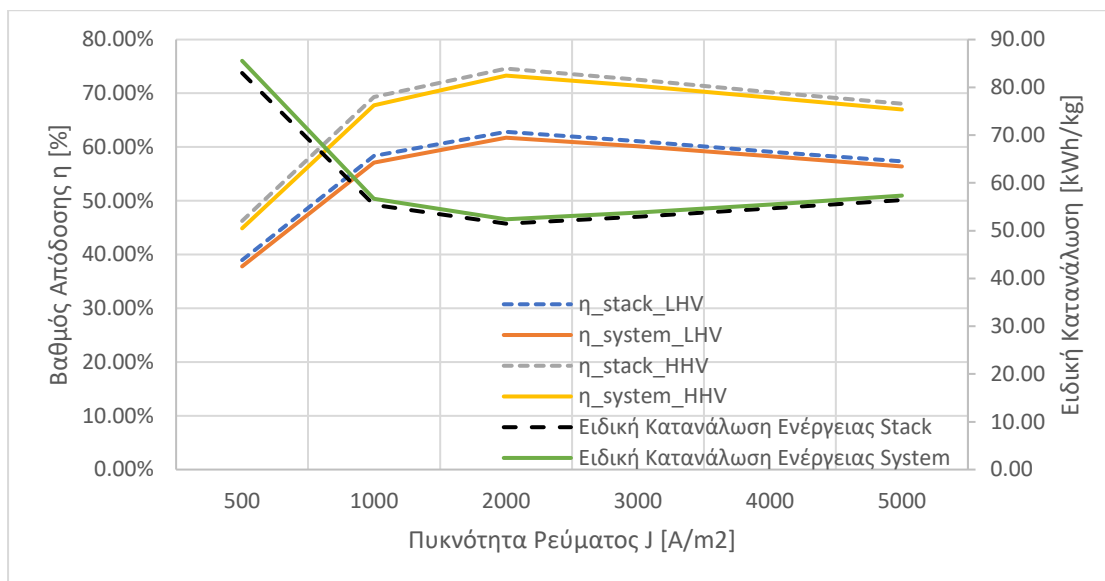
	MJ/kg	kWh/kg
LHV	116.42	32.34
HHV	138.22	38.39

Τώρα, εκτός από τη βασική περίπτωση που εξετάστηκε παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν και περαιτέρω προσομοιώσεις μεταβάλλοντας κάθε φορά μία μεταβλητή ώστε να φανεί η κλίμακα στην οποία επηρεάζει το βαθμό απόδοσης της ηλεκτρολυτικής δεξαμενής και της εγκατάστασης, την απαιτούμενη ισχύ εισόδου, το ρυθμό παραγωγής υδρογόνου, το έργο που απαιτείται από τις διεργασίες αλλά και την ειδική κατανάλωση ενέργειας. Ακριβώς από κάτω φαίνονται και αναλύονται τα διαγράμματα που περιγράφουν τις μεταβολές που επιφέρουν στη λειτουργία και την απόδοση της εγκατάστασης οι μεταβλητές της πυκνότητας ρεύματος που παρέχεται στην ηλεκτρολυτική δεξαμενή, της θερμοκρασίας λειτουργίας και της πίεσης λειτουργίας. Ορισμένα από αυτά συνοδεύονται και από πίνακες που περιγράφουν πιο αναλυτικά τα σημεία τα οποία συνιστούν τις απεικονιζόμενες καμπύλες.



Διάγραμμα 29 Μεταβολή ισχύος εισόδου ηλεκτρολυτικής δεξαμενής, ρυθμού παραγωγής υδρογόνου και βοηθητικού έργου συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Διάγραμμα 30 Μεταβολή βαθμού απόδοσης ηλεκτρολυτικής δεξαμενής (stack) και εγκατάστασης (system) και ειδικής κατανάλωσης ενέργειας συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος

Πίνακας 8 Μεταβολές βασικών παραμέτρων συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος

J	H ₂	P	W	η _{system,LHV}	η _{system,HH}	η _{stack,LHV}	η _{stack,LH}	SEC _{stack}	SEC _{system}
					v		v		m
A/m ²	kg/h	W	W	-	-	-	-	kWh/kg	kWh/kg
500	0.009	747	23	37.80%	44.88%	38.96%	46.26%	83.00	85.56
1000	0.029	1607	36	57.08%	67.77%	58.36%	69.28%	55.41	56.66
2000	0.068	3500	62	61.74%	73.29%	62.83%	74.59%	51.47	52.38
3000	0.105	5560	86	60.14%	71.40%	61.07%	72.51%	52.95	53.77
4000	0.142	7765	111	58.31%	69.22%	59.14%	70.21%	54.68	55.46
5000	0.179	10098	163	56.42%	66.98%	57.33%	68.06%	56.41	57.32

Παρατηρείται ότι με μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος J (και άρα της έντασης ρεύματος I) στην εγκατάσταση επιτυγχάνεται αύξηση της ισχύος εισόδου, γεγονός το οποίο οδηγεί και σε αύξηση του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου. Ωστόσο, η αύξηση του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου οδηγεί στην αύξηση του απαιτούμενου βοηθητικού έργου από αντλίες και συμπιεστές στην εγκατάσταση, λόγω της αυξημένης παροχής που εισέρχεται σε αυτές τις συσκευές και πρέπει να φτάσει κάποιες προκαθορισμένες συνθήκες. Επί πρόσθετα, με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος της ηλεκτρολυτικής εγκατάστασης αυξάνεται ραγδαία και ο βαθμός απόδοσης αμφότερων της ηλεκτρολυτικής δεξαμενής και της εγκατάστασης έως μία τιμή όπου επιτυγχάνεται μέγιστο ($J = 2000 \text{ A/m}^2$) και μετά από αυτήν την τιμή πυκνότητας ρεύματος παρατηρείται μείωση του βαθμού απόδοσης. Αντιστρόφως ανάλογη πορεία ακολουθεί η Ειδική Κατανάλωση Ενέργειας (SEC) οι τιμές της οποίας μειώνονται με την

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

αύξηση του J και παρουσιάζουν σε μία τιμή του ελάχιστο ($J = 2000 \text{ A/m}^2$) και έπειτα από εκείνη την τιμή πυκνότητας ρεύματος παρατηρείται αύξηση του SEC.

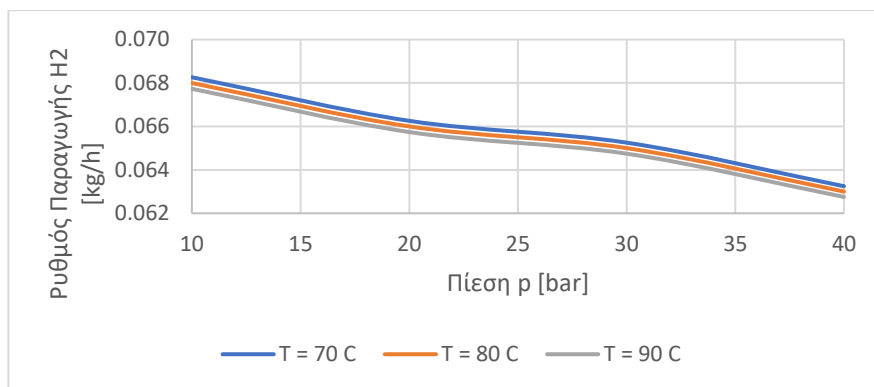
Τώρα, οι δύο σημαντικότερες μεταβλητές που επηρεάζουν τη λειτουργία και την απόδοση της ηλεκτρολυτικής εγκατάστασης – μετά από την πυκνότητα ρεύματος J – είναι η θερμοκρασία και η πίεση λειτουργίας της ηλεκτρολυτικής δεξαμενής. Επομένως, στον επόμενο πίνακα και στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνονται οι επιδράσεις που έχουν οι μεταβολές αυτών των δύο μεταβλητών στην ηλεκτρολυτική εγκατάσταση.

Πίνακας 9 Μεταβολές βασικών παραμέτρων συναρτήσει θερμοκρασίας και πίεσης λειτουργίας

T	p	H ₂	P	W	$\eta_{\text{system,LHV}}$	$\eta_{\text{system,HHV}}$	$\eta_{\text{stack,LHV}}$	$\eta_{\text{stack,HHV}}$	SEC _{stack}
°C	bar	kg/h	W	W	-	-	-	-	kWh/kg
70	10	0.06826	3602	63	60.24%	71.51%	61.29%	72.76%	53.69
	20	0.06626	3602	72	58.32%	69.24%	59.49%	70.62%	55.45
	30	0.06525	3602	82	57.28%	68.00%	58.59%	69.55%	56.46
	40	0.06324	3602	91	55.38%	65.75%	56.78%	67.41%	58.39
80	10	0.068	3500	60	61.77%	73.34%	62.83%	74.59%	52.35
	20	0.066	3500	67	59.84%	71.04%	60.98%	72.40%	54.05
	30	0.065	3500	74	58.82%	69.83%	60.06%	71.30%	54.98
	40	0.063	3500	80	56.91%	67.56%	58.21%	69.11%	56.83
90	10	0.06773	3394	57	63.47%	75.35%	64.54%	76.62%	50.95
	20	0.06574	3394	61	61.53%	73.05%	62.64%	74.37%	52.56
	30	0.06474	3394	65	60.53%	71.86%	61.69%	73.24%	53.43
	40	0.06275	3394	68	58.62%	69.59%	59.79%	70.99%	55.17

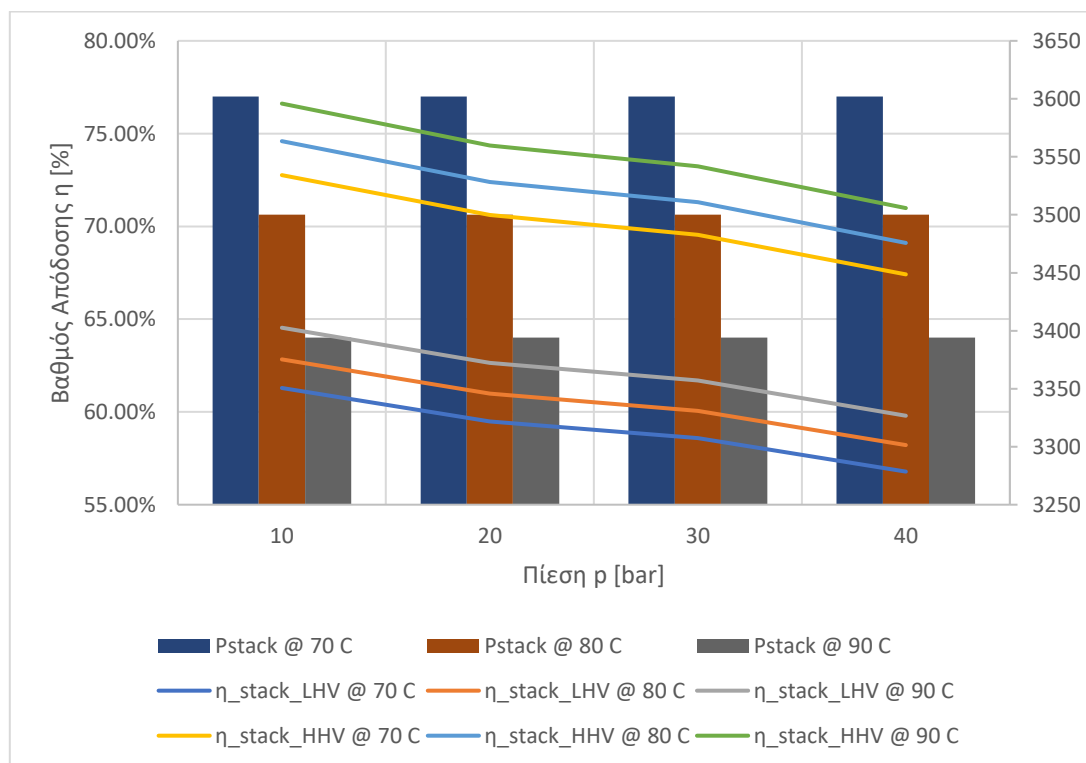
Όπως υποδεικνύει ο Πίνακας 9 η τιμή της πυκνότητας ρεύματος δεν παραμένει σταθερή για μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης λειτουργίας και συνεπώς, η ισχύς εισόδου της ηλεκτρολυτικής δεξαμενής αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας (η πίεση λειτουργίας δεν εμπεριέχεται στους τύπους της ισχύος εξόδου διότι η επίδραση τους είναι, συγκριτικά με αυτήν της θερμοκρασίας, σημαντικά μειωμένη).

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



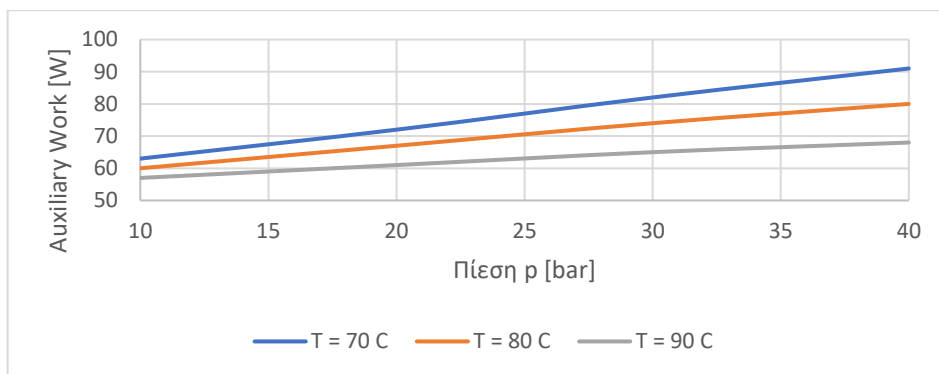
Διάγραμμα 31 Μεταβολή ρυθμού παραγωγής υδρογόνου συναρτήσει πίεσης με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας

Στο διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι η αύξηση της πίεσης λειτουργίας οδηγεί σε μείωση του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου από την ηλεκτρολυτική εγκατάσταση υπό κατά περίπτωση σταθερή θερμοκρασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με αύξηση της πίεσης, αυξάνονται και οι παρασιτικές απώλειες ρεύματος και άρα η υπέρταση της ηλεκτρολυτικής δεξαμενής. Συνεπώς, η απόδοση Faraday μειώνεται λόγω αυτής της αύξησης, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 24. Ωστόσο, εκτός από τη μείωση της απόδοσης Faraday, συντελείται και η αύξηση της τάσης λειτουργίας της ηλεκτρολυτικής δεξαμενής με μείωση της θερμοκρασίας και άρα η ισχύς εισόδου αυξάνεται ιδιαίτερως, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



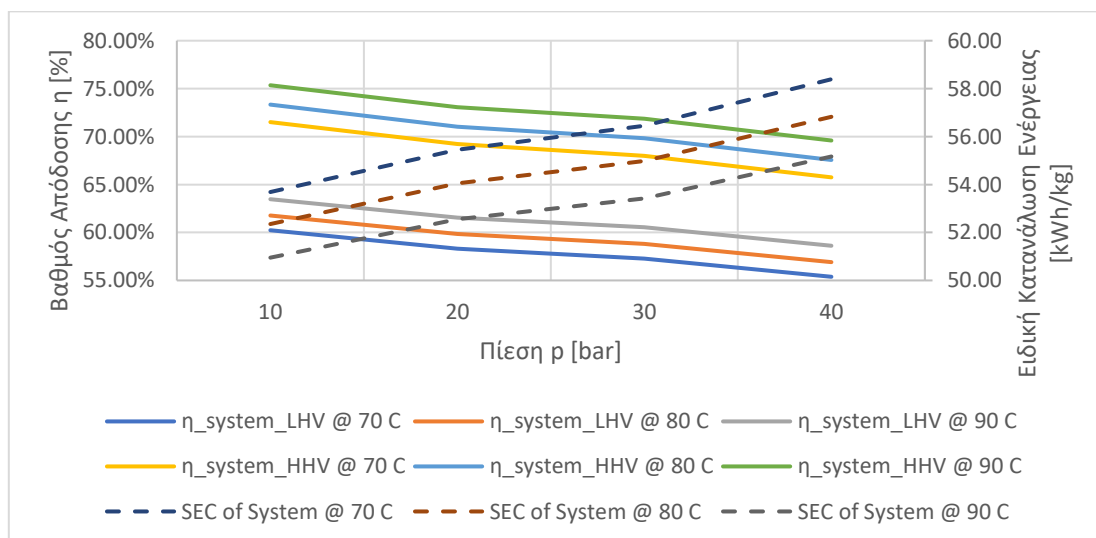
Διάγραμμα 32 Μεταβολή βαθμού απόδοσης Stack συναρτήσει πίεσης με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Διάγραμμα 33 Μεταβολή βοηθητικού έργου (αντλίες - συμπιεστές) συναρτήσει πίεσης με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας

Το έργο που απαιτείται από τις αντλίες και τους συμπιεστές της εγκατάστασης συνιστά σημαντικό κομμάτι της απόδοσης του συστήματος αυτού και συνεπώς, της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας του. Παρατηρείται, με τη βοήθεια του παραπάνω διαγράμματος, ότι το βοηθητικό αυτό έργο επηρεάζεται από αμφότερες την πίεση και τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, με αύξηση της πίεσης της ροής υπό κατά περίπτωση σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας παρουσιάζεται και αύξηση του απαιτούμενου έργου από την εγκατάσταση επειδή παρατηρείται αυξανόμενη απώλεια πίεσης έπειτα την ηλεκτρολυτική δεξαμενή με αύξηση της πίεσης εξόδου της ροής από αυτήν. Είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί και να διατηρηθεί δηλαδή η τιμή της πίεσης όσο αυξάνεται η πίεση λειτουργίας της ηλεκτρολυτικής δεξαμενής. Από την άλλη, έχοντας την πίεση σταθερή και αυξάνοντας τη θερμοκρασία, μειώνεται το απαιτούμενο βοηθητικό έργο λόγω του μειωμένου ιξώδους και άρα των μειωμένων απωλειών ενέργειας οπότε επιτυγχάνονται πιο εύκολα οι καθορισμένες τιμές πίεσης με λιγότερες απώλειες πίεσης στο ενδιάμεσο.



Διάγραμμα 34 Μεταβολή βαθμού απόδοσης συστήματος και ειδικής κατανάλωσης ενέργειας συναρτήσει της πίεσης με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 34, για την ηλεκτρολυτική εγκατάσταση, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ακολουθεί την προβλεπόμενη πορεία. Πιο συγκεκριμένα, βαίνει μειούμενος με αύξηση της πίεσης λειτουργίας του συστήματος, λόγω της αύξησης των παρασιτικών απωλειών και άρα λόγω της μείωσης της απόδοσης Faraday. Ωστόσο, για διαφορετικές θερμοκρασίες που εξετάστηκαν όπως παρατηρήθηκε και παραπάνω, η απόδοση Faraday δε διαφέρει ιδιαίτερος για την τιμή της πυκνότητας ρεύματος που έχει επιλεγεί. Επιπλέον, για την προκείμενη ανάλυση, η επίδραση της πίεσης δεν έχει ληφθεί υπόψιν για την απόδοση Faraday. Είναι επομένως λογικό το γεγονός ότι η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, διατηρώντας σταθερή την πίεση, θα χαρακτηρίζεται και από το μέγιστο βαθμό απόδοσης, αφού η απαίτηση για βοηθητικό έργο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και επίσης επειδή με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται και σημαντική μείωση της ισχύος εισόδου λόγω μείωσης της ολικής τάσης λειτουργίας V_{cell} , με σταθερή πυκνότητα ρεύματος J .

Επομένως, από τα παραπάνω αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω του προγράμματος ASPEN Plus, γίνεται αντιληπτό ότι, σε πρακτικό και θεωρητικό επίπεδο, η απόδοση της εγκατάστασης δύναται να παραμείνει σταθερή μειώνοντας την πίεση λειτουργίας και αυξάνοντας την πυκνότητα ρεύματος. Όμως, εάν απώτερος σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος αυτού, η καλύτερη τακτική θα ήταν να αυξηθεί η θερμοκρασία πρωτίστως και έπειτα, να μειωθεί η πίεση, διατηρώντας την πυκνότητα ρεύματος σε λογικά πλαίσια αναλόγως το ρυθμό παραγωγής που απαιτείται. Δεν είναι εξάλλου τυχαίο πως η Ηλεκτρόλυση Υψηλών Θερμοκρασιών (ΗΤΕ), αν και ακριβή και νέα τεχνολογία, υπόσχεται απόδοση της τάξεως του 90% για παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου, σε θερμοκρασίες λειτουργίας 750 – 900 °C [48].

4.5 Δεξαμενή Αποθήκευσης

Το υδρογόνο που παράγεται από τον ηλεκτρολύτη δε γίνεται να καταναλώνεται απευθείας από την κυψέλη καυσίμου αφού σε ορισμένες περιπτώσεις θα υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας και η ηλεκτρική ενέργεια των φωτοβολταϊκών και των μπαταριών θα είναι υπεραρκετή για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του οικιακού χώρου. Οπότε, η εγκατάσταση και η διασύνδεση μίας δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου υπό πίεση, αρκούντως μεγάλη ώστε να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες σε περίπτωση ελλείμματος ενέργειας για αρκετές ώρες, αποτελεί μονόδρομο. Το υδρογόνο λοιπόν που παρέχεται από την ηλεκτρόλυση πρώτα συμπιέζεται σε μία καθορισμένη πίεση, με τη βοήθεια ενός πολυτροπικού συμπιεστή που φαίνεται στην Εικόνα 67 (H2COMP), και έπειτα περνά μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας

για να απομακρυνθεί η θερμότητα που του προσδόθηκε μέσω της συμπίεσης και έτσι να εισέλθει σε ατμοσφαιρική θερμοκρασία εντός της δεξαμενής.

4.5.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σε αντίθεση με τον ηλεκτρολύτη του συστήματος που αναλύθηκε παραπάνω, οι δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου αποτελούν αντικείμενο πλέον διαδεδομένο και με βιβλιογραφία άκρως ενδελεχή και ορισμένες φορές επαναλαμβανόμενη.

Συγκεκριμένα, βασιζόμενοι στη βιβλιογραφία, οι πιο πρακτικές μέθοδοι μοντελοποίησης και προσομοίωσης της αποθηκευτικής διαδικασίας υδρογόνου είναι η δεξαμενή αποθήκευσης υπό πίεση (Pressurized Hydrogen – PH₂) (physical based) και η αποθήκευση με χρήση μεταλλικών υδριδίων (Metal Hydrides – MH) (material based) [24]. Φυσικά, υπάρχουν κι άλλες μέθοδοι οι οποίες δεν είναι τόσο γνωστές όπως η κρυογενική αποθήκευση, η αποθήκευση με υγροποίηση (LH₂) και η οργανική υγροποίηση [49].

Η παρούσα ανάλυση θα επικεντρωθεί στις δύο βασικότερες μεθόδους που αναφέρθηκαν. Αρχικά, η μέθοδος αποθήκευσης σε δεξαμενή υπό πίεση η οποία και χρησιμοποιήθηκε προτείνεται γενικώς σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας οι οποίες προμηθεύονται το υδρογόνο από ηλεκτρολύτη χαμηλής πίεσης και αποτελεί μηχανικό τρόπο αποθήκευσης. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου συνιστά η απλότητα της εγκατάστασης η οποία αποτελείται από το συμπιεστή, τον εναλλάκτη (intercooler) και την τελική δεξαμενή αποθήκευσης. Όμως, εάν οι πιέσεις που πρέπει να επιτευχθούν είναι ιδιαίτερως υψηλές και πρέπει να αποφευχθούν οι απότομες και ραγδαίες διακυμάνσεις πίεσης, προτείνεται η προσθήκη ενός ενδιάμεσου σταδίου συμπίεσης, ενός δεύτερου εναλλάκτη και ενός buffer storage unit [24], [28].

Παρόλα αυτά, η προαναφερθείσα τεχνολογία φέρει ένα σοβαρό μειονέκτημα: η πυκνότητα που μπορεί να επιτευχθεί για το υδρογόνο υπό πίεση είναι αρκετά χαμηλή (15 kg/m³), συγκριτικά με τη μέθοδο μεταλλικών υδριδίων (50 – 53 kg/m³). Αυτό σημαίνει ότι για την αποθήκευση της ίδια μάζας θα χρειαστεί τρεις με τέσσερις φορές ο όγκος της δεξαμενής μεταλλικών υδριδίων [24]. Αυτό οφείλεται κατά βάση στο γεγονός ότι το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από ένα πολύ χαμηλό σημείο βρασμού (±253 °C) και πολύ χαμηλή πυκνότητα σε συνθήκες αναφοράς (STP – 1 bar, 25 °C) (=0.0813 kg/m³).

Τώρα, η τεχνολογία αποθήκευσης χρησιμοποιώντας μεταλλικά υδρίδια αποτελεί μία νέα και πολλά υποσχόμενη χημική μέθοδο, κυρίως λόγω της υψηλής ειδικής ενέργειας που φέρουν. Επιπλέον, η ειδική μάζα ορισμένων μεταλλικών υδριδίων, σε θερμοκρασία δωματίου, είναι

περίπου 0.012 – 0.015 kg H₂, οπότε για Χαμηλό Θερμικό Δυναμικό (LHV) του υδρογόνου ίσο με 120000 kJ/kg H₂, το οποίο ισοδυναμεί με τιμές ειδικής ενέργειας περίπου 1440 – 1800 kJ/kg ΜΗ. Για λόγους σύγκρισης και κατανόησης του μεγέθους αυτού, είναι 12 με 15 φορές μεγαλύτερο από μία συμβατική μπαταρία οξέος μολύβδου (lead – acid).

4.5.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Υπάρχουν δύο τρόποι προσέγγισης:

- Εξίσωση Ιδανικών Αερίων
- Εξίσωση Πραγματικών Αερίων (εξίσωση van der Waals)

Σύμφωνα με το **Νόμο Ιδανικών Αερίων**, η πίεση p μίας δεξαμενής αποθήκευσης υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$p = 10^{-5} \left(\frac{nRT}{V} \right) \quad 4.5.1$$

Σύμφωνα με την **Εξίσωση Κατάστασης van der Waals**, η πίεση p ενός πραγματικού αερίου εντός μίας δεξαμενής αποθήκευσης δίνεται από τη σχέση:

$$p = 10^{-5} \left(\frac{nRT}{V-nb} - a \left(\frac{n^2}{V^2} \right) \right) \quad 4.5.2$$

και:

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64p_{cr}} \quad 4.5.3$$

$$b = \frac{RT_{cr}}{8p_{cr}} \quad 4.5.4$$

όπου:

p = πίεση που επικρατεί στη δεξαμενή αποθήκευσης, bar

n = ρυθμός παροχής μάζας υδρογόνου στη δεξαμενή, mol/h

R = παγκόσμια σταθερά αερίων = 8.314 J K⁻¹ mol⁻¹

T = θερμοκρασία αερίου εντός της δεξαμενής = 298 K

V = χωρητικότητα σε όγκο της δεξαμενής αποθήκευσης, m³

T_{cr} = κρίσιμη θερμοκρασία αερίου, K

p_{cr} = κρίσιμη πίεση αερίου, Pa

Οι δύο όροι a και b στην παραπάνω εξίσωση λαμβάνουν υπόψιν τις διαμοριακές δυνάμεις έλξης και τον όγκο που καταλαμβάνεται από τα μόρια του αερίου, αντιστοίχως. Προφανώς, θέτοντας αυτούς τους όρους ίσους με μηδέν προκύπτει ο Νόμος Ιδανικών Αερίων [24].

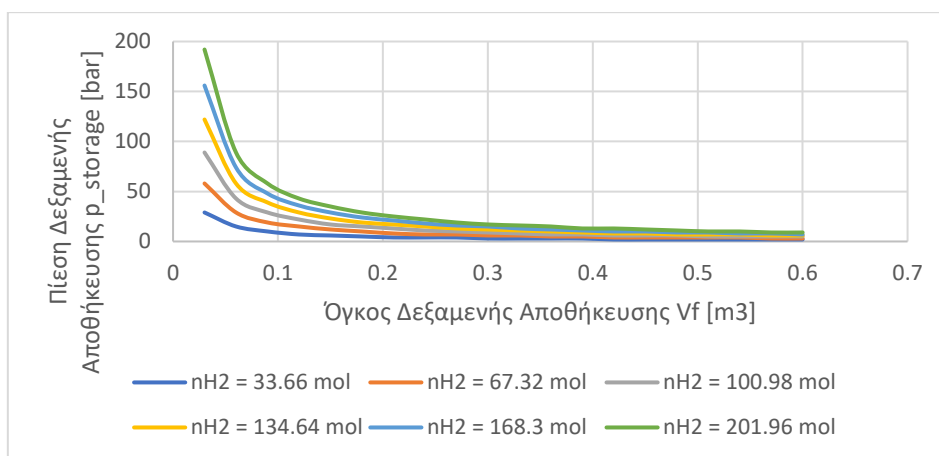
4.5.3 Προσομοίωση Μαθηματικού Μοντέλου

Ενώ λειτουργεί ο ηλεκτρολύτης και εισέρχεται συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο εντός της δεξαμενής, η πίεση αυξάνεται όσο εισέρχεται ποσότητα υδρογόνου, σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση van der Waals. Μόλις η πίεση φτάσει μία μέγιστη τιμή (16 bar) εντός της δεξαμενής, διακρίνονται δύο περιπτώσεις: είτε σταματάει η λειτουργία του ηλεκτρολύτη και το αποθηκευμένο υδρογόνο αναμένεται να εκτονωθεί προς κατανάλωση από την κυψέλη καυσίμου σε περίπτωση ενεργειακού ελλείμματος, είτε συνεχίζει να λειτουργεί η ηλεκτρολυτική εγκατάσταση, με ταυτόχρονη παροχή του αποθηκευμένου υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου για ηλεκτροπαραγωγή.

Για την προσομοίωση αυτή, παρουσιάζονται παρακάτω οι παράμετροι και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών που θα χρησιμοποιηθούν. Εν συνεχεία, ο λόγος προτίμησης αυτών θα εξηγηθεί διαγραμματικά και επεξηγηματικά.

Πίνακας 10 Τιμές βασικών παραμέτρων προσομοίωσης μαθηματικού μοντέλου

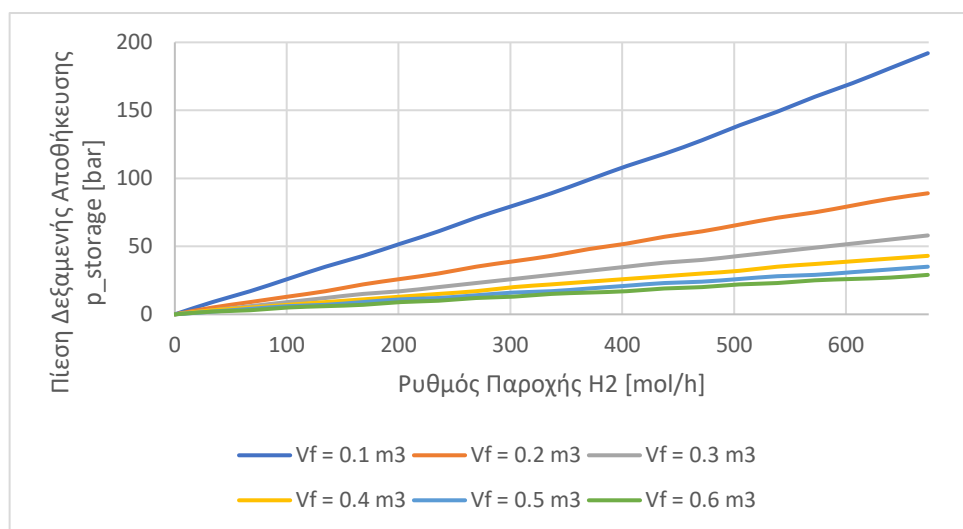
Δεξαμενή Αποθήκευσης		
V	0.6	m ³
a	0.024651	(m ³ mol ⁻²) Pa
b	2.65009E-05	m ³ mol ⁻¹
T_{cr}	33.15	K
p_{cr}	13E05	Pa
T	298	K



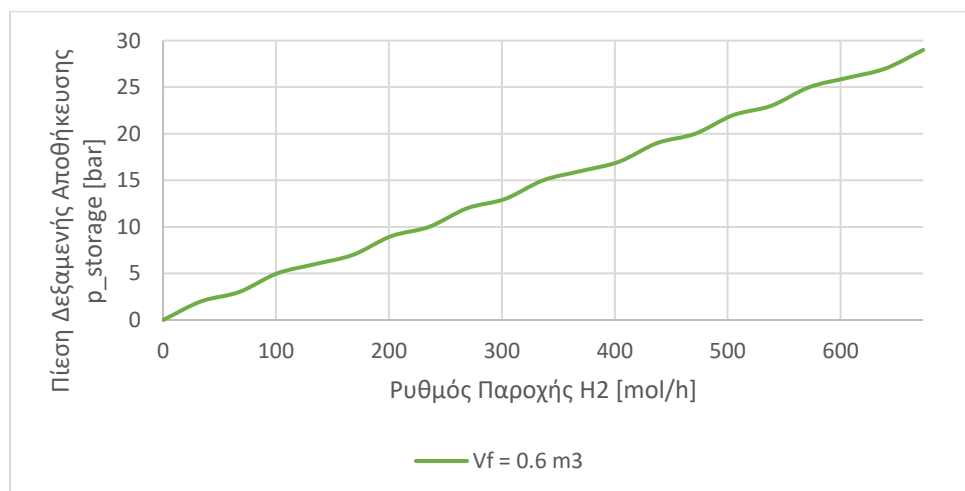
Διάγραμμα 35 Μεταβολή πίεσης δεξαμενής αποθήκευσης συναρτήσει διαθέσιμου όγκου για σταθερή ροή υδρογόνου

Παρατηρείται ότι για πολύ μικρές τιμές διαθέσιμου όγκου στη δεξαμενή αποθήκευσης, η πίεση εντός της δεξαμενής αυξάνεται ραγδαία και η αύξηση της ροής ποσότητας υδρογόνου την αυξάνει ακόμη περισσότερο. Η πορεία που ακολουθούν οι καμπύλες μοιάζει λογαριθμική

και αυτό προϊδεάζει ότι εάν αυξηθεί επαρκώς ο διαθέσιμος όγκος τότε η πίεση θα φτάσει σε μία ικανοποιητικά χαμηλή τιμή, όπως και φαίνεται για $V = 0.6 \text{ m}^3$.



Διάγραμμα 36 Μεταβολή πίεσης δεξαμενής αποθήκευσης συναρτήσει ρυθμού παραγωγής υδρογόνου για σταθερό διαθέσιμο όγκο αποθήκευσης



Διάγραμμα 37 Μεταβολή πίεσης δεξαμενής αποθήκευσης συναρτήσει ρυθμού παραγωγής υδρογόνου για διαθέσιμο όγκο 0.6 m^3

Τα παραπάνω διαγράμματα υποδεικνύουν αυτό που σημειώθηκε και παραπάνω ότι με αύξηση της ροής του υδρογόνου (λόγω αύξησης της πυκνότητας ρεύματος και άρα, της ισχύος εισόδου της ηλεκτρολυτικής εγκατάστασης) συντελείται αύξηση πίεσης εντός της δεξαμενής, για σταθερό όγκο αυτήν τη φορά. Ο όγκος της δεξαμενής που επιλέχθηκε (0.6 m^3) και φαίνεται η μεταβολή της πίεσης του στο παραπάνω διάγραμμα καταφέρνει ακόμη και για συνεχή ρυθμό παροχής 33.66 mol/h για 20 ώρες (673.2 mol συνολικά $\approx 1.357 \text{ kg}$ συνολική ποσότητα) να διατηρεί την πίεση κάτω από 30 bar . Επιπλέον, ο απλοποιημένος τύπος που δίνει τις τιμές της πυκνότητας για πίεση πάνω από την ατμοσφαιρική ($=1 \text{ bar}$) είναι ο εξής:

$$\rho_p \approx \rho_{STP} * p \quad 4.5.5$$

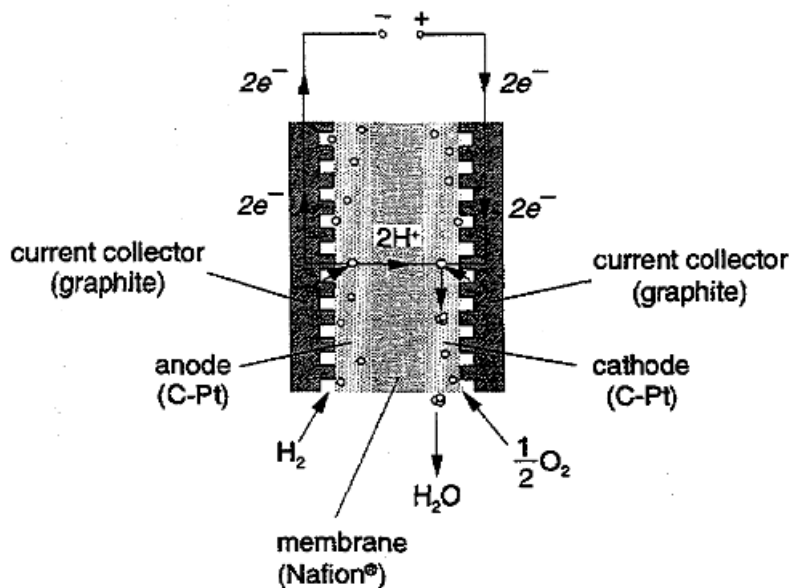
Οπότε για **16 bar** που θεωρήθηκε η μέγιστη πίεση εντός της δεξαμενής αποθήκευσης που επιλέχθηκε, η πυκνότητα θα είναι $\rho_p = 1.3008 \text{ kg/m}^3$. Και άρα, για δεξαμενή χωρητικότητας $V = 0.6 \text{ m}^3$, θα μπορεί να αποθηκεύσει σε μάζα:

$$m_{H_2} = \rho_p V = 0.78048 \text{ kg} \quad 4.5.6$$

4.6 Κυψέλη Καυσίμου

Για να ολοκληρωθεί αυτό το σύνθετο σύστημα παραγωγής «πράσινου» υδρογόνου με χρήση φωτοβολταϊκών είναι απαραίτητη και η ύπαρξη μίας κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell) η οποία ουσιαστικά θα διαδραματίζει την ακριβώς αντίθετη λειτουργία σε σχέση με τον ηλεκτρολύτη (Electrolyzer). Θα έχει λοιπόν ως είσοδο αέριο υδρογόνο (H_2) και οξυγόνο (O_2) και θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ως πολλά υποσχόμενη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας (πράσινης ή μη), έχει θεωρηθεί από την επιστημονική κοινότητα ως βασικό κομμάτι στην εξέλιξη του ρόλου που θα διαδραματίζει το υδρογόνο στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα. Αυτό αποδεικνύουν τα ευρήματα και οι εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας τα τελευταία 20 χρόνια, όπως η αντικατάσταση των μηχανών εσωτερικής καύσης και η παροχή ισχύος σε στάσιμες ή και φορητές ενεργειακές εφαρμογές [50]. Ωστόσο, παρά όλες αυτές τις εφαρμογές σε πληθώρα τομέων, δεν παύει να είναι μία τεχνολογία αρκετά νέα και συνεπώς οι προοπτικές εξέλιξης και βελτίωσης της είναι πολυάριθμες, από τη μείωση του κόστους έως την αύξηση της απόδοσης τους.

Τώρα, το βασικότερο κομμάτι ενός κελιού της κυψέλης καυσίμου PEM (Proton Exchange Membrane) είναι η μονάδα μεμβράνης – ηλεκτροδίου (MEA) η οποία συνίσταται από ένα ηλεκτρόδιο ανόδου, μία πολυμερική μεμβράνη, ένα ηλεκτρόδιο καθόδου καθώς και έναν καταλύτη (συνήθως πλατίνα - Pt), ώστε να πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις (οξειδωση υδρογόνου) με ικανοποιητικό ρυθμό και συχνότητα [24]. Η συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου τύπου PEM αρχίζει με τη διοχέτευση υδρογόνου σε υψηλή πίεση στην άνοδο. Έπειτα, η πολυμερική μεμβράνη που αναφέρθηκε παραπάνω επιτρέπει μόνον τη διέλευση των πρωτονίων υδρογόνου (H^+). Τα ηλεκτρόνια λοιπόν που προέκυψαν από το διαχωρισμό των μορίων υδρογόνου εξέρχονται ως ηλεκτρικό ρεύμα από την κυψέλη καυσίμου. Τέλος, στην έξοδο της κυψέλης, τα πρωτόνια υδρογόνου ενώνονται με τα οξυγόνα σε αέρια μορφή που παρέχεται στη συσκευή, ώστε να σχηματιστεί νερό (H_2O) ως το μόνο παραπροϊόν αυτής της διαδικασίας.



Εικόνα 68 Σχηματική αναπαράσταση βασικής αρχής λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου τύπου PEM

4.6.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφία που παρέχεται για την τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου είναι εξαιρετικά εκτενής και βρέθηκαν πολλά άρθρα τα οποία αναφέρονται στην ιστορία, τις λειτουργίες, τις εφαρμογές, τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση αυτών των συσκευών. Στο πρώτο άρθρο, με συγγραφείς τους J.M. Andújar και F. Segura, περιγράφεται η πλούσια και μακρά ιστορία αυτής της σημαντικότητας τεχνολογίας για την οικονομία του υδρογόνου και την παγκόσμια εξάπλωσή του. Πραγματεύεται επίσης το επίμαχο ζήτημα της ανακάλυψης της βασικής αρχής λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, σύμφωνα με το οποίο δίδονται οι απόψεις εάν ο Γερμανός χημικός Christian Friedrich Schönbein το 1839 ή ο Sir William Robert Grove ήταν ο πρώτος που διενέργησε και δημοσίευσε την πρώτη ερευνητική εργασία. Συνεχίζει αναφέροντας τις εξελίξεις της τεχνολογίας κατά τον 20^ο αιώνα, οι οποίες οδήγησαν σε ποικίλες εφαρμογές τον 21^ο αιώνα, όπως η χρήση τους σε μέσα μαζικής μεταφοράς, σε ΙΧ αλλά και οι εφαρμογές κυψελών καυσίμου με είσοδο το υδρογόνο και το οξυγόνο για την παροχή ενέργειας σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, λόγω της υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας, με χαμηλά κόστη συντήρησης και πολυετή συνεχή χρήση [50].

Το δεύτερο άρθρο, του συγγραφέα Øystein Ulleberg, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο στη διαμόρφωση του μοντέλου της κυψέλης καυσίμου περιγράφει ακριβώς τη μοντελοποίηση μίας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου – οξυγόνου τύπου PEM, λαμβάνοντας υπόψιν και αναλύοντας τα κομμάτια που απαρτίζουν τη συσκευή αυτή, τις βασικές αρχές

λειτουργίας της καθώς και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, χάρη των υπολοίπων υποσυστημάτων. Το πρωτεύον μαθηματικό μοντέλο και το πλέον διαδεδομένο θα μπορούσε να παραλληλιστεί με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του ηλεκτρολύτη και συμπεριλαμβάνει τα χαρακτηριστικά ρεύματος – τάσης (I-V), την απόδοση Faraday και την ενεργειακή απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Ταυτοχρόνως, λαμβάνονται υπόψιν παράγοντες ιδιαίτερης σημασίας όπως η εξίσωση Tafel, οι παράμετροι της καθώς και οι αντιστάσεις που απαρτίζουν αυτό το υποσύστημα. Εκτός από τα παραπάνω, παρουσιάζονται και τυπικά εύρη χαρακτηριστικών λειτουργίας (θερμοκρασία, πίεση, παροχή αερίων κ.α.) καθώς και επεξηγήσεις όλων των μεταβλητών που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά της συσκευής [24].

Σε επόμενο άρθρο αναλύθηκε μία παρόμοια μέθοδος μοντελοποίησης μίας κυψέλης καυσίμου τύπου PEM με χρήση ενός απλού αναλυτικού μοντέλου. Η προτεινόμενη μέθοδος συνίσταται από μία διαδικασία δύο βημάτων (two – step) για τον καθορισμό βασικών παραμέτρων, όπως η κλίση Tafel b , η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής j^* (exchange current density), ο συντελεστής μεταφοράς φόρτισης a (charge transfer coefficient) και η αντίσταση των κελιών της κυψέλης R_{cell} . Το άρθρο αυτό, από τους συγγραφείς A. A. Kulikovskiy, H. F. Oetjen και Ch. Wannek, τονίζει την απλότητα και την ακρίβεια αυτού του μοντέλου, ιδιαίτερως στην περίπτωση μίας κυψέλης καυσίμου τύπου PEM Υψηλής Θερμοκρασίας όπου η μοντελοποίηση είναι λιγότερο πολύπλοκη σε σχέση με μία συμβατική κυψέλη καυσίμου τύπου PEM χαμηλής θερμοκρασίας. Για την πειραματική επικύρωση του μοντέλου αυτού χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές ένα κελί, σχεδιασμένο από εκείνους, και το προτεινόμενο μοντέλο είναι σύμφωνο με τα πειραματικά αποτελέσματα [51].

Συνεχίζοντας, οι συγγραφείς S. Touré, A. Konaté, D. Traoré και D. Fofana στο επιστημονικό τους άρθρο επιδόθηκαν στην πειραματική ανάλυση του charge transfer coefficient a μίας αντιστρεπτής κυψέλης καυσίμου τύπου PEM με χρήση της μεθόδου πολικότητας ενεργοποίησης (activation polarization method) και της μεθόδου ακαθόριστου πολλαπλασιαστή του Lagrange (Lagrange's undetermined multiplier method). Η πειραματική διάταξη με ονομασία Hydrocar που χρησιμοποιήθηκε για τη διεκπεραίωση πειραμάτων σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επικυρώνουν την υψηλή ακρίβεια και την αξιοπιστία της μεθόδου του Lagrange για τον καθορισμό του συντελεστή a και για την επίδραση της θερμοκρασίας στις τιμές που λαμβάνει ($0 - 1 =$ τυπικό εύρος τιμών με βάση τη βιβλιογραφία). Συγκεκριμένα, με αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε και

αύξηση του συντελεστή α υποδεικνύοντας την ευαισθησία της κυψέλης καυσίμου και των ηλεκτροχημικών διεργασιών της στη μεταβολή της θερμοκρασίας που επικρατεί [52].

Το τελευταίο άρθρο, με συγγραφείς τους Achim Kampker, Heiner Heimes, Mario Kehrler, Sebastian Hagedorn, Philipp Reims και Oliver Kaul του RWTH Aachen University, επικεντρώνεται στα υψηλά κατασκευαστικά κόστη των κυψελών καυσίμου τύπου PEM τα οποία παρεμποδίζουν τη διείσδυση αυτής της τεχνολογίας στην αγορά ενέργειας, με απώτερο σκοπό την μείωση των εκπομπών των μεταφορών και όχι μόνο. Οι ερευνητές προσεγγίζουν το θέμα μέσω ενός Process – Based Cost Model (PBCM) για τη δημιουργία ενός ικανού υπολογιστικού εργαλείου και για την ανάδειξη τρόπων μείωσης του κόστους στις επιμέρους συσκευές, λειτουργώντας σε ένα ελλειμματικό - ως προς την ακρίβεια του πραγματικού κόστους – περιβάλλον. Κύριος στόχος του ερευνητικού αυτού έργου είναι η προώθηση τακτικών μείωσης των αντιτίμων παραγωγής κυψελών καυσίμου τύπου PEM και η επιβεβλημένη εκκίνηση αποφασιστικών και καινοτόμων επενδύσεων και αναλύσεων, κυρίως πειραματικών και παραγωγικών, για τη επίτευξη της ανταγωνιστικότητας αυτής της τεχνολογίας στην οικονομική, ενεργειακή αλλά και περιβαλλοντική αγορά [53].

4.6.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Αρχικά, για τη διαμόρφωση του μοντέλου κυψέλης καυσίμου τύπου PEM χρειάζεται, κατά βάση, η καμπύλη ρεύματος (I) – τάσης (V) για ένα κελί (cell), ενώ η τάση για την «στοίβα» κελιών μπορεί να υπολογιστεί μέσω του πολλαπλασιασμού της τάσης του ενός κελιού με τον αριθμό των κελιών που είναι συνδεδεμένα σε σειρά εντός της κυψέλης ($n_c = 22$, $A = 47 \text{ cm}^2$).

Τα χαρακτηριστικά $I - V$ μίας PEM κυψέλης καυσίμου δύνανται να μοντελοποιηθούν μέσω μίας εμπειρικής σχέσης η οποία λαμβάνει υπόψιν τη συνολική υπέρταση λόγω της εξίσωσης Tafel, τις αντιστάσεις της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και τους περιορισμούς όσον αφορά τη μεταφορά μάζας εντός της συσκευής. Αυτή η σχέση που χρησιμοποιείται και στην παρούσα ανάλυση είναι η εξής:

$$V_{cell} = V_0 - b \log J - \rho J - ce^{dJ} \text{ (πλήρης κάλυψη εύρους τιμών } J) \quad 4.6.1$$

[24]

όπου:

V_{cell} = τελική τάση ανά κελί, V

V_0 = τάση ανοιχτού κυκλώματος (open – circuit) ανά κελί, V

J = πυκνότητα ρεύματος ($J = I/A$, όπου I = ένταση ρεύματος και A = επιφάνεια ηλεκτροδίου),
 A/cm^2

b = κλίση Tafel, V

ρ = αντίσταση ανά μονάδα επιφάνειας, Ωcm^2

c = παράμετρος συσχετισμένη με την υπέρταση λόγω περιορισμών μεταφοράς μάζας, V

d = παράμετρος συσχετισμένη με την υπέρταση λόγω περιορισμών μεταφοράς μάζας, $A^{-1} cm^2$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω εξίσωσης στο δεξί μέρος μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$V \cong V_{rev} + b \log J_0 \quad 4.6.2$$

[24]

όπου V_{rev} είναι η αναστρέψιμη τάση και b και J_0 είναι παράμετροι της εξίσωσης Tafel.

Ο δεύτερος όρος στο δεξί μέρος της βασική εξίσωσης είναι η εξίσωση Tafel για πυκνότητα ρεύματος μεγαλύτερη του μηδενός. Ο τρίτος όρος ρ σχετίζεται κατά κύριο λόγο με την ωμική αντίσταση της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων ανά μονάδα επιφάνειας, με δευτερεύουσες επιρροές να θεωρούνται για το R η αντίσταση μεταφοράς φόρτισης της αντίδρασης υδρογόνου – οξυγόνου και η αντίστασης μεταφοράς μάζας σε ενδιάμεσες τιμές πυκνότητας ρεύματος J [24].

Ο τέταρτος και τελευταίος όρος στην παραπάνω εξίσωση σχετίζεται ξανά με το φαινόμενο της υπέρτασης και υπάρχει για να εμπεριέχεται και η πειραματικά παρατηρηθείσα απόκλιση από τη γραμμικότητα σε υψηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος λόγω των περιορισμών μεταφοράς μάζας. Ωστόσο, αν και υπάρχει άμεση σχέση ανάμεσα στις παραμέτρους c και d και τη σύσταση των αντιδρώντων και την πυκνότητα ρεύματος, δεν υπάρχει καμία εμφανής επίδραση της θερμοκρασίας ή της πίεσης επ' αυτών [24].

Λόγω της πολυπλοκότητας της μοντελοποίησης μέσω της αρχικής εξίσωσης, κυρίως εξαιτίας αυτής της άρσης της γραμμικότητας σε υψηλά ρεύματα, η απεικόνιση της καμπύλης $I - V$ με απόλυτη λεπτομέρεια είναι πολύ δύσκολη και χρονοβόρα. Ο στόχος αυτής της μοντελοποίησης λοιπόν μετατοπίζεται προς την ακριβή απεικόνιση της καμπύλης για τιμές του J από 0 έως ένα ενδιάμεσο εύρος, όπου και λειτουργεί στην πραγματικότητα η κυψέλη καυσίμου. Οπότε, η εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$V = V_0 - b \log J - \rho J \text{ (περιορισμένη κάλυψη εύρους τιμών } J) \quad 4.6.3$$

[24]

Όπως θα φανεί και παρακάτω η εξίσωση αυτή (δομή παρεμφερής με αυτήν του ηλεκτρολύτη) είναι εξαιρετικά ικανή και ακριβής για λόγους προσομοίωσης του υποσυστήματος της κυψέλης. Ο βασικότερος λόγος για αυτό είναι το γεγονός ότι, για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, υπάρχει ένα σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), πέραν του οποίου δε συμφέρει να λειτουργεί η συσκευή.

Τώρα, πρέπει να περιγραφούν οι μέθοδοι προσδιορισμού ορισμένων σημαντικών παραμέτρων των παραπάνω εξισώσεων. Αρχικά, η παράμετρος b μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$b = \frac{RT}{aF} \quad 4.6.4$$

όπου:

R = παγκόσμια σταθερά αερίων = 8.314 J/molK

T = θερμοκρασία λειτουργίας, K

a = συντελεστής μεταφοράς φόρτισης (charge transfer) = 0.35

F = σταθερά Faraday = 96485 C/mol

Στην παραπάνω εξίσωση εμφανίζεται και ο συντελεστής a ο οποίος εξαρτάται και από τη θερμοκρασία εκτός από την ωμική πολικότητα, την πολικότητα ενεργοποίησης και τα χαρακτηριστικά $I - V$ της κυψέλης καυσίμου, σύμφωνα με τη μέθοδο του Lagrange [52]. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία λαμβάνεται σταθερός και μόνο η παράμετρος b μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία διότι θα χρειαζόταν και πειραματική προσέγγιση για την καθορισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας και δε υπάρχει τέτοια ευχέρεια. Επιπλέον, για τον υπολογισμό της V_0 , χρειάστηκε και η παράμετρος J_0 (exchange current density) η οποία λήφθηκε σταθερή μέσω επιστημονικού άρθρου [51].

Ακόμη, είναι γνωστό ότι με αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα κύκλωμα παρατηρείται αύξηση της αντίστασης. Αυτή η σχέση μεταξύ των δύο θεωρείται ότι εκφράζεται μέσω της εξής σχέσης:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T) \quad 4.6.5$$

όπου:

ρ = τελική αντίσταση ανά μονάδα επιφάνειας, $\Omega \text{ cm}^2$

ρ_0 = αρχική αντίσταση αναφοράς ανά μονάδα επιφάνειας, $\Omega \text{ cm}^2$

α = συντελεστής θερμοκρασίας = $-0.005 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

ΔT = διαφορά τελικής θερμοκρασίας με θερμοκρασία αναφοράς = $T - T_{\text{ref}} = T - 298 \text{ K}$

Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι ο συντελεστής θερμοκρασίας α είναι σταθερός για τιμές θερμοκρασίας από 0 έως $120 \text{ } ^\circ\text{C}$ και λαμβάνει την τιμή που θεωρήθηκε από πάνω για το υλικό της μεμβράνης που θεωρήθηκε ότι είναι το Nafion 117[®] [54]. Όμως, για να επιτευχθεί ο αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας (NTC) το υλικό αυτό εμποτίστηκε με πολυανανιλίνη (Polyaniline – PANI) ώστε να αυξηθεί η αγωγιμότητα της κυψέλης καυσίμου, να βελτιωθεί η απόδοση της, να αυξηθεί η ανθεκτικότητα και η χημική της σταθερότητα και η αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω του αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας α και άρα λόγω μείωσης της εσωτερικής αντίστασης, να έχει θετική επίδραση στην ισχύ που παράγει η κυψέλη καυσίμου {[55],[56]}. Αυτή η σύνθεση ονομάστηκε PANI/N117 και αυτή η διαδικασία εμποτισμού (doping) ενός υλικού είναι συνήθης τακτική στην έρευνα των PEMFC επειδή καθίσταται δυνατή η αξιοποίηση των ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών διαφορετικών υλικών για τη δημιουργία μίας πλέον αποδοτικής συσκευής.

Τώρα, ο στοιχειομετρικός ρυθμός παροχής των αερίων υδρογόνου και οξυγόνου που παρέχεται στην κυψέλη μπορεί να υπολογισθεί μέσω της σχέσης:

$$\dot{n}_{H_2} = 2\dot{n}_{O_2} = \frac{n_c I}{zF} \quad 4.6.6$$

όπου:

n_{H_2}, n_{O_2} = στοιχειομετρικός ρυθμός παροχής υδρογόνου και οξυγόνου αντίστοιχα, mol/s

n_c = αριθμός κελιών συνδεδεμένα σε σειρά, -

z = αριθμός ηλεκτρονίων ανά μολ νερού = 2

F = σταθερά Faraday = 96485 C/mol

I = ένταση ρεύματος, A

Ωστόσο, σε μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου τύπου PEM, ο πραγματικός ρυθμός παροχής υδρογόνου είναι υψηλότερος από αυτόν της στοιχειομετρίας. Λόγω αυτού, το εναπομείναν υδρογόνο που δεν καταναλώθηκε από τη συσκευή για ένα χρονικό διάστημα πρέπει να απομακρυνθεί. Αυτή η απώλεια υδρογόνου μειώνει επομένως την απόδοση Faraday η οποία δύναται να υπολογισθεί από την εξής σχέση:

$$\eta_F = \frac{\dot{n}_{H_2, \text{stoich}}}{\dot{n}_{H_2, \text{actual}}} \quad 4.6.7$$

όπου:

$n_{H_2,stoich}$ = στοιχειομετρικός ρυθμός παροχής υδρογόνου, mol/s

$n_{H_2,actual}$ = πραγματικός ρυθμός παροχής υδρογόνου, mol/s

Τέλος, η πρακτική απόδοση της κυψέλης καυσίμου, ή αλλιώς η ενεργειακή της απόδοση, για την περίπτωση Χαμηλότερου (LHV) και Υψηλότερου (HHV) Θερμικού Δυναμικού του υδρογόνου, ορίζεται ως εξής:

$$\eta_{e_{HHV}} = \frac{V_{cell}}{V_{tn}} \quad 4.6.8$$

$$\eta_{e_{LHV}} = \frac{V_{cell}}{V_{rev}} \quad 4.6.9$$

[57]

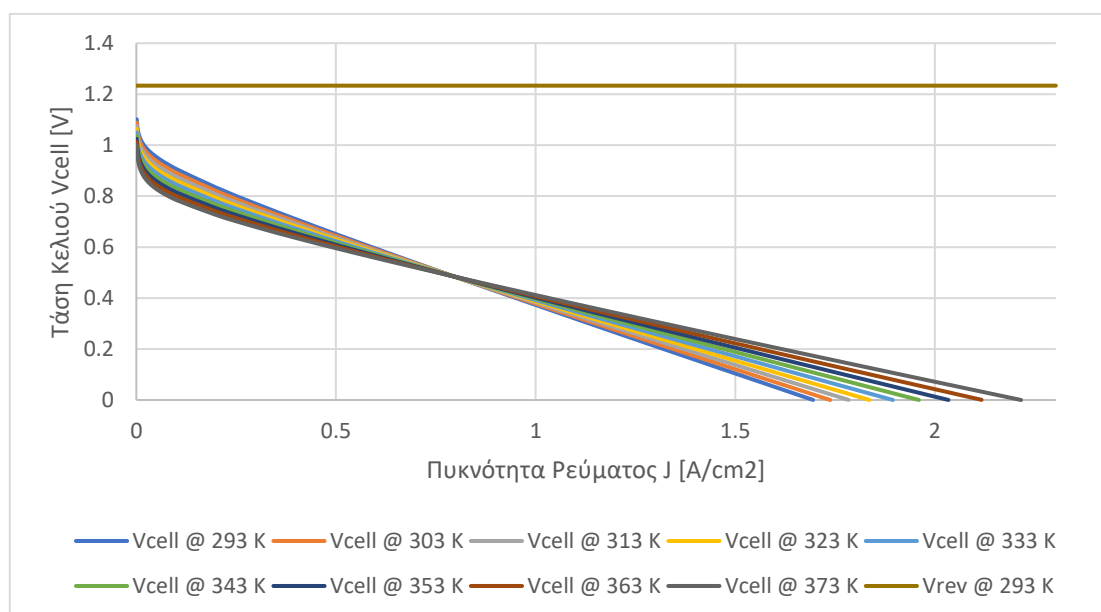
4.6.3 Προσομοίωση Μαθηματικού Μοντέλου

Αρχικά, η κυψέλη καυσίμου τύπου PEM, πάνω στην οποία βασίστηκε και η προσομοίωση αυτού του υποσυστήματος, χαρακτηρίζεται από μία ονομαστική ισχύ 0.415 kW στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP) με τιμές για την πυκνότητα ρεύματος και για την τελική τάση όλης της συσκευής στα 1.002 A/cm² και 8.821 V, αντιστοίχως. Επιπλέον, η θερμοκρασία λειτουργίας της είναι οι 353 K και η πίεση λειτουργίας της λαμβάνει την τιμή των 5 bar. Ωστόσο, για να λειτουργήσει το μαθηματικό μοντέλο, χρειάστηκε καθορισμός των τιμών των παραμέτρων των σχέσεων που προηγήθηκαν. Οι τιμές που θεωρήθηκαν ή υπολογίστηκαν παρατίθενται μαζεμένες στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 11 Τιμές βασικών παραμέτρων και συντελεστών προσομοίωσης μαθηματικού μοντέλου

PEM Κυψέλη Καυσίμου		
j_0	1.5E-05	A/cm ²
α	0.35	-
ρ_0	0.5	$\Omega \text{ cm}^{-2}$
a	-0.005	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
n_c	32	-
A	47	cm ²
T_{ref}	298	K
R	8.314	J K ⁻¹ mol ⁻¹
F	96485	C/mol

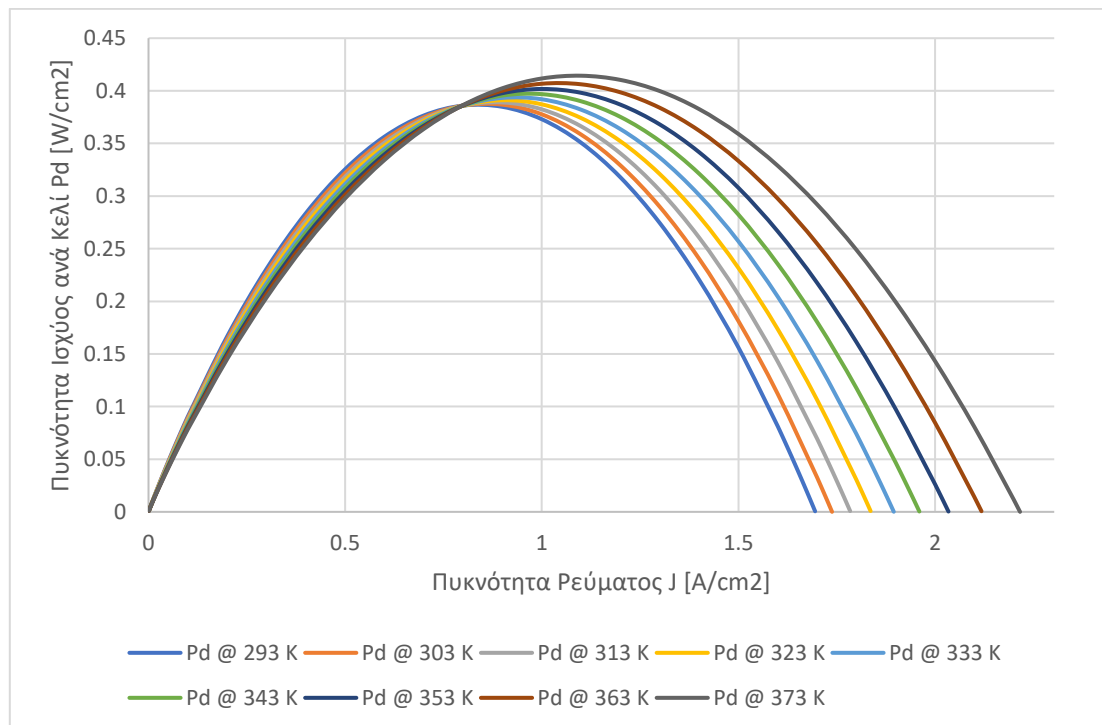
Εν συνεχεία, παρατίθενται ορισμένοι πίνακες και διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μαθηματικού μοντέλου. Η προσέγγιση της παρούσας ανάλυσης βασίστηκε στις μεταβολές των τιμών των σημαντικών μεταβλητών, όπως η κλίση Tafel b , η εσωτερική αντίσταση της συσκευής ανά επιφάνεια R_s , η απόδοση Faraday, η τάση της συσκευής V και η παραγόμενη ισχύς P , συναρτήσει πρωτίστως της θερμοκρασίας λειτουργίας T και της πυκνότητας ρεύματος J . Πρέπει να σημειωθεί ότι η επίδραση της πίεσης δε συμπεριλήφθηκε στις μεταβολές αυτές λόγω της ελάχιστης έως ανεπαρκούς βιβλιογραφίας που πραγματεύεται το συγκεκριμένο ζήτημα. Ωστόσο, μία αύξηση της πίεσης λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, έχει γενικώς θετικό αντίκτυπο για την ενεργειακή απόδοση της συσκευής [24].



Διάγραμμα 38 Μεταβολή τελικής τάσης κελιού συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας

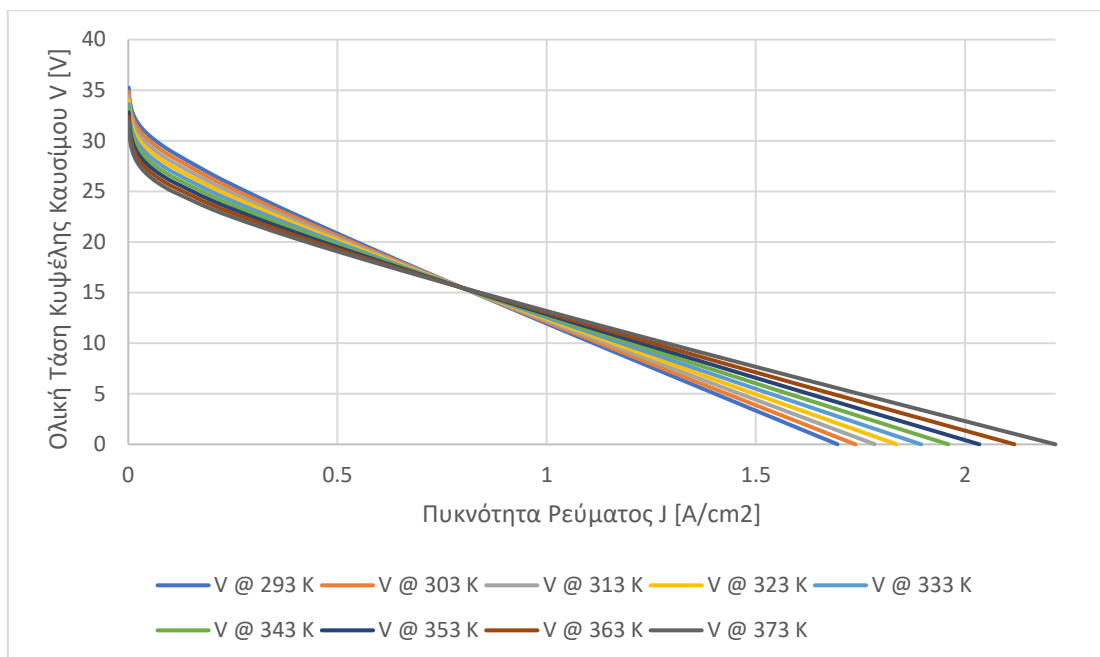
Ο λόγος που η τελική τάση του κελιού αποκλίνει τόσο από την ιδανική τιμή της αναστρέψιμης τάσης V_{rev} είναι η υπέρταση που αναπτύσσεται, όπως και στην περίπτωση του ηλεκτρολύτη. Τώρα, όπως φαίνεται, η τελική τάση ενός κελιού της κυψέλης καυσίμου παρατηρείται πως επηρεάζεται αρνητικά (μειώνεται) με την αύξηση της θερμοκρασίας για χαμηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος, ενώ επηρεάζεται θετικά (αυξάνεται) με την αύξηση της θερμοκρασίας για υψηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος. Τα παραπάνω συμβαίνουν για δύο λόγους: την υπέρταση συγκέντρωσης και την υπέρταση ενεργοποίησης της κυψέλης. Πιο συγκεκριμένα, και οι δύο αυτές συνιστώσες της ολικής υπέρτασης του κυκλώματος της συσκευής μειώνονται με αύξηση της θερμοκρασίας έως τους 100 °C, ενώ μεταξύ 80 και 120 °C επικρατεί μία αστάθεια όσον αφορά την υπέρταση ενεργοποίησης [58]. Επομένως, η υπέρταση

συγκέντρωσης υπερκαλύπτει τις υπόλοιπες απώλειες για υψηλές τιμές του J , εξελίσσεται εκθετικά και αυξάνεται έτσι η διαφορά μεταξύ της χαμηλής υπέρτασης στις υψηλές θερμοκρασίες και της υψηλής υπέρτασης στις χαμηλές. Ακόμη, αν και στις χαμηλές θερμοκρασίες η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι μεγαλύτερη, η διαφορά αυτή εξισορροπείται από το γεγονός ότι η εσωτερική αντίσταση R_s μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Τα προαναφερθέντα αποτελούν επιβεβαίωση του γεγονότος ότι η προτιμητέα θερμοκρασία λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου τύπου PEM είναι οι 80 °C, ενώ καταδεικνύουν την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας και λόγω άλλων προβλημάτων όπως αύξηση της πίεσης κορεσμένου ατμού και ταυτόχρονη μείωση του υδάτινου περιεχομένου της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων [59].

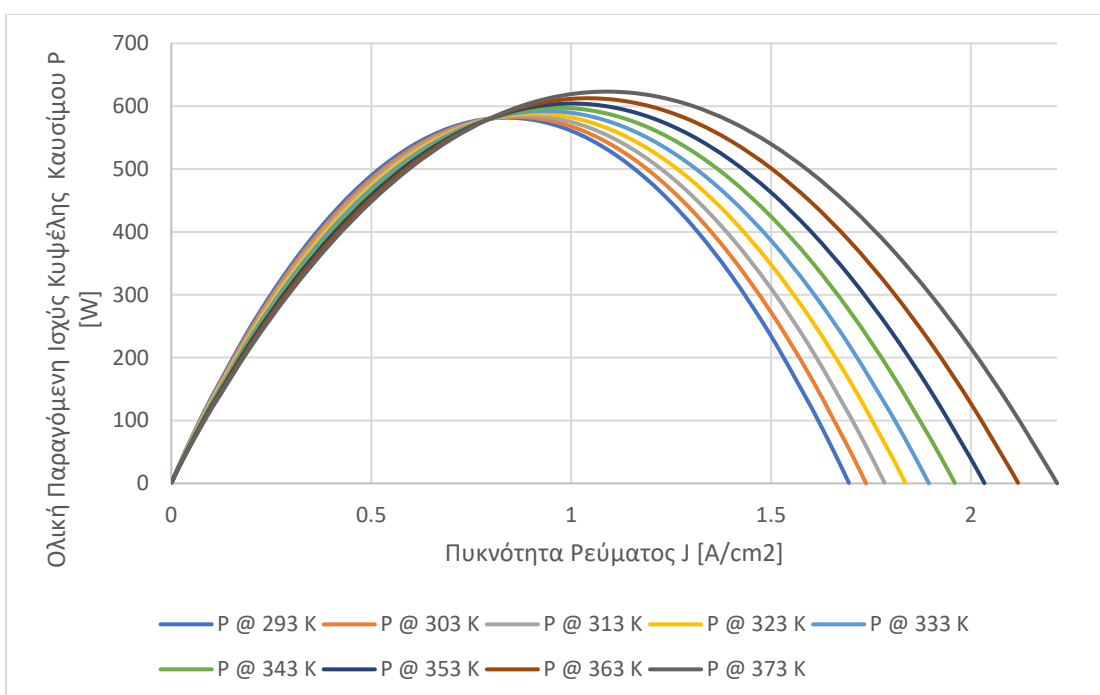


Διάγραμμα 39 Μεταβολή πυκνότητας ισχύος κελιού συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας

Στο Διάγραμμα 39 είναι εμφανές ότι το Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP) μετατοπίζεται προς τις μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας ρεύματος με αύξηση της θερμοκρασίας και αυτό συμβαίνει πάλι λόγω της υπέρτασης αφού η πυκνότητα ισχύος υπολογίζεται με πολλαπλασιασμό της τάσης και της πυκνότητας ρεύματος και άρα τα χαρακτηριστικά των καμπυλών στο Διάγραμμα 38 περιγράφουν και αυτό το μέγεθος. Επομένως, με αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας ισχύος και άρα της ισχύος που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου σε εκείνο το σημείο.



Διάγραμμα 40 Μεταβολή τελικής τάσης κυψέλης συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας



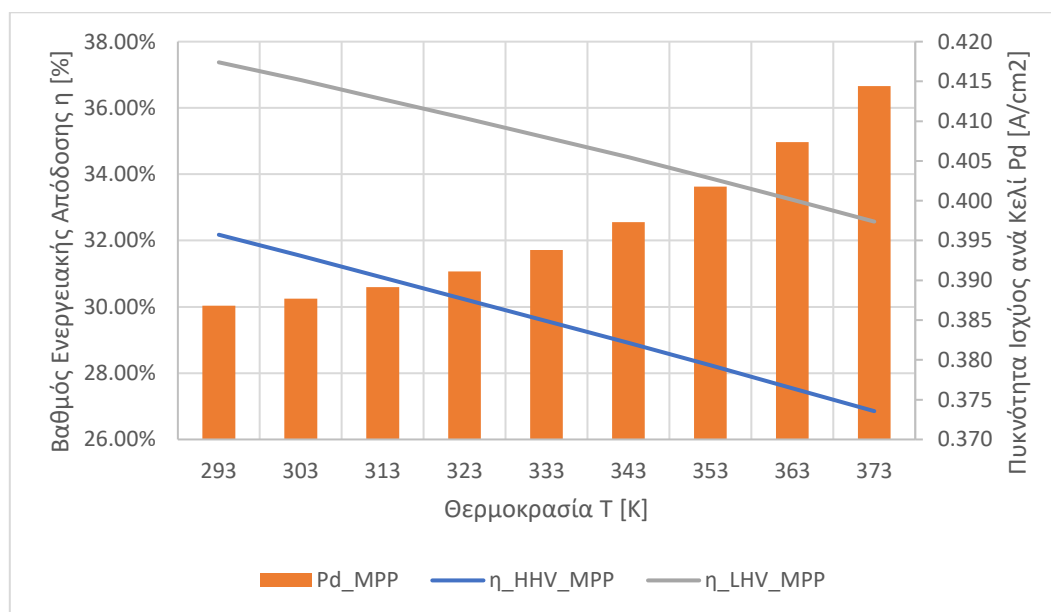
Διάγραμμα 41 Μεταβολή πυκνότητας ισχύος κυψέλης συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος με περιπτώσεις σταθερής θερμοκρασίας

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για την περίπτωση του ενός κελιού ισχύουν ακριβώς και στην περίπτωση όλης της κυψέλης καυσίμου PEM, με τη μόνη διαφορά ότι η τάση ενός κελιού έχει πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό των κελιών n_c αφού όλα είναι συνδεδεμένα σε σειρά εντός της συσκευής.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πίνακας 12 Μεταβολή βασικών στοιχείων συναρτήσει θερμοκρασίας και πυκνότητας ρεύματος στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP)

T	J _{MPP}	V _{tn}	V _{rev}	V _{cell,MPP}	η _{HHV,MPP}	η _{LHV,MPP}	P _d	P _{cell}
K	A/cm ²	V	V	V	-	-	W/cm ²	W
293	0.859	1.433	1.234	0.461	32.18%	37.38%	0.387	18.180
303	0.880	1.431	1.225	0.451	31.55%	36.84%	0.388	18.223
313	0.905	1.429	1.217	0.441	30.88%	36.26%	0.389	18.289
323	0.932	1.427	1.208	0.431	30.23%	35.69%	0.391	18.383
333	0.963	1.424	1.200	0.421	29.57%	35.10%	0.394	18.510
343	0.997	1.422	1.192	0.411	28.92%	34.51%	0.397	18.674
353	1.036	1.420	1.184	0.401	28.23%	33.88%	0.402	18.883
363	1.081	1.418	1.175	0.391	27.55%	33.23%	0.407	19.147
373	1.132	1.416	1.167	0.380	26.85%	32.57%	0.414	19.477



Διάγραμμα 42 Μεταβολή ενεργειακού βαθμού απόδοσης HHV και LHV και πυκνότητας ισχύος ανά κελί συναρτήσει θερμοκρασίας στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP)

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό πως ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο αυτό συμβαίνει σε αυτήν την περίπτωση διότι η μέτρηση της τάσης γίνεται κάθε φορά στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP) που αντιστοιχεί στην κάθε θερμοκρασίας. Στην ανάλυση αυτή, αναφέρθηκε ότι η εσωτερική αντίσταση είναι μειούμενη με την αύξηση της θερμοκρασίας και άρα, με την αύξηση της θερμοκρασίας, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας ρεύματος J και συνεπώς, μείωση της τάσης V. Παρόλο την μείωση

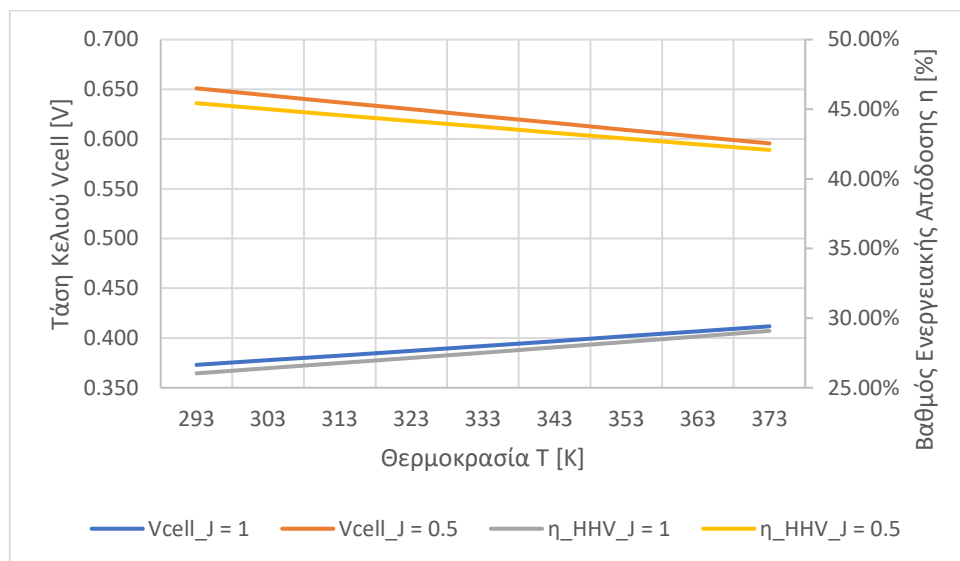
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

αυτήν της τάσης, η αύξηση του J υπερνικά αυτήν τη μείωση, με αποτέλεσμα η πυκνότητα ισχύος για το εκάστοτε MPP της εκάστοτε θερμοκρασίας T να αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος και άρα, η παραγόμενη ισχύς ανά κελί με αύξηση του T , όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα.

Όμως, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, σε ερευνητική και πρακτική κλίμακα, το MPP δεν προτιμάται ως σημείο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου για το λόγο ότι η απόδοση είναι αρκετά μειωμένη σε σχέση με τη λειτουργία του πριν από αυτό εξαιτίας της εκθετικής αύξησης της υπέρτασης συγκέντρωσης, των περιορισμών μεταφοράς μάζας μέσω των κελιών και της πτώσης της μερικής πίεσης των αερίων σε αρκετά υψηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος [60]. Συνεπώς, το σημείο λειτουργίας της κυψέλης βρίσκεται στην περιοχή χαμηλότερων τιμών πυκνότητας ρεύματος, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης, συγκριτικά με το υψηλό εύρος.

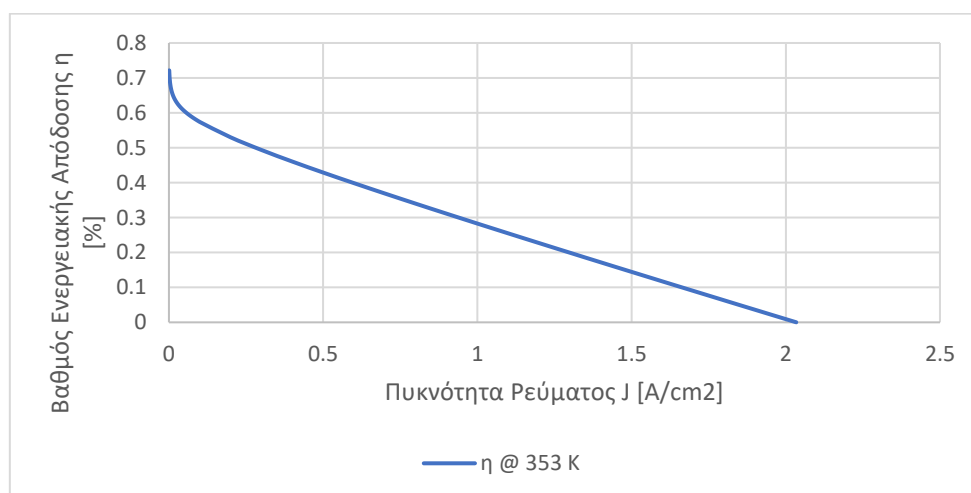
Πίνακας 13 Μεταβολή τάσης κελιού και βαθμού ενεργειακής απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασίας υπό σταθερή πυκνότητα ρεύματος

T	V_{cell,J = 1}	V_{cell,J = 0.5}	η_{HHN,J = 1}	η_{HHN,J = 0.5}
K	V	V	-	-
293	0.373	0.651	26.03%	45.43%
303	0.378	0.644	26.40%	45.00%
313	0.382	0.637	26.77%	44.58%
323	0.387	0.630	27.14%	44.15%
333	0.392	0.623	27.52%	43.73%
343	0.397	0.616	27.90%	43.31%
353	0.402	0.609	28.29%	42.90%
363	0.407	0.602	28.68%	42.48%
373	0.412	0.596	29.08%	42.07%



Διάγραμμα 43 Διαγραμματική απεικόνιση μεταβολής τάσης κελιού και βαθμού ενεργειακής απόδοσης συναρτήσει θερμοκρασίας υπό σταθερή πυκνότητα ρεύματος

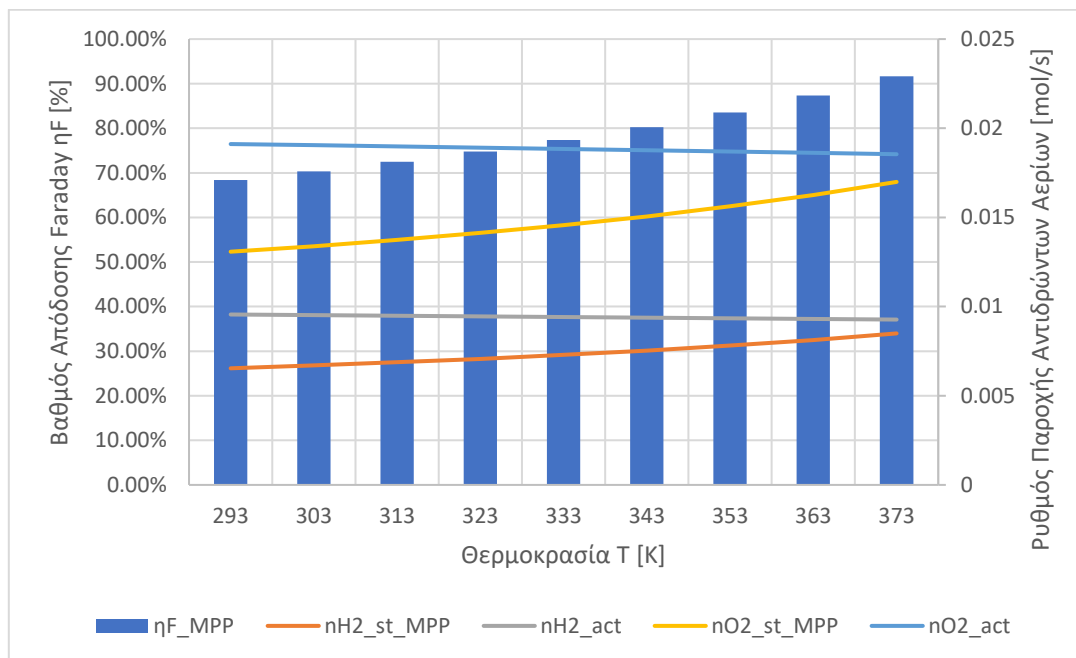
Το ακριβώς από πάνω διάγραμμα επιβεβαιώνει το γεγονός ότι όντως ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου είναι πολύ υψηλότερος όταν η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει την τιμή $J = 0.5 \text{ A/cm}^2$ η οποία είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν στο MPP της εκάστοτε θερμοκρασίας. Ακόμη, η μειούμενη τάση του βαθμού απόδοσης με αύξησης της θερμοκρασίας για χαμηλή πυκνότητα ρεύματος εξηγείται από το γεγονός ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι αρκετά μεγαλύτερη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και αυτό επηρεάζει την τελική τάση προφανώς. Από την άλλη, στην περίπτωση ακόμη μεγαλύτερων τιμών πυκνότητας ρεύματος από αυτήν στο MPP, όπως για $J = 1 \text{ A/cm}^2$, ο βαθμός απόδοσης μειώνεται περαιτέρω εξαιτίας της εκθετικής αύξησης της συνιστώσας συγκέντρωσης της υπέρτασης της κυψέλης, όπως και αναφέρθηκε και παραπάνω.



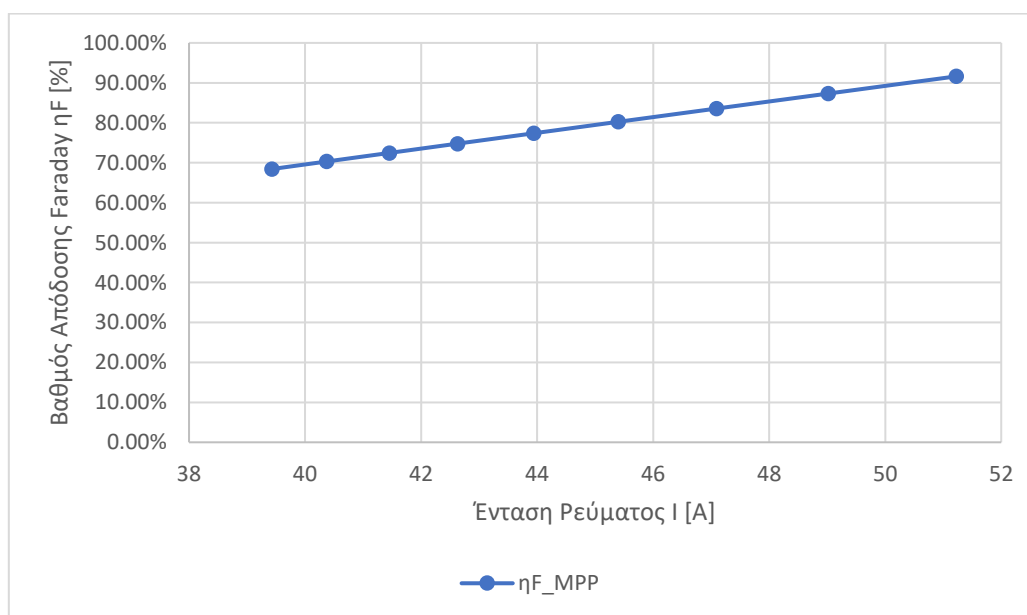
Διάγραμμα 44 Μεταβολή του βαθμού ενεργειακής απόδοσης συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος με σταθερή θερμοκρασία 353 K

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως φαίνεται στο από πάνω διάγραμμα, ο βαθμός ενεργειακής απόδοσης συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος ακολουθεί την πορεία των καμπυλών στο Διάγραμμα 38 επειδή βασίζεται εξολοκλήρου στις μεταβολές της τελικής τάσης.



Διάγραμμα 45 Μεταβολή βαθμού απόδοσης Faraday και ρυθμού παροχής αντιδρώντων αερίων συναρτήσει θερμοκρασίας στο εκάστοτε Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP)



Διάγραμμα 46 Μεταβολή βαθμού απόδοσης Faraday συναρτήσει έντασης ρεύματος με σταθερή θερμοκρασία 353 K

Ο βαθμός απόδοσης Faraday αποτελεί ένα πλέον σημαντικό στοιχείο που χαρακτηρίζει την κυψέλη καυσίμου και ουσιαστικά εκφράζει την αποτελεσματικότητα των ηλεκτροχημικών

αντιδράσεων όσον αφορά τη μετατροπή της χημικής ενέργειας (παρεχόμενο υδρογόνο) σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα, από το Διάγραμμα 45 γίνεται προφανές ότι αυτό το στοιχείο επηρεάζεται θετικά από την αύξηση της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου στο εκάστοτε MPP αλλά και σε γενική κλίμακα. Αυτό συμβαίνει αρχικά λόγω της εξάρτησης των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων από τη θερμοκρασία αφού με αύξηση του T παρατηρείται αύξηση του ρυθμού αντίδρασης, όπως καταδεικνύει και η αυξανόμενη τιμή του ρυθμού κατανάλωσης αντιδρώντων αερίων με αύξηση της θερμοκρασίας στο Διάγραμμα 45. Επί πρόσθετα, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, για αύξηση θερμοκρασίας σε λογικό εύρος (< 120 °C), η συνιστώσα ενεργοποίησης της υπέρτασης αλλά και η εσωτερική αντίσταση βαίνουν μειούμενες και άρα, βελτιώνεται η απόδοση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και αυξάνεται η παραγόμενη ισχύς για συγκεκριμένο διάστημα [58]. Ακόμη, πάλι για αύξηση θερμοκρασίας σε λογικό εύρος (υπέρβαση αυτού οδηγεί σε μείωση του περιεχομένου της μεμβράνης σε νερό και αυξάνει την εσωτερική αντίσταση!), οι υψηλότερες θερμοκρασίες διευκολύνουν τη διαχείριση του υδάτινου περιεχομένου της κυψέλης καυσίμου και άρα σε υψηλότερο ρυθμός κατανάλωσης αντιδρώντων και έτσι, αυξημένη απόδοση Faraday [59]. Τέλος, στο Διάγραμμα 46 φαίνεται η θετική μεταβολή του βαθμού απόδοσης Faraday συναρτήσει της έντασης ρεύματος I (εμμέσως άρα της θερμοκρασίας) και το γεγονός αυτό τεκμηριώνεται μέσω της αυξανόμενης έντασης ρεύματος, με την αύξηση της θερμοκρασίας, του εκάστοτε MPP.

5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η αναζήτηση νέων, επαναστατικών λύσεων και αποδοτικών καινοτομιών βρίσκεται αναμφιβόλως στο επίκεντρο της προσοχής παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια και με την περαιτέρω εξάπλωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αναβαθμισμένων φορέων και μέσων αποθήκευσης της, μία μελλοντική πραγματικότητα δίχως ενεργειακά τέλματα και δοκιμασίες φαντάζει όλο και πιο προσπελάσιμη. Μία από τις πρακτικές τεχνολογίες που προωθούνται κατά κόρον τις τελευταίες δεκαετίες συνιστά η βελτιστοποίηση στο σχεδιασμό των συστημάτων παραγωγής ενέργειας, με ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα, όπως της παρούσας ανάλυσης, να φέρει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσον αφορά αυτήν την τεχνολογία.

Η πρόθεση μίας βελτιστοποιητικής ανάλυσης ενός συστήματος βασίζεται κατά κύριο λόγο στο συγχρονισμό όλων των υποσυστημάτων, όπως των φωτοβολταϊκών, του ηλεκτρολύτη και της κυψέλης καυσίμου μεταξύ άλλων. Αυτή η ανάλυση διεκπεραιώνεται λοιπόν με χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων ελέγχου και προσομοίωσης και η εφαρμογή τους γίνεται εξολοκλήρου σε υπολογιστικό περιβάλλον υπολογιστή από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα. Ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι το HOMER Pro το οποίο χρησιμοποιήθηκε και παρακάτω, ορμώμενοι από τη βιβλιογραφία, για να δημιουργηθεί μία τεχνοοικονομική ανάλυση του βασικού αλλά και άλλων συστημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ώστε να προσεγγιστεί, όσο είναι δυνατόν, το «ιδανικό» σύστημα για τις συνθήκες που εξετάζονται. Απώτερος σκοπός αυτού του «ιδανικού» συστήματος είναι να μεγιστοποιεί την απόδοση και την αξιοπιστία όλου του συστήματος, με ταυτόχρονη εκμηδένιση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος κατά τη λειτουργία του και τη μείωση του απαιτούμενου κόστους της εγκατάστασης και της συντήρησης του.

5.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφία βρίθει από επιστημονικά άρθρα που πραγματεύονται τον τεχνοοικονομικό σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος ή ενός εκ των υποσυστημάτων του. Ορισμένα ασχολούνται κατεξοχήν με την οικονομική ανάλυση των συσκευών και παρουσιάζουν έναν «χάρτη» με τις τωρινές και τις μελλοντικές, προβλεπόμενες διακυμάνσεις, ενώ αλλά ασχολούνται την πλήρη οικονομική ανάλυση και βελτιστοποίηση, με προγράμματα όπως το MATLAB και το HOMERPro.

Αρχικά, το επιστημονικό άρθρο των συγγραφέων Paolo Marocco, Domenico Ferrero, Andrea Lanzini και Massimo Santarelli αναλύει την περίπτωση διαφόρων απομακρυσμένων

συστημάτων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας που συνίστανται από μπαταρίες και αποθηκευτικά μέσα υδρογόνου ώστε να βρουν το πιο αποδοτικό οικονομικά για μία κοινότητα, με ταυτόχρονη περιγραφή των οικονομικών και τεχνικών χαρακτηριστικών της κάθε συσκευής που απαρτίζει το σύστημα αυτό. Αποδεικνύουν διαγραμματικά, με χρήση του Particle Swarm Algorithm (PSO), ότι ένα σύστημα βασισμένο στο υδρογόνο και στην ηλιακή ενέργεια είναι εντελώς αυτόνομο και λιγότερο κοστοβόρο, με χαμηλότερο LCOE (Levelized Cost of Electricity), συγκριτικά με τη χρήση γεννητριών πετρελαίου και ηλεκτροδοτικού ιστού (grid), όμως αυτή η οικονομική βιωσιμότητα βασίζεται πρώτα απ' όλα στις τιμές των καυσίμων και της κλιματικής αλλαγής. Υποδεικνύουν επίσης ότι τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα αναμένεται να γίνουν πιο ανταγωνιστικά σε οικονομικό πλαίσιο στο μέλλον [27].

Εν συνεχεία, οι ερευνητές Latifa El Boujdaini, Francisco Jurado, Ahmed Mezrhab, Mohammed Amine Moussaoui και David Vera χρησιμοποίησαν πληθώρα προγραμμάτων στην ανάλυση του για τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα υποσυστήματα που το απαρτίζουν είναι τα φωτοβολταϊκά, οι μπαταρίες, ο ηλεκτρολύτης, η κυψέλη καυσίμου και η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι το SAM για την εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, το MATLAB για την πρόβλεψη της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών και το HOMERPro για την διεκπεραίωση της τεχνοοικονομικής μελέτης. Κατέληξαν λοιπόν στο συμπέρασμα ότι το αυτόνομο υβριδικό σύστημα είναι αρκετά βιώσιμο και οικονομικό αλλά δε μπορεί ακόμη να ανταγωνιστεί άλλα πιο απλά αυτόνομα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά με αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες δίχως παραγωγή υδρογόνου, τουλάχιστον στην περίπτωση των εμπορικών εφαρμογών [61].

Ένα άλλο άρθρο πραγματεύεται το βέλτιστο σχεδιασμό ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης πράσινης ενέργειας σε μορφή υδρογόνου ώστε να εξυπηρετηθούν οι ενεργειακές ανάγκες της πόλης Brest στη Γαλλία. Το ερευνητικό αυτό έργο επικεντρώνεται στην οικονομική επίδοση του συστήματος και στη βελτιστοποίηση αυτής μέσω προσομοιώσεων με χρήση του λογισμικού HOMERPro και επίσης δίνει έμφαση στη χρήση ανανεώσιμων πηγών και φορέων ενέργειας, ιδιαίτερα στη διασύνδεση φωτοβολταϊκών με ηλεκτρολύτες και κυψέλες καυσίμου υδρογόνου για την πιο αποτελεσματική και περιβαλλοντικά βιώσιμη κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων. Τα αποτελέσματα του λογισμικού HOMERPro υποδεικνύουν επίσης τη βιωσιμότητα και την δυνατότητα διεκπεραίωσης ενός τέτοιου έργου και οδηγούν τους ερευνητές Omar Hazem Mohammed, Yassine Amirat και Mohamed Benbouzid στο

συμπέρασμα ότι ένα τέτοιο σύστημα όντως δύναται να τελέσει ρόλο εναλλακτικής και πράσινης τεχνολογίας, με μειωμένα κόστη συντήρησης και αυξημένη αξιοπιστία.

Τέλος, τα δύο τελευταία άρθρα εξετάζουν τα επενδυτικά κόστη των ηλεκτρολυτών AEL και PEMEL [39] καθώς και των κυψελών καυσίμου τύπου PEM [53]. Αμφότερα τα επιστημονικά έργα παρουσιάζουν ένα μοντέλο υπολογισμού κόστους έκαστης τεχνολογίας, μέσω των οποίων προσδοκούν μία σημαντική μείωση στο κόστος των συστημάτων αυτών από το 2030 και έπειτα και ιδιαιτέρως στις εγκαταστάσεις έως ισχύ 10 MW [39]. Επί πρόσθετα, μέσω ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis) όσον αφορά συγκεκριμένες παραμέτρους, οι ερευνητές του RWTH Πανεπιστημίου του Άαχεν αναγνώρισαν τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν το κόστος των εξαρτημάτων μίας PEM κυψέλης καυσίμου [53]. Αμφότερες οι εργασίες αυτές λήφθηκαν υπόψιν για τον προσδιορισμό των οικονομικών μεταβλητών που χαρακτηρίζουν το σύστημα που αναλύεται στην παρούσα εργασία.

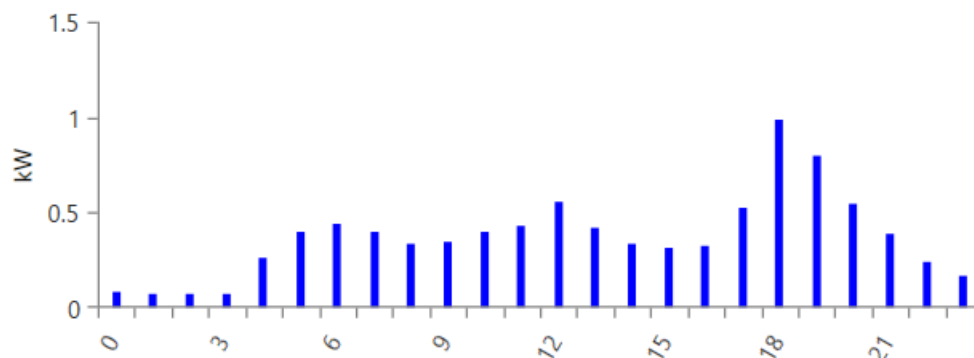
5.2 Καθορισμός Βασικών Παραμέτρων HOMERPro

Αρχικά, το αυτόνομο υβριδικό σύστημα που μοντελοποιήθηκε παραπάνω θα αποτελέσει τη βάση (base system) όσον αφορά το λογισμικό HOMERPro, ώστε με πιθανόν αναγκαίες βελτιστοποιήσεις να καταλήξουμε σε ένα προτεινόμενο σύστημα (proposed system). Όμως, για να καταστεί η προσομοίωση των περιπτώσεων που θα αναλυθούν ακριβής πρέπει πρώτα να παρουσιαστούν οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν το μέγεθος και το κόστος του, όπως η τοποθεσία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ενεργειακή ζήτηση της συγκεκριμένης εφαρμογής.

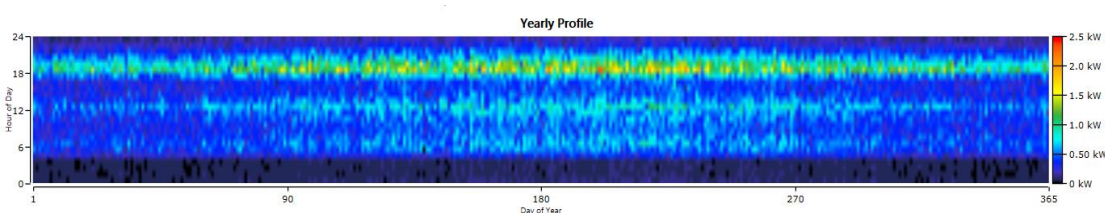
Το αυτόνομο σύστημα ενέργειας επιλέχθηκε για την περίπτωση μίας κατοικίας στη νησί Χαλκί (36.223, 27.613) το οποίο από το 2022 αποτελεί ένα από τα βασικότερα παραδείγματα μίας πρωτοβουλίας με στόχο την πράσινη ενέργεια και την ενεργειακή αυτονομία μικρών, αραιοκατοικημένων νήσων της Ελλάδας [62]. Επίσης, το προβλεπόμενο προσδόκιμο της επένδυσης είναι 25 χρόνια, με το ονομαστικό προεξοφλητικό επιτόκιο (net discount rate), τον προβλεπόμενο ρυθμό πληθωρισμού (expected inflation rate), το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο (real discount rate) και οι φιξαρισμένες κεφαλαιακές δαπάνες (system fixed capital cost) να ισούνται με 8%, 1.6%, 6.3% και 1500 €.

Συνεχίζοντας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το ηλεκτρικό ενεργειακό φορτίο που πρέπει να καλύψουν οι παραπάνω συσκευές είναι κατά μέσο όρο 11.27 kWh/ημέρα, με άνω όριο απαίτησης ισχύος ίσο με 2.39 kW, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 47 και στην Εικόνα 69.

Daily Profile

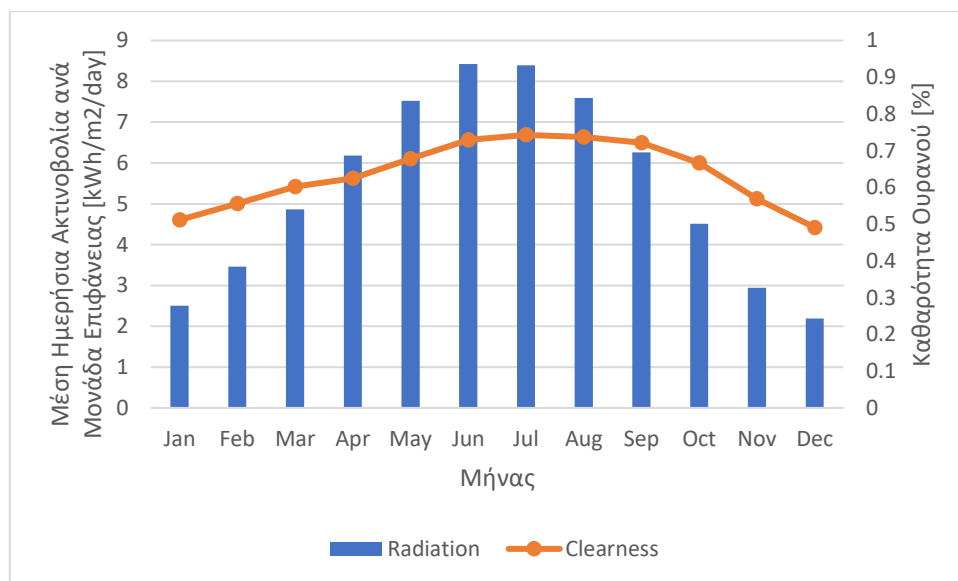


Διάγραμμα 47 Ημερήσιο προφίλ απαιτούμενης ισχύος από την κατοικία



Εικόνα 69 Ετήσιο προφίλ απαιτούμενης ισχύος από την κατοικία

Τώρα, τα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής αυτής που εξετάζεται προέκυψαν μέσω του λογισμικού και πιο συγκεκριμένα, από το Κέντρο Ατμοσφαιρικών Δεδομένων της NASA [63] και παρουσιάζονται διαγραμματικά ακριβώς από κάτω. Όπως ήταν αναμενόμενο, η χρονική περίοδος με την υψηλότερη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας και καθαρότητα από σύννεφα είναι το καλοκαίρι.



Διάγραμμα 48 Απεικόνιση μεταβολής μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας και καθαρότητας ουρανού σε μηνιαία κλίμακα

Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά πάνελ, η κλίση της συστοιχίας έχει οριστεί σε 31° (βέλτιστη) και το αζιμούθιο είναι ίσο με 2° (βέλτιστο). Το προσδόκιμο λειτουργίας των πάνελ θεωρήθηκε 30 χρόνια, με ένα συντελεστή μείωσης επιδόσεων (derating factor) 80% και η ανακλαστικότητα του εδάφους (albedo of ground) ορίστηκε στο 20%. Επίσης, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η επίδραση της θερμοκρασίας στη λειτουργία των πάνελ λαμβάνει τη μορφή της ποσοστιαίας μεταβολής της P_{max} που δύναται να επιτευχθεί κατά $-0.37\%/^{\circ}C$.

Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι και για την περίπτωση των βελτιστοποιήσεων **μόνο τα παραπάνω δεδομένα θα παραμείνουν τα ίδια** ως απαραίτητη συνθήκη ορθής σύγκρισης των συστημάτων υπό τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες.

5.3 Μοντελοποίηση Βασικού Συστήματος με HOMERPro

Όπως περιγράφηκε και στα εισαγωγικά κεφάλαια, ο πρωταρχικός ρόλος ενός οποιουδήποτε αυτόνομου συστήματος ενέργειας είναι η κάλυψη του ενεργειακού φορτίου κατά 100%, γεγονός το οποίο αντικατοπτρίζεται και εντός του λογισμικού ως περιορισμός (constraint). Επιπλέον, ως λειτουργικό ενεργειακό πλεόνασμα (operating reserve) θεωρείται το 10% του ωριαίου φορτίου ώστε να διασφαλιστεί η πλήρης κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ακόμη και σε περίπτωση απότομης αύξησης του φορτίου.

Τώρα, η στρατηγική διαχείρισης της ενέργειας που παράγεται και αποθηκεύεται ορίστηκε μέσω του προγράμματος σύμφωνα με το μοντέλο Load Following (LF), κατά το οποίο μία γεννήτρια (Fuel Cell) παράγει μόνο όση ενέργεια απαιτείται για να καλυφθεί το ενεργειακό έλλειμμα που προκύπτει. Αυτή η στρατηγική τείνει να είναι πιο αποτελεσματική σε περιπτώσεις συστημάτων με μεγάλο ποσοστό παραγωγής ανανεώσιμης ισχύος η οποία συνήθως θα υπερβαίνει τις απαιτήσεις του φορτίου.

Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα ρυθμίζει τη διοχέτευση της ισχύος ως εξής:

- Σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, τα φωτοβολταϊκά παρέχουν την ισχύ ώστε να καλυφθεί η ενεργειακή απαίτηση. Εάν υπάρχει πλεόνασμα, τότε αυτό διοχετεύεται στις μπαταρίες καθώς και τον ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου και την αποθήκευση του στη δεξαμενή. Εάν αμφότερες οι μπαταρίες και η δεξαμενή είναι γεμάτες, τότε το πλεόνασμα απομακρύνεται με τη μορφή μη χρήσιμης ισχύος (προς ένα dump load).

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- Σε κατάσταση υπολειτουργίας των φωτοβολταϊκών, οι μπαταρίες αποφορτίζονται και η κυψέλη καυσίμου (FC) τίθενται σε λειτουργία για να καλύψουν τις απαιτήσεις του εκάστοτε φορτίου.

Πίνακας 14 Βασικά στοιχεία και δεδομένα εισόδου λογισμικού ανά συσκευή του βασικού συστήματος

Συσκευή	Μέγεθος	Κεφάλαιο (CAPEX)	Αντικατάσταση (Replacement)	Λειτουργία & Συντήρηση (O&M)	Προσδόκιμο	Λοιπές Πληροφορίες	Πηγή
-	-	€/kW(h)	€/kW(h)	€/kW(h)/y	-	-	-
PV	10 kW	500	500	22.76	30 χρόνια	Derating Factor: 80%	[27]
Battery	55.3 kWh	104.43	104.43	8.42	20 χρόνια	Throughput (kWh): 6879.6	[64]
Fuel Cell	0.6 kW	1320	352.44	17.76	50000 ώρες	Minimum Load Ratio: 25%	[53]
Electrolyzer	3.5 kW	339.06	167.39	13.56	15 χρόνια	Minimum Load Ratio: 20% Efficiency: 85%	[39], [27]
Hydrogen Tank	0.781 kg	470 €/kg	470 €/kg	9.4 €/kg/y	15 χρόνια	-	[27]
Converter	2.4 kW	80	80	1.24	10 χρόνια	Efficiency: 96%	[27]

Στον προηγούμενο πίνακα, φαίνονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα που πρέπει να τροφοδοτηθούν στο λογισμικό ώστε να ληφθούν αποτελέσματα επί αυτού του βασικού συστήματος που εξετάστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια.

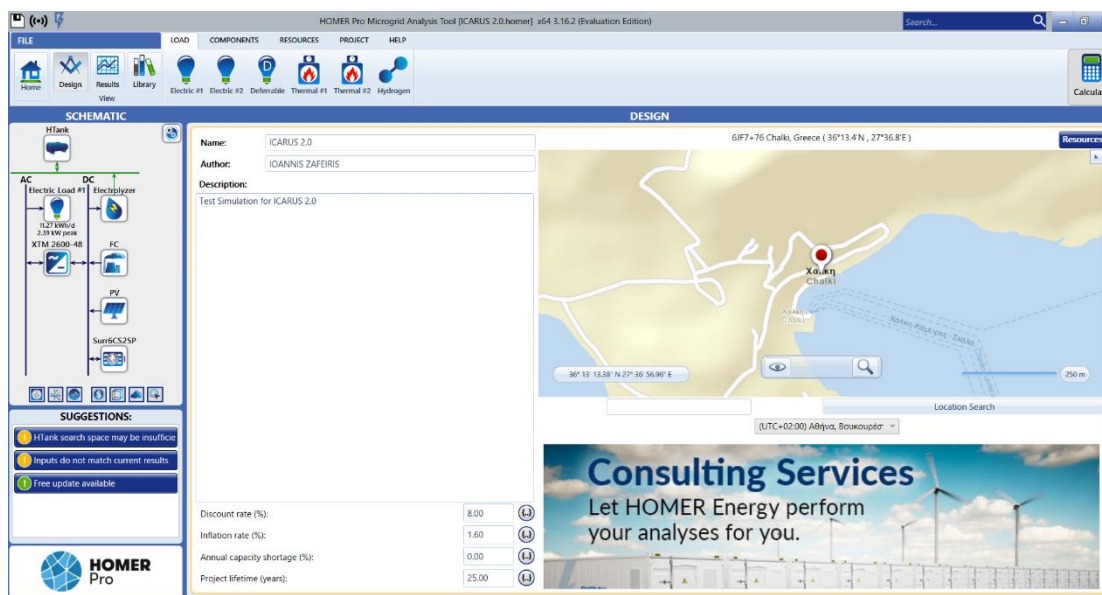
5.4 Αναλυτική Περιγραφή Μοντελοποίησης Βασικού Συστήματος

Ένα αυτόνομο σύστημα, οποιουδήποτε τύπου, απαιτείται να επικεντρώνεται δύο βασικούς σκοπούς: να καλύπτει ολοκληρωτικά τις ενεργειακές ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιείται και να αποτελεί μία βιώσιμη οικονομικά λύση ώστε να αποφέρει «καρπούς» το συγκεκριμένο επενδυτικό εγχείρημα. Ωστόσο, όταν το σύστημα αυτό είναι καταρχάς υβριδικό, η περιπλοκότητα της διαμόρφωσης και της συγχρονισμένης λειτουργίας όλων των υποσυστημάτων του ξεφεύγει του συμβατικού, όπως και αναφέρθηκε παραπάνω. Για το λόγο αυτό, όπως και στην περίπτωση της διαμόρφωσης της ηλεκτρολυτικής

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

εγκατάστασης μέσω του ASPEN Plus, θα ακολουθήσουν σε μορφή αναλύσεων και εικόνων, μία προς μία, οι διαδικασίες και οι παράμετροι που επιλέχθηκαν και καθορίστηκαν εντός του HOMERPro για την αναλυτική προσέγγιση του σχεδιασμού του βασικού συστήματος που εξετάζεται ως εξής:

- Αρχικά, πρέπει να επιλεγεί μία τοποθεσία για την εγκατάσταση του αυτόνομου, υβριδικού συστήματος. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε η νήσος Χαλκή, για λόγους ευρωπαϊκών προγραμμάτων που λαμβάνουν χώρα εκεί και λόγω της αφθονίας ηλιοφάνειας και άρα, της μέγιστης αξιοποίησης των φωτοβολταϊκών που θα εγκατασταθούν. Επιπλέον, στα σημεία αυτά καθορίζονται και οι βασικές οικονομικές παράμετροι, πλάι στη διάρκεια ζωής της επενδυτικής ανάλυσης του πρότζεκτ.

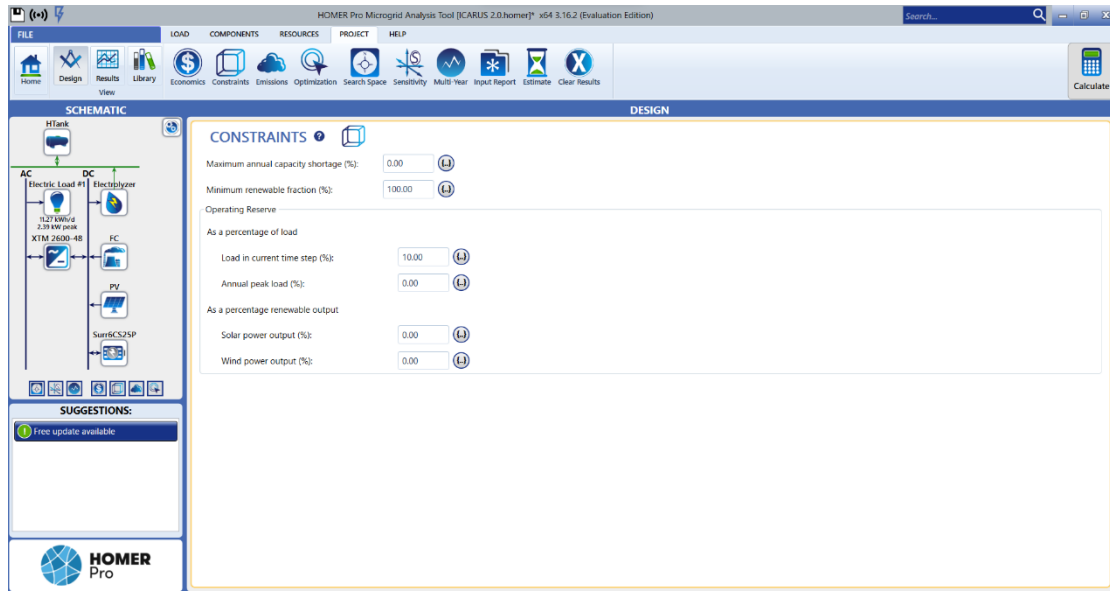


Εικόνα 70 Αρχικό παράθυρο προγράμματος - καθορισμός περιοχής εγκατάστασης και οικονομικών παραμέτρων επένδυσης

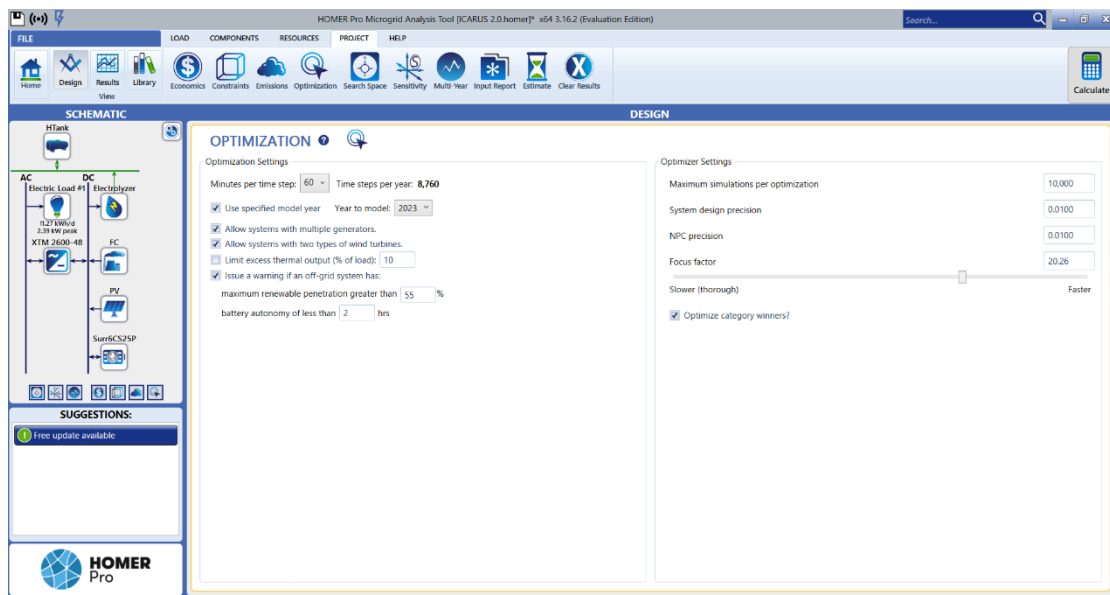
- Αυτοί οι οικονομικοί όροι ωστόσο δεν αποτελούν το μοναδικό σημαντικό χαρακτηριστικό του προγράμματος. Εκτός αυτών, η καρτέλα 'Constraints' περιέχει επιλογές σχετικά με τα επιτρεπόμενα ποσοστά ενεργειακών ελλείψεων, τα επιθυμητά ποσοστά λειτουργικής εφεδρείας με βάση το φορτίο ή/και την ανανεώσιμη ισχύ εξόδου. Από την άλλη μεριά, η καρτέλα 'Optimization' περιέχει επιλογές σχετικά με τη διαδικασία βελτιστοποίησης σχεδιασμού του συστήματος, όπως η χρονολογία μοντελοποίησης, το χρονικό βήμα της προσομοίωσης καθώς και η ακρίβεια των τεχνοοικονομικών που θα προκύψουν μέσω της προσομοίωσης. Υπάρχει ακόμη και ξεχωριστή καρτέλα 'Economics' η οποία πραγματεύεται τις

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

μεταβλητές που ορίστηκαν κατά την εκκίνηση του προγράμματος. Σημειώνεται πως η καρτέλα 'Emissions' δε θεωρείται σημαντική αφού το σύστημα λειτουργεί κατεξοχήν με ανανεώσιμη ενέργεια.

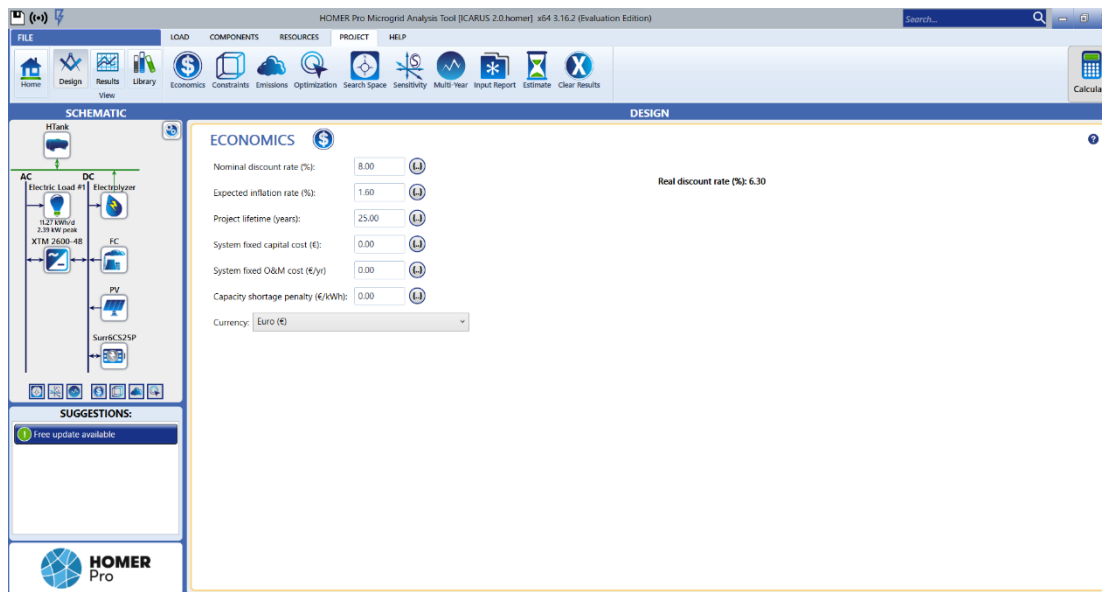


Εικόνα 71 Παράθυρο περιοριστικών παραμέτρων και ποσοστών εγκατάστασης



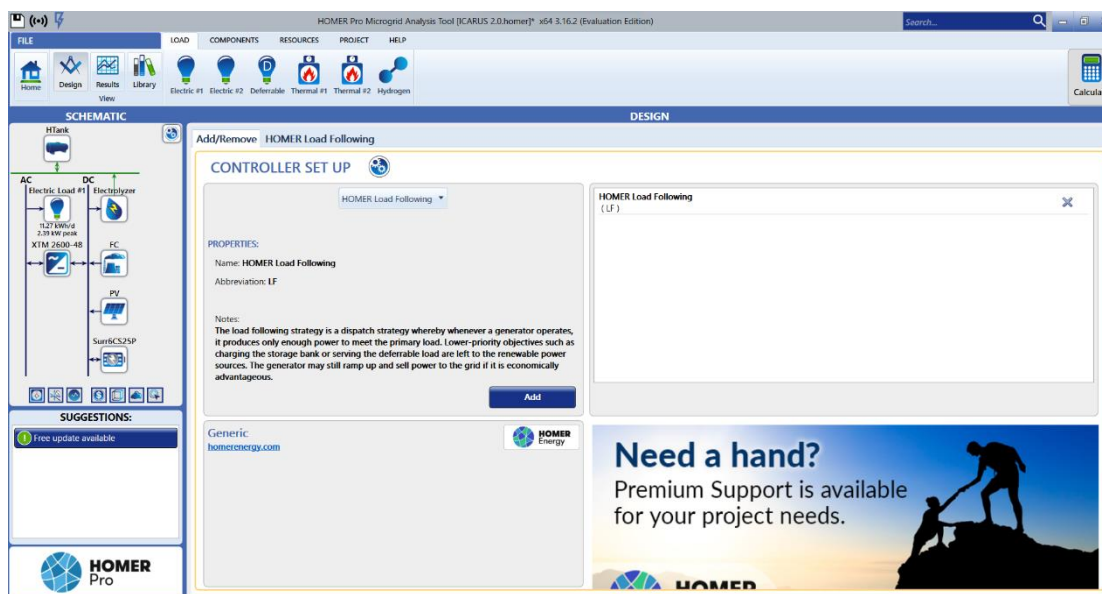
Εικόνα 72 Παράθυρο βελτιστοποιητικών παραμέτρων προσομοίωσης

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 73 Παράθυρο οικονομικών παραμέτρων και συντελεστών επενδυτικού σχεδίου

- Συνεχίζοντας, βασικό κομμάτι της διαμόρφωσης του συστήματος πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης συνιστά και η επιλογή του μοντέλου που θα ακολουθηθεί. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και φαίνεται και στην ακριβώς από κάτω εικόνα, επιλέχθηκε το μοντέλο HOMER Load Following, λόγω της ευνοϊκής λειτουργίας του συνδυάζοντάς το με ανανεώσιμες πηγές και γεννήτριες, όπως η κυψέλη καυσίμου.



Εικόνα 74 Παράθυρο καθορισμού μοντέλου προσομοίωσης της μοντελοποιημένης εγκατάστασης

- Το επόμενο βήμα στη δόμηση του συστήματος προς προσομοίωση είναι ο καθορισμός του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού φορτίου, με βήμα μίας ώρας. Λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών το καλοκαίρι στην περιοχή της εγκατάστασης, οι ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας που εξυπηρετεί η εγκατάσταση ορίζονται ως αυξημένες, ιδιαιτέρως το μήνα Ιούλιο, συγκριτικά με αυτές της υπόλοιπης χρονιάς. Οι μεταβολές του φορτίου που απαιτείται να καλυφθεί προέκυψαν αυτομάτως από το πρόγραμμα, με επιλογή του 'Residential' προτύπου.



Εικόνα 75 Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων ηλεκτρικού φορτίου κατοικίας

- Τώρα, όσον αφορά της ηλιακή ακτινοβολία και την καθαρότητα του ουρανού για την περιοχή, σύμφωνα με τα δεδομένα που λήφθηκαν μέσω του προγράμματος και των βάσεων δεδομένων της NASA, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, προέκυψε η διαγραμματική έκφραση αυτών. Όπως φαίνεται, η ηλιακή ακτινοβολία και η καθαρότητα μεγιστοποιούνται την περίοδο του καλοκαιριού όπου και η ηλιοφάνεια είναι μέγιστη. Έπειτα από τη λήψη αυτών των δεδομένων, το πρόγραμμα θα τα εφαρμόσει αυτόματα για τον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας που καταλήγει στα φωτοβολταϊκά που επιλέχθηκαν.

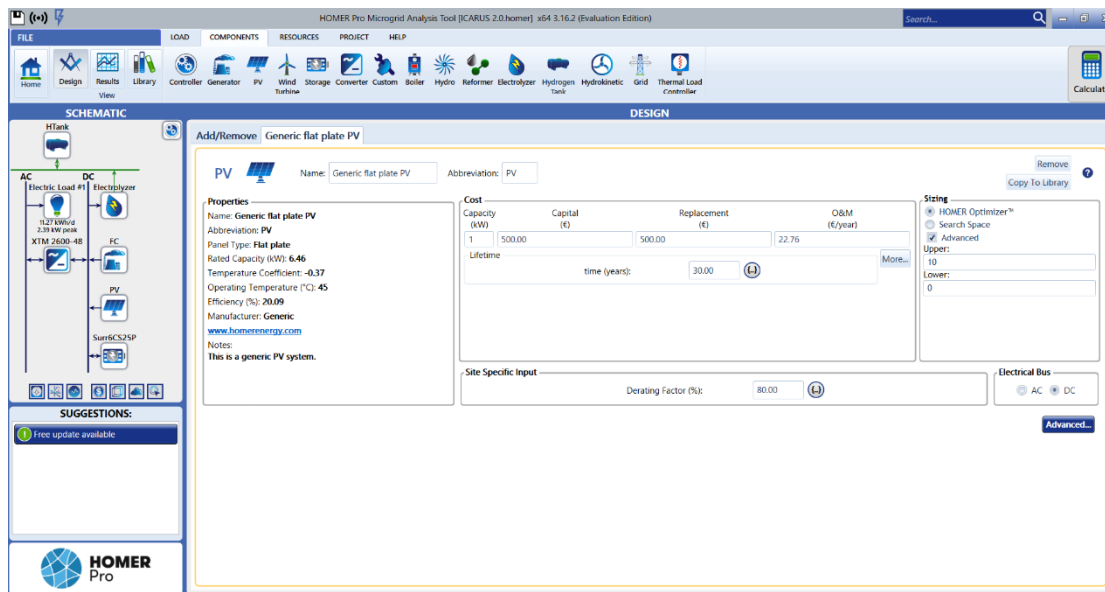
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Εικόνα 76 Παράθυρο λήψης και διαγραμματικής απεικόνισης ηλιακής ακτινοβολίας και καθαρότητας ουρανού ανά μήνα του χρόνου

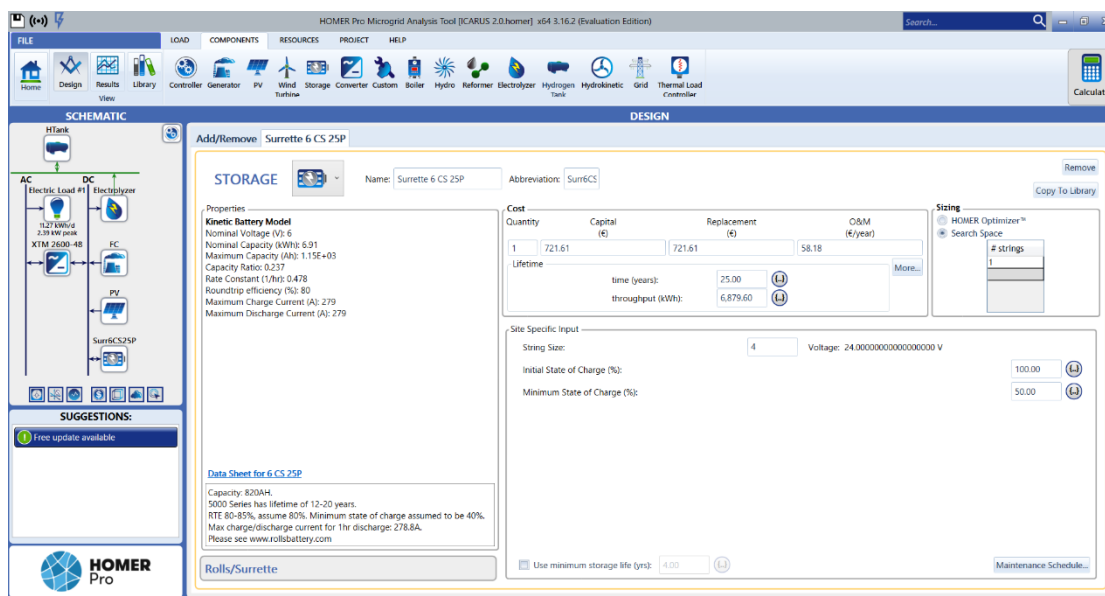
- Με την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία να έχει λάβει τελική μορφή, η διαμόρφωση του υποσυστήματος των φωτοβολταϊκών αποτελεί εύκολη και αναίμακτη διαδικασία. Συγκεκριμένα, στα κελιά που φαίνονται στο παράθυρο αυτό, αντικαθίστανται τα κεφάλαια που απαιτούνται, το προσδόκιμο λειτουργίας και η παράμετρος απωλειών (derating factor). Επί πρόσθετα, για να προκύψουν τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν τα φωτοβολταϊκά SF400M της PEIMAR της παρούσας εργασίας, υπάρχει το κουμπί 'Advanced' το οποίο επιτρέπει την αλλαγή καιριων παραμέτρων λειτουργίας όπως το συντελεστή θερμοκρασίας, τη θερμοκρασία λειτουργίας NOCT και τη θεωρητική απόδοση. Ακόμη, το εργαλείο γνωστό και ως HOMER Optimizer™ χρησιμοποιήθηκε κατά το βέλτιστο σχεδιασμό για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος των υπολογισμών, στην περίπτωση όλων των υποσυστημάτων που το υποστηρίζουν.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



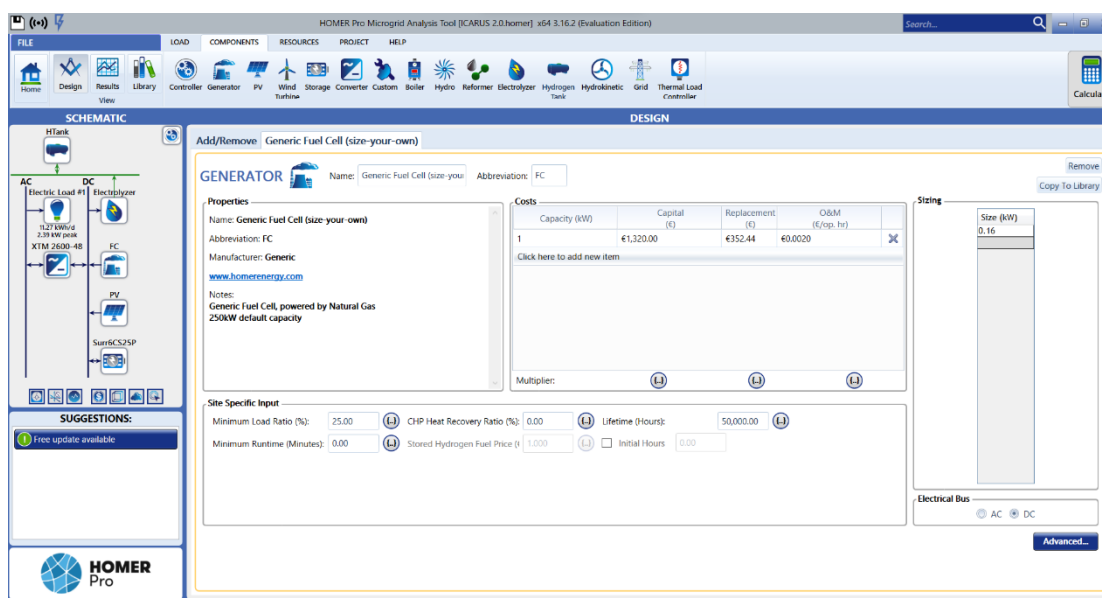
Εικόνα 77 Παράθυρο καθορισμού τεχνοοικονομικών παραμέτρων φωτοβολταϊκών

- Έχει αναφερθεί ήδη πως το πλεόνασμα ισχύος από τα φωτοβολταϊκά, αποθηκεύεται, κατά βάση, εντός συστοιχών μπαταριών. Η διαμόρφωση των μπαταριών αυτών και η διασύνδεση τους εντός του συστήματος καθίστανται άκρως εφικτοί στόχοι, αφού ακολουθώντας τα οικονομικά δεδομένα που παρατέθηκαν στον παραπάνω πίνακα και αντικαθιστώντας τις τιμές για το προσδόκιμο λειτουργίας, το αριθμό μπαταριών συνδεδεμένες σε σειρά ανά συστοιχία αλλά και το ελάχιστο και μέγιστο SOC, το μοντέλο της μπαταρίας που επιλέχθηκε από τις βάσεις δεδομένων του προγράμματος είναι έτοιμο για να προσομοιωθεί.



Εικόνα 78 Παράθυρο καθορισμού τεχνοοικονομικών παραμέτρων μπαταριών

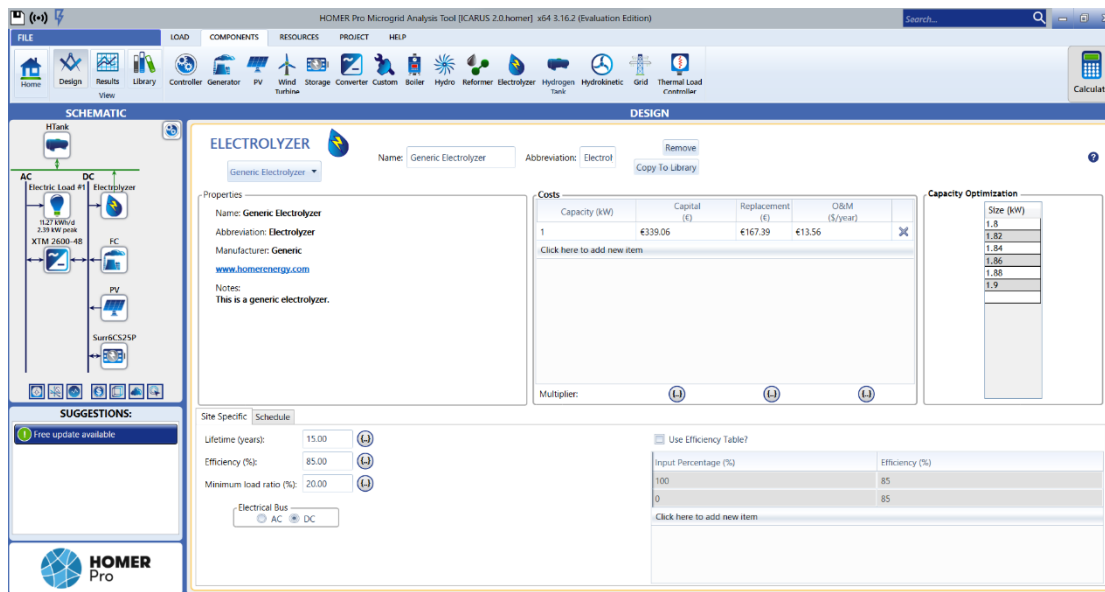
- Σειρά τώρα έχει ο καθορισμός των συνθηκών λειτουργίας και των τεχνοοικονομικών συντελεστών και παραμέτρων της κυψέλης καυσίμου η οποία ορίζεται ως 'Generator' (δικαίως) από το πρόγραμμα. Στα τεχνικά στοιχεία εμπεριέχεται και το ελάχιστο φορτίο λειτουργίας ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του Fuel Cell και το προσδόκιμο λειτουργίας του. Πέραν αυτών, μέσω της καρτέλας 'Advanced' δύναται να καθορισθεί η καμπύλη που ακολουθεί ο βαθμός απόδοσης, συναρτήσει της ονομαστικής ισχύ και την κατανάλωση της κυψέλης καυσίμου, αλλά και το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας της. Για την τελευταία επιλογή διαμόρφωσης, προτείνεται να αφεθεί η προεπιλεγμένη λειτουργία 'Optimized' ενεργή, ώστε να προσαρμόζεται και να συντάσσεται κάθε στιγμή με τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης.



Εικόνα 79 Παράθυρο καθορισμού τεχνοοικονομικών παραμέτρων κυψέλης καυσίμου

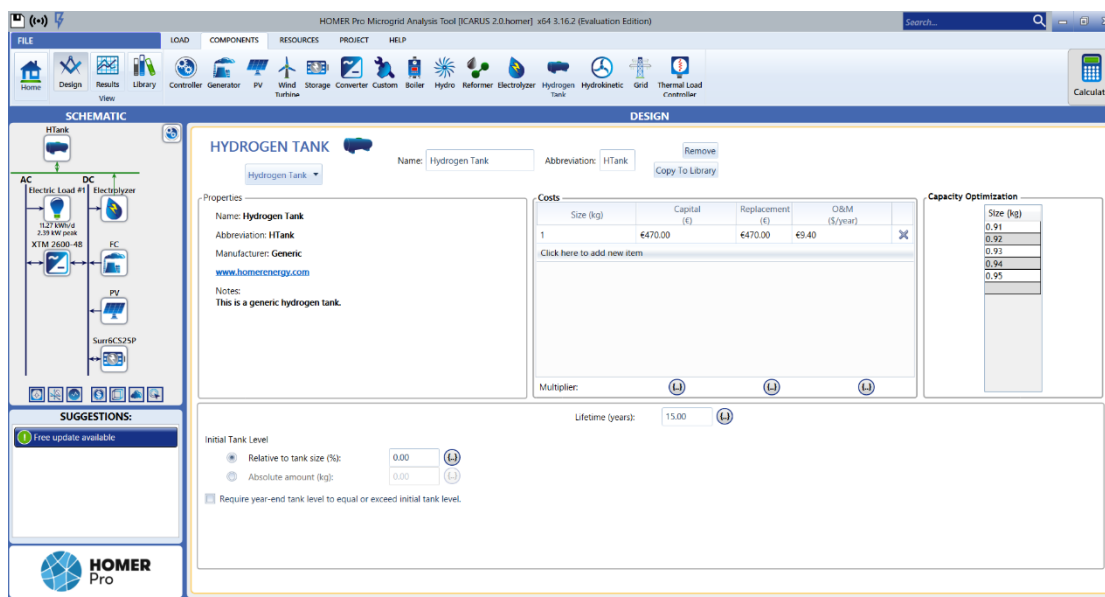
- Ακολουθεί ο καθορισμός της λειτουργίας και των παραμέτρων στις οποίες υπακούει ο ηλεκτρολύτης της εγκατάστασης και η διαδικασία αυτή ταιριάζει, σε μεγάλο βαθμό, με αυτήν της κυψέλης καυσίμου. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, ο βαθμός απόδοσης του δε μεταβάλλεται συναρτήσει την ονομαστική ισχύ ή την παραγωγή υδρογόνου αλλά παραμένει σταθερός για όλα τα ποσοστά ισχύος εισόδου. Ακόμη, προτείνεται ξανά να αφεθεί η προεπιλεγμένη λειτουργία 'Optimized' ενεργή για το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας του ηλεκτρολύτη, ώστε να προσαρμόζεται και να συντάσσεται κάθε στιγμή με τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



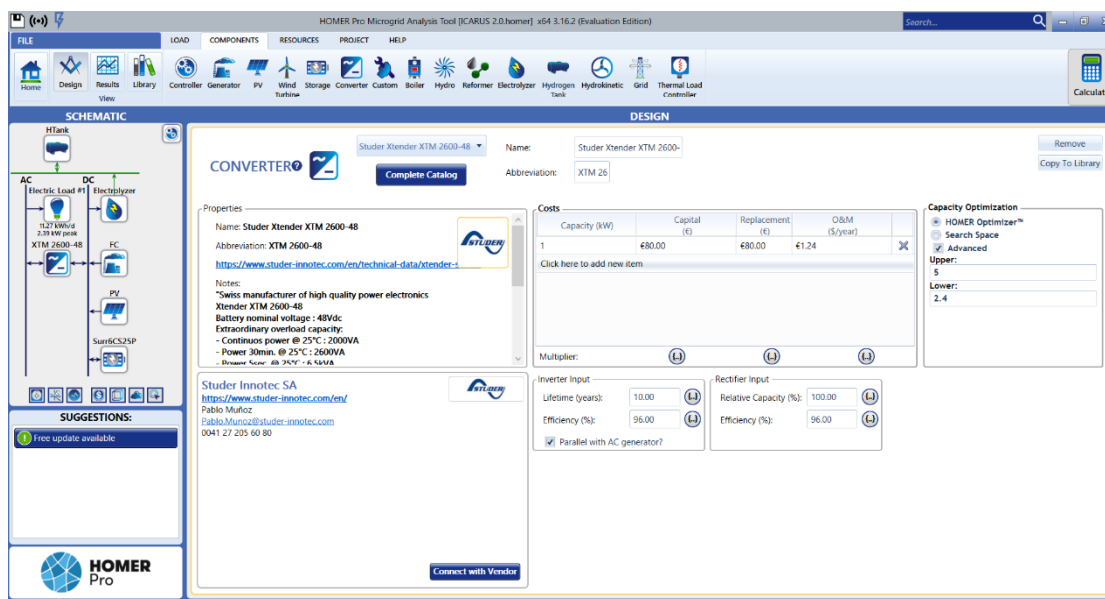
Εικόνα 80 Παράθυρο καθορισμού τεχνοικονομικών παραμέτρων ηλεκτρολύτη

- Ακολούθως, για την αποθήκευση του παραγόμενου υδρογόνου, η δεξαμενή αποθήκευσης συνιστά ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι του συστήματος. Η προσέγγιση της διαμόρφωσης αυτού του υποσυστήματος είναι η πλέον απλοποιημένη εντός του προγράμματος διότι εκτός των τιμών που λαμβάνουν τα κεφάλαια, του προσδόκιμου λειτουργίας και της περιοχής βελτιστοποίησης του μεγέθους της, κατά την προσομοίωση, δεν απαιτείται κάτι άλλο ώστε να λειτουργήσει εύρυθμα με τα υπόλοιπα υποσυστήματα.



Εικόνα 81 Παράθυρο καθορισμού τεχνοικονομικών παραμέτρων δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου

- Τελικό (πριν από την εκτέλεση της προσομοίωσης) και υψίστης σημασίας κομμάτι της μοντέλοποίησης του συστήματος στο HOMERPro: ο μετασχηματιστής. Ο τύπος του μετασχηματιστή που επιλέχθηκε μέσω των βάσεων δεδομένων του προγράμματος έφερε τις τιμές προσδόκιμου λειτουργίας και βαθμού απόδοσης που αντιστοιχούν σε αυτόν και τα οι οποίες παραμένουν σταθερές καθόλη τη διάρκεια. Οι τιμές όσον αφορά τις δαπάνες όλων των ειδών προκύπτουν και τεκμηριώνονται από τη βιβλιογραφία, γεγονός το οποίο ισχύει για όλα τα προηγούμενα υποσυστήματα που αναλύθηκαν.



Εικόνα 82 Παράθυρο καθορισμού τεχνοοικονομικών παραμέτρων μετασχηματιστή

Παρατηρείται πως η τεχνοοικονομική προσέγγιση της μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης του αυτόνομου συστήματος, που αποτελεί το αντικείμενο ενδιαφέροντος αυτής της εργασίας, συνιστά ένα πολύ σημαντικό και εύχρηστο εργαλείο στα χέρια ενός μηχανολόγου. Επιπλέον, η ευκολία του περιβάλλοντος χρήσης του HOMERPRO, καθώς και η πληθώρα μοντέλων αποθηκευμένων και προσβάσιμων από τις βάσεις δεδομένων του, διευκολύνουν το οιοδήποτε χρήστη ώστε να απαντήσει, με αρκετή σιγουριά, στο ερώτημα της βιωσιμότητας μίας επενδυτικής κίνησης αυτής της κλίμακας, όπως θα φανεί και στα επόμενα κεφάλαια που πραγματεύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Σημειωτέον, οι εικόνες μοντελοποίησης κάθε μέρους του συστήματος αποτελούν απλώς οδηγό και έρεισμα για την κατανόηση των διεργασιών και των καρτελών του προγράμματος. Οπότε, οι τεχνοοικονομικές τιμές που εμπεριέχονται σε αυτές, καθώς και τα όρια βελτιστοποίησης του κάθε υποσυστήματος αποτελούν παραδείγματα συμπλήρωσης των

κελιών και μπορούν να αλλάξουν κατά το δοκούν ώστε να καλύψουν οποιαδήποτε προσδοκία του χρήστη. Οι προαναφερθείσες τιμές επιβάλλεται να πηγάζουν από τη βιβλιογραφία και από τη μαθηματική μοντελοποίηση του εκάστοτε υποσυστήματος που έχει προηγηθεί και ορμώμενοι αυτών συνεχίζεται η ανάλυση των προσομοιώσεων και των συμπερασμάτων που έπονται.

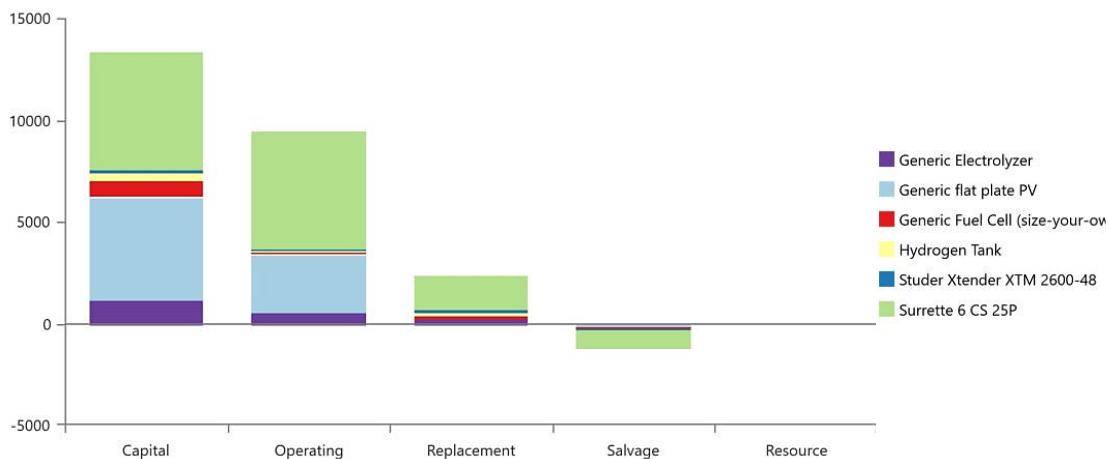
5.5 Προσομοίωση Βασικού Συστήματος με HOMERPro

Τώρα, η τεχνοοικονομική ανάλυση μέσω του HOMERPro βασίζεται σε δύο βασικές τιμές: NPC (Net Present Cost) και LCOE (Levelized Cost of Energy/Electricity). Σύμφωνα με αυτές λοιπόν καταλήγει στο συμπέρασμα ότι μία επένδυση θα είναι επικερδής, ουδέτερη ή ζημιογόνος. Επομένως, έπειτα από την προσομοίωση του συστήματος σύμφωνα με τα προαναφερθέντα δεδομένα και περιορισμούς προκύπτουν τα αποτελέσματα που ακολουθούν, πινακοποιημένα και διαγραμματικά.

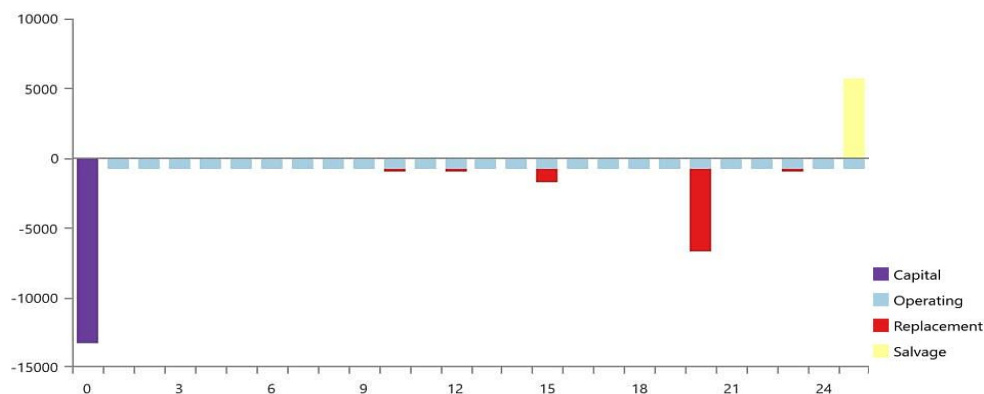
Πίνακας 15 Τιμές NPC ανά συσκευή και συνολικά βασικού συστήματος

Συσκευή	CAPEX	O&M	Replacement	Salvage	Σύνολο
Peimar SF400M	€5000	€2829	€0.00	-€180.95	€7648
Surrette 6 CS 25P	€5773	€5784	€1701	-€940.16	€12318
Fuel Cell	€792.00	€65.56	€158.24	-€36.83	€978.98
Electrolyzer	€1187	€589.82	€234.34	-€42.41	€1968
Hydrogen Tank	€367.07	€91.22	€146.82	-€26.57	€578.55
Studer Xtender XTM 2600 – 48	€192.00	€37.03	€160.82	-€20.85	€369.01
Σύστημα	€13311	€9397	€2402	-€1248	€23861

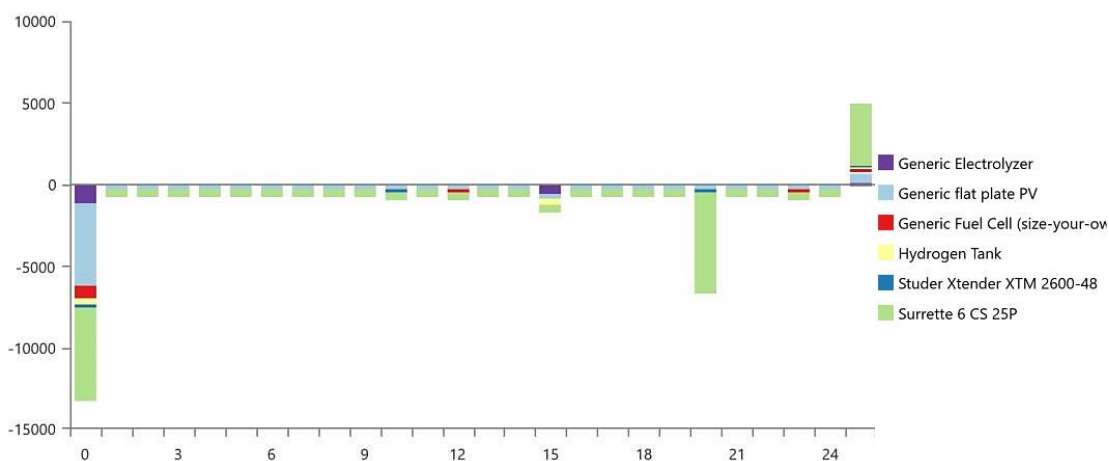
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Διάγραμμα 49 Απεικόνιση τμηματικών και συνολικών τιμών NPC βασικού συστήματος

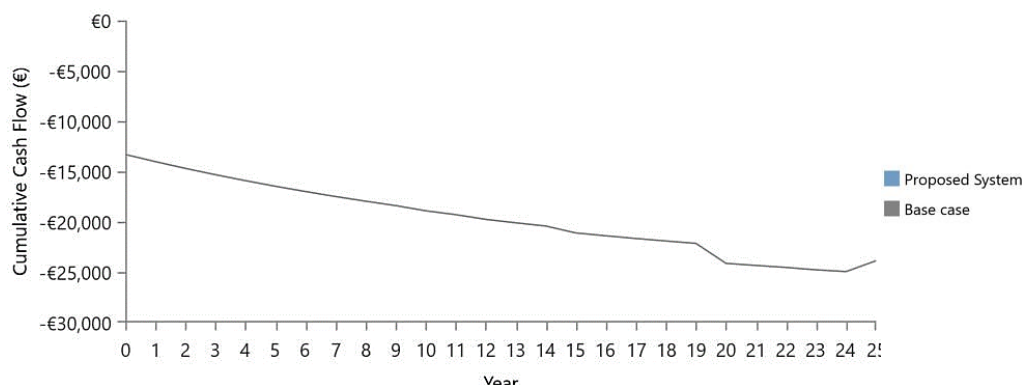


Διάγραμμα 50 Απεικόνιση τμηματικών τιμών χρηματικής ροής βασικού συστήματος χωρίς τη χρονική συνιστώσα του χρήματος (nominal cash flow) βάσει συνιστωσών δαπανών ανά χρόνο του επενδυτικού οριζοντα



Διάγραμμα 51 Απεικόνιση τιμών χρηματικής ροής ανά συσκευή του βασικού συστήματος χωρίς τη χρονική συνιστώσα του χρήματος (nominal cash flow) ανά χρόνο του επενδυτικού οριζοντα

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Διάγραμμα 52 Απεικόνιση συνολικών τιμών χρηματικής ροής βασικού συστήματος συμπεριλαμβανομένης της χρονικής συνιστώσας του χρήματος (discounted cash flow) ανά χρόνο του επενδυτικού ορίζοντα

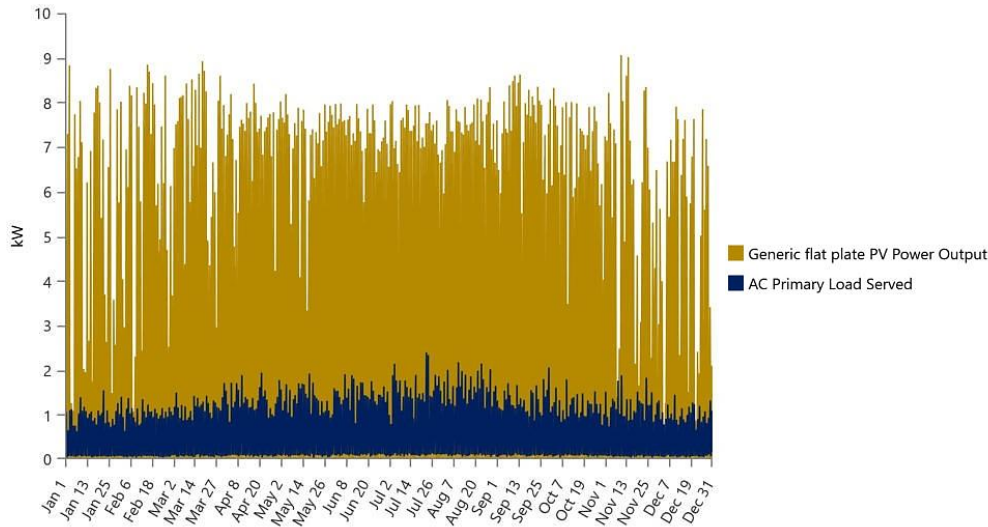
Πίνακας 16 Βασικότεροι τεχνοοικονομικοί συντελεστές βασικού συστήματος

Βασικό Σύστημα (Base System)	
NPC	€23861
CAPEX	€13311
O&M	€9397
LCOE	0.467 €/kWh
Κατανάλωση Καυσίμου	149 kg/y

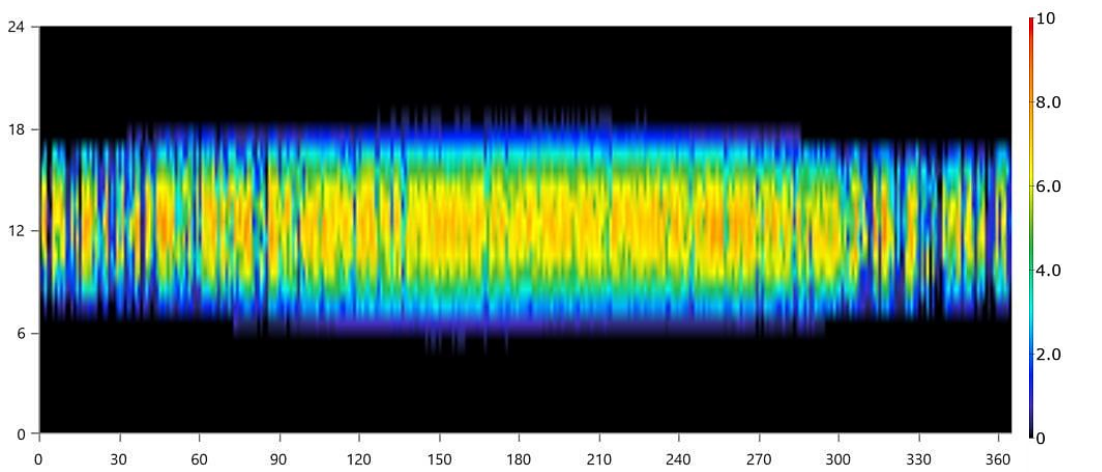
Σύμφωνα με τα προηγούμενα διαγράμματα και τον παραπάνω πίνακα, οι βασικότερες συνιστώσες που καθορίζουν τη ροή χρήματος μέσω της επένδυσης αυτής είναι οι δαπάνες κεφαλαίου (Capital), λειτουργίας και συντήρησης (Operating), αντικατάστασης (Replacement) και τα κέρδη διασωθέντων συσκευών (Salvage) λόγω του υπολειπόμενου προσδόκιμου στο τέλος του επενδυτικού ορίζοντα. Επί πρόσθετα, η ροή χρημάτων μίας επένδυσης δύναται να λαμβάνει ή όχι υπόψιν τη χρονική επίδραση στο χρήμα και έτσι χωρίζεται σε Nominal Cash Flow – NCF και Discounted Cash Flow – DCF, αντιστοίχως. Στην περίπτωση που εξετάζεται από το λογισμικό, το DCF είναι το πιο σημαντικό αφού οι τιμές Net Present Costs – NPC υπολογίζονται μέσω αυτού και λαμβάνονται υπόψιν και το επιτόκιο και ο πληθωρισμός, γεγονός το οποίο αντικατοπτρίζει σε μεγαλύτερο βαθμό την πραγματικότητα ενός επιχειρηματικού εγχειρήματος. Πολύ σημαντικός δείκτης μίας επένδυσης στον τομέα της ενέργειας είναι και το LCOE το οποίο αντικατοπτρίζει το σταθμισμένο κόστος της ενέργειας του συστήματος.

Ωστόσο, εκτός από το οικονομικό κομμάτι, υπάρχει και το τεχνικό κομμάτι της προσομοίωσης, από το οποίο πηγάζουν χρήσιμα στοιχεία ως προς τη χρήση των υποσυστημάτων και τις πιθανές προοπτικές βελτίωσης του συστήματος.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



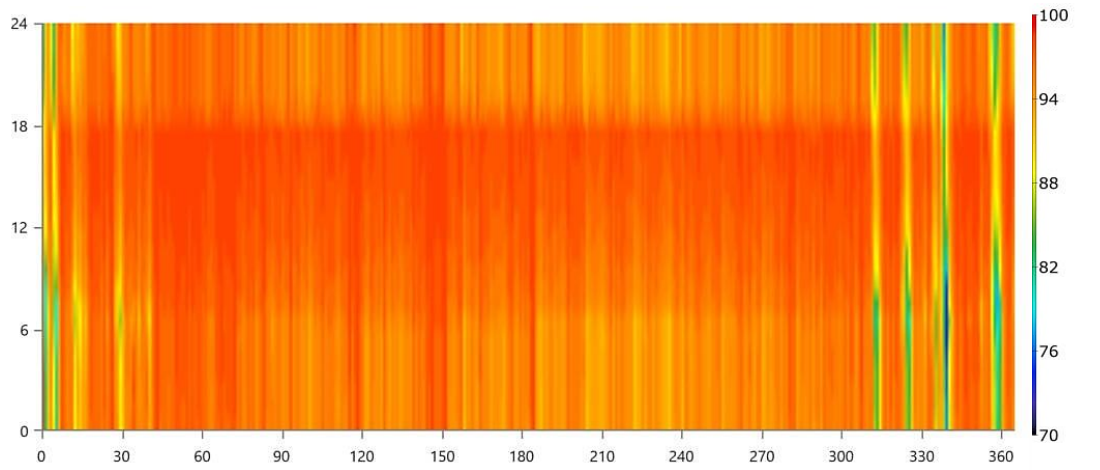
Διάγραμμα 53 Ημερήσια μεταβολή ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκών(PV) και φορτίου (Load) βασικού συστήματος



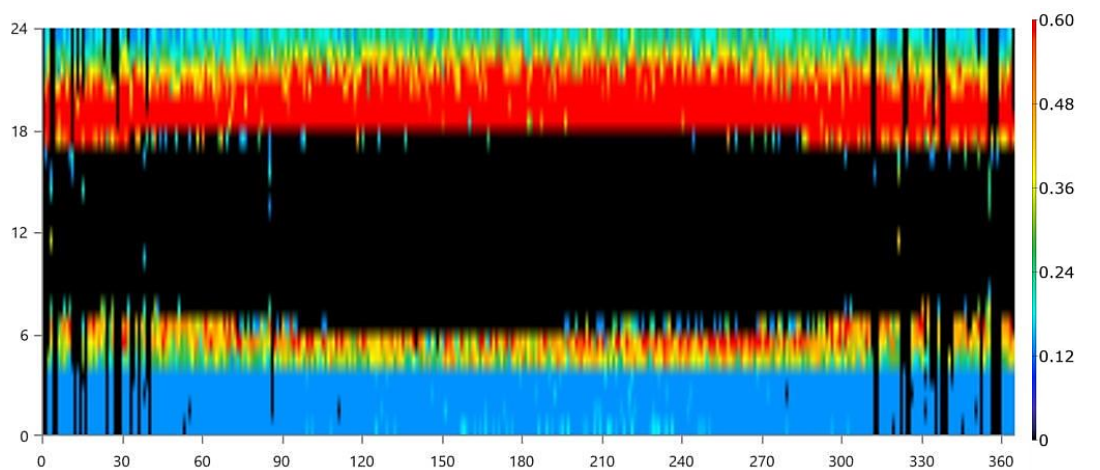
Διάγραμμα 54 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκών (PV) σε kW βασικού συστήματος

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει, σε διάστημα ενός χρόνου και για βήμα ημέρας, τη μεταβολή της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών και το ηλεκτρικό φορτίο της κατοικίας που καλύφθηκε από αυτήν την ισχύ. Είναι εμφανές ότι η παραγόμενη ισχύς από τα πάνελ είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τις απαιτήσεις της κατοικίας σε ισχύ. Ωστόσο, δεν πρέπει να αμελείται η διαλειμματική φύση των φωτοβολταϊκών ως πηγή ενέργειας και η ανάγκη παροχής ισχύος και σε όλες τις άλλες συσκευές του συστήματος. Επίσης, όπως φαίνεται η μέγιστη τιμή της ισχύος εξόδου είναι τα 9.06 kW και η τιμή του CF (Capacity Factor) είναι 19.2%, οπότε η επιφάνεια και άρα η ονομαστική ισχύς της συστοιχίας φωτοβολταϊκών δύναται να μειωθεί ώστε να μειωθεί και το κόστος.

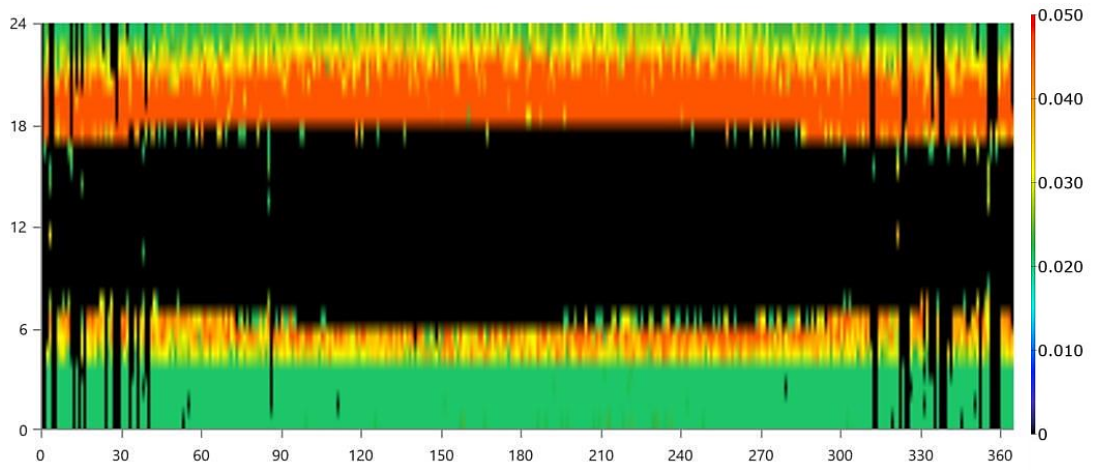
Ακολουθούν διαγράμματα που περιγράφουν τις μεταβολές των βασικότερων συνιστωσών της κάθε συσκευής και περιγράφουν με συνοπτικό τρόπο τη λειτουργία τους καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.



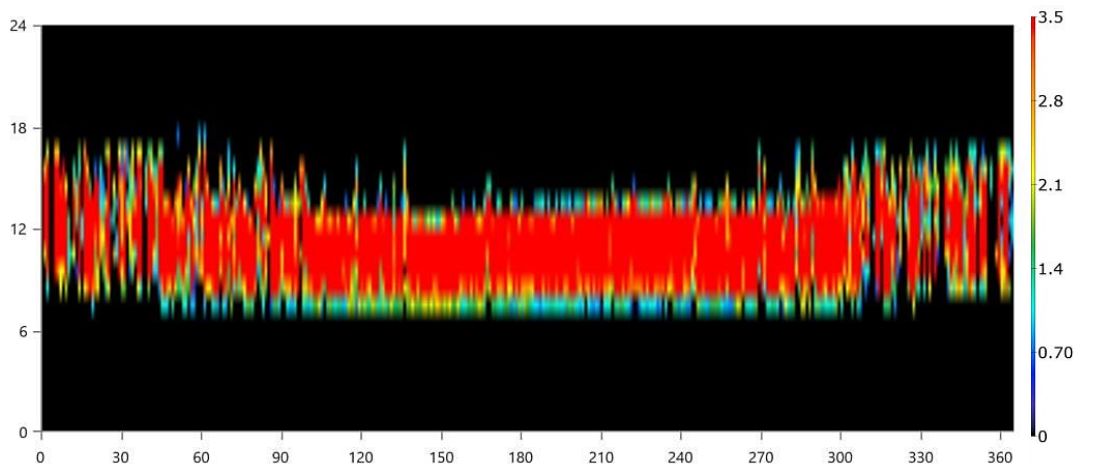
Διάγραμμα 55 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή κατάστασης φόρτισης (%SOC) μπαταριών (Battery) βασικού συστήματος



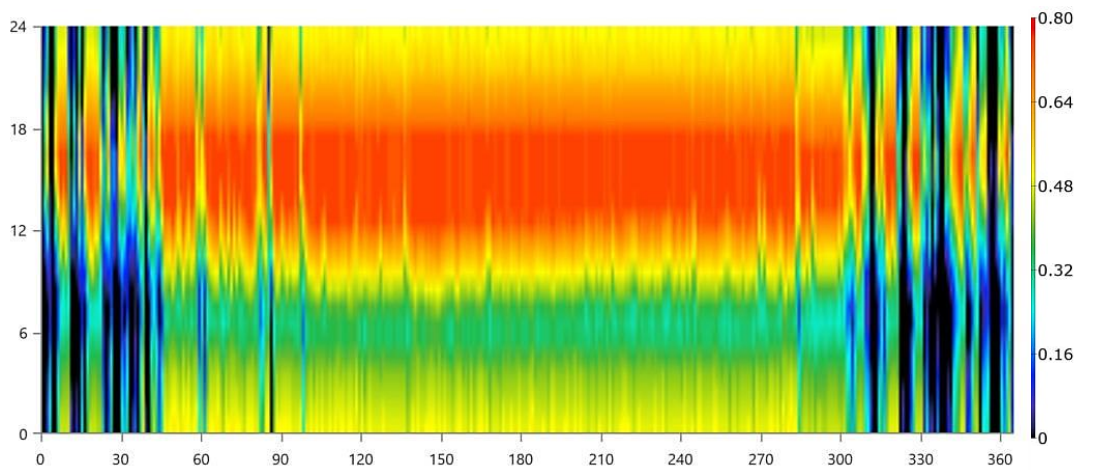
Διάγραμμα 56 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή ισχύος εξόδου κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell) σε kW βασικού συστήματος



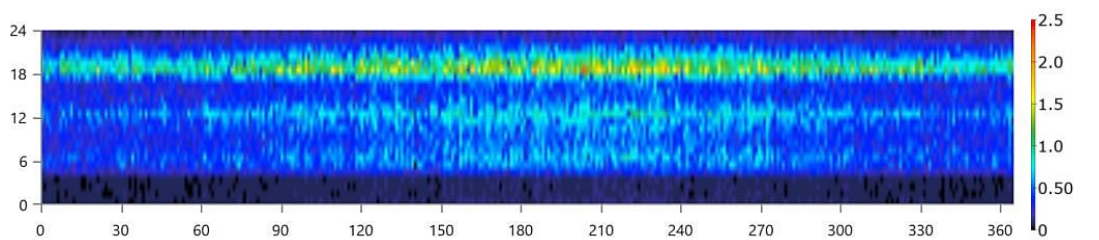
Διάγραμμα 57 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή του ρυθμού κατανάλωσης (kg/h) του αποθηκευμένου υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου βασικού συστήματος



Διάγραμμα 58 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή της ισχύος εισόδου του ηλεκτρολύτη (Electrolyzer) σε kW βασικού συστήματος

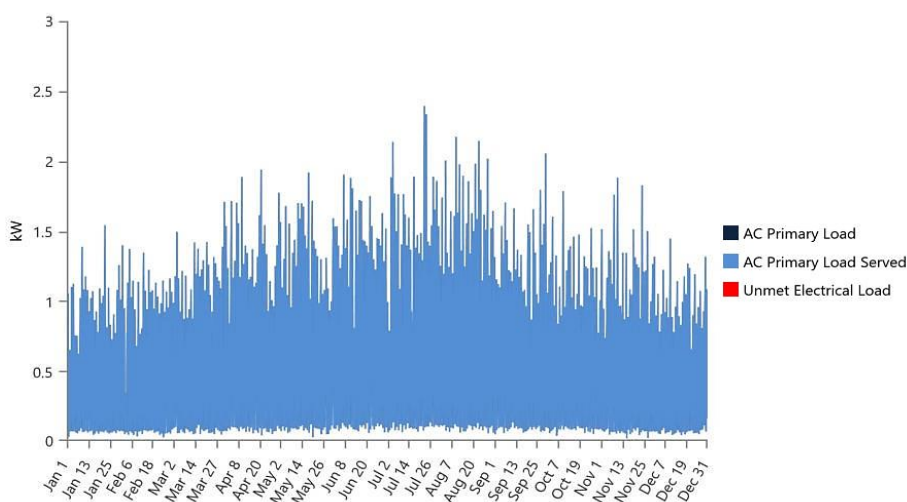


Διάγραμμα 59 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή της "στάθμης" της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου (Hydrogen Tank) σε kg βασικού συστήματος

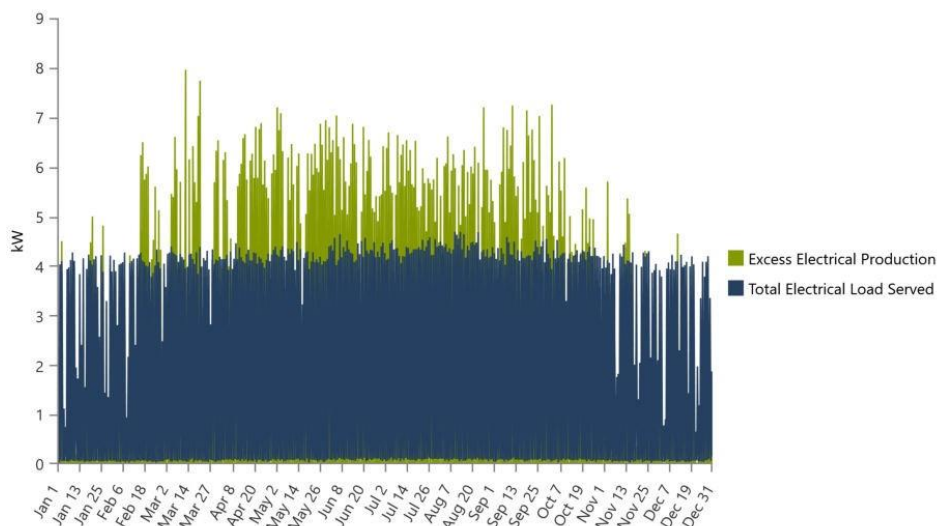


Διάγραμμα 60 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετασχηματιστή (Converter - Inverter Operation - DC to AC) σε kW βασικού συστήματος

Από τα προηγούμενα διαγράμματα, μπορεί να συμπεραθεί ότι η λειτουργία του συστήματος ακολουθεί την αναμενόμενη πορεία. Επιγραμματικά, η πλεονάζουσα ισχύς από τα πάνελ, ιδίως κατά το μεσημέρι, διοχετεύεται στις συστοιχίες μπαταριών και τον ηλεκτρολύτη ώστε να παραχθεί υδρογόνο και να καταλήξει στη δεξαμενή. Γίνεται αντιληπτό ότι με την επικουρία της κυψέλης καυσίμου, κυρίως τις ώρες δίχως ηλιακή ακτινοβολία, το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών δεν πέφτει κάτω από 70% και άρα επιτυγχάνεται έτσι η αύξηση του προσδόκιμου ορθής λειτουργίας των. Τέλος, η ποσότητα του υδρογόνου στη δεξαμενή αποθήκευσης μεγιστοποιείται τις ώρες που η ακτινοβολία είναι μέγιστη και άρα η πλεονάζουσα ισχύς από τα πάνελ, ελαχιστοποιείται τις ώρες που οι απαιτήσεις ισχύος είναι αυξημένες και υπάρχει έλλειμμα και όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 60, ο μετασχηματιστής λειτουργεί όλον το χρόνο για να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια και η ισχύς που αποδίδει μεγιστοποιείται τις βραδινές ώρες του καλοκαιριού αφού έχει θεωρηθεί μέσω του λογισμικού ότι τότε το φορτίο αυξάνεται.



Διάγραμμα 61 Ημερήσια μεταβολή καλυμμένων απαιτήσεων φορτίου και φορτίου που δεν καλύφθηκε βασικού συστήματος



Διάγραμμα 62 Ημερήσια μεταβολή ηλεκτρικού φορτίου που καλύφθηκε και πλεονάζουσας ισχύος βασικού συστήματος

Παρατηρείται μέσω των δύο προηγούμενων διαγραμμάτων ότι το φορτίο AC κατοικίας καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από το αυτόνομο υβριδικό σύστημα και αυτός είναι ο βασικότερος στόχος. Ωστόσο, από τα αποτελέσματα φαίνεται πως οι απαιτήσεις του φορτίου καθώς και οι απαιτήσεις ισχύος εισόδου στον ηλεκτρολύτη που συνιστούν το ολικό ηλεκτρικό φορτίο της εγκατάστασης δεν είναι αρκετά ώστε να καταναλώσουν όλη την διοχετευόμενη ισχύ και άρα υπάρχει πλεονάζουσα ισχύς που δεν χρησιμοποιείται κάπου σε ποσοστό 38.3%. Επομένως, παρακάτω θα γίνει προσπάθεια μέσω βελτιστοποιήσεων στα μεγέθη των συσκευών να επιτευχθεί ένα πιο χαμηλό αχρησιμοποίητο ποσοστό ισχύος, καθώς και ένα χαμηλότερο LCOE, συγκριτικά με αυτό του βασικού συστήματος των 0.452 €/kWh.

5.6 Μοντελοποίηση Βελτιστοποιημένου Συστήματος με HOMERPro

Όπως και για την περίπτωση του βασικού μοντέλου, η μοντελοποίηση του βελτιστοποιημένου συστήματος κινήθηκε επί των ίδιων βασικών δεδομένων όσον αφορά το μοντέλο (Load Following – LF) που ακολουθήθηκε και τις τιμές των επιλεγμένων συσκευών που απαρτίζουν το αυτόνομο υβριδικό σύστημα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που παρουσιάζει ο Πίνακας 14.

Ωστόσο, σύμφωνα με τις δοκιμές και βελτιστοποιήσεις που διεκπεραιώθηκαν έχοντας ως βάση το παραπάνω βασικό σύστημα, το τελικό, προτεινόμενο σύστημα χαρακτηρίζεται από ένα δείκτη LCOE των 0.268 €/kWh, βελτίωση της τάξεως του 40.71%, και το ποσοστό 38.1% πλεονάζουσας ισχύος. Αν και η πλεονάζουσα ισχύς δε μειώθηκε ιδιαίτερα, το σταθμισμένο

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

κόστος ενέργειας (LCOE) και ο δείκτης NPC (Net Present Cost) μειώθηκαν σημαντικά, με το τελευταίο να μειώνεται κατά 42.63%, σε σχέση με αυτόν του βασικού συστήματος. Βασικός λόγος αυτών των διαφορών μεταξύ των δύο συστημάτων είναι η βέλτιστη προσαρμογή του μεγέθους και της ισχύος των υποσυστημάτων στο φορτίο που απαιτείται από την κατοικία, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 17 Βασικά στοιχεία και δεδομένα εισόδου λογισμικού ανά συσκευή του προτεινόμενου συστήματος

Συσκευή	Μέγεθος	Κεφάλαιο (CAPEX)	Αντικατάσταση (Replacement)	Λειτουργία & Συντήρηση (O&M)	Προσδόκιμο	Λοιπές Πληροφορίες	Πηγή
-	-	€/kW(h)	€/kW(h)	€/kW(h)/y	-	-	-
PV	6.3 kW	500	500	22.76	30 χρόνια	Derating Factor: 80%	[27]
Battery	27.6 kWh	104.43	104.43	8.42	20 χρόνια	Throughput (kWh): 6879.6	[64]
Fuel Cell	0.16 kW	444	219.2	17.76	50000 ώρες	Minimum Load Ratio: 25%	[53]
Electrolyzer	1.86 kW	339.06	167.39	13.56	15 χρόνια	Minimum Load Ratio: 20% Efficiency: 85%	[39], [27]
Hydrogen Tank	0.95 kg	470 €/kg	470 €/kg	9.4 €/kg/y	15 χρόνια	-	[27]
Converter	2.45 kW	80	80	1.24	10 χρόνια	Efficiency: 96%	[27]

Για λόγους μίας πιο ακριβούς και ορθής σύγκρισης των δύο συστημάτων και των τεχνοοικονομικών συντελεστών τους, εκτός των τιμών, οι λοιπές πληροφορίες και το προσδόκιμο ορθής λειτουργίας των υποσυστημάτων διατηρήθηκαν σταθερά.

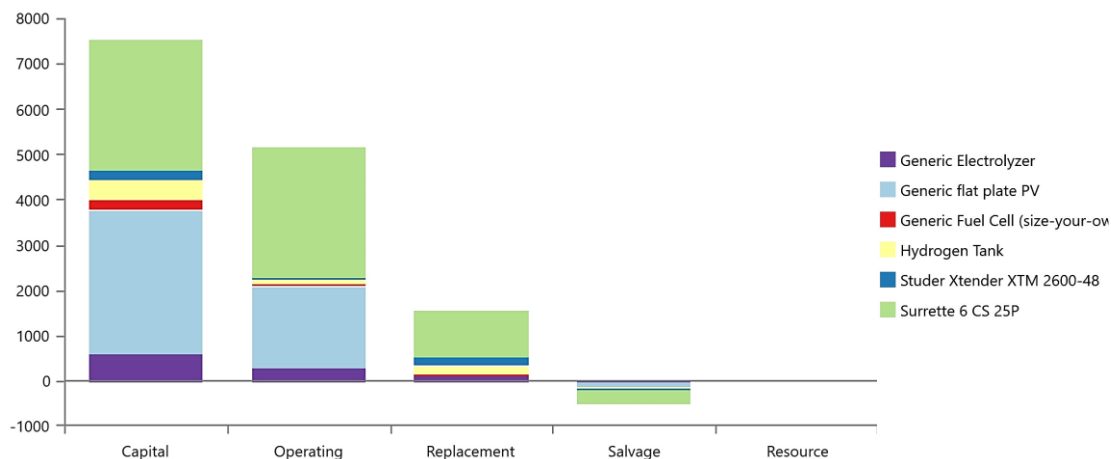
5.7 Προσομοίωση Βελτιστοποιημένου Συστήματος με HOMERPro

Όπως και στην περίπτωση του βασικού συστήματος, παρακάτω θα παρουσιαστούν οι τιμές των NPC και LCOE, με τρόπο συνολικό καθώς και τμηματικό, με τη μορφή των δαπανών κεφαλαίων (CAPEX), αντικατάστασης, λειτουργίας/συντήρησης (OPEX) και των κερδών περισυλλογής (SALVAGE). Η απεικόνιση τους θα έχει πινακοποιημένη μορφή η οποία θα συνοδεύεται από διαγραμματική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.

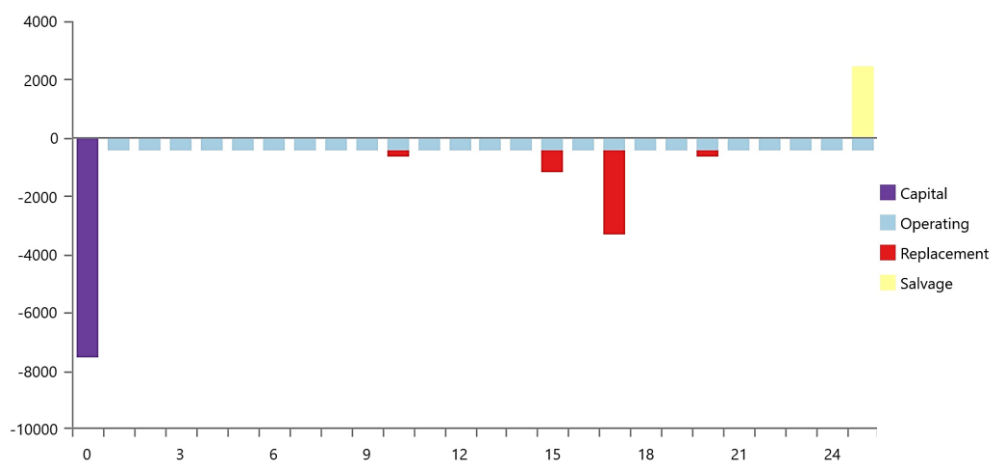
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πίνακας 18 Τιμές NPC ανά συσκευή και συνολικά προτεινόμενου συστήματος

Συσκευή	CAPEX	O&M	Replacement	Salvage	Σύνολο
Peimar SF400M	€3151	€1783	€0.00	-€114.04	€4820
Surrette 6 CS 25P	€2886	€2892	€1022	-€331.80	€6469
Fuel Cell	€211.20	€20.02	€47.50	-€5.91	€272.80
Electrolyzer	€630.65	€313.43	€124.54	-€22.54	€1046
Hydrogen Tank	€446.50	€110.98	€178.60	-€32.32	€703.76
Studer Xtender XTM 2600 – 48	€196.06	€37.78	€164.22	-€21.29	€376.77
Σύστημα	€7522	€5157	€1537	-€527.89	€13688

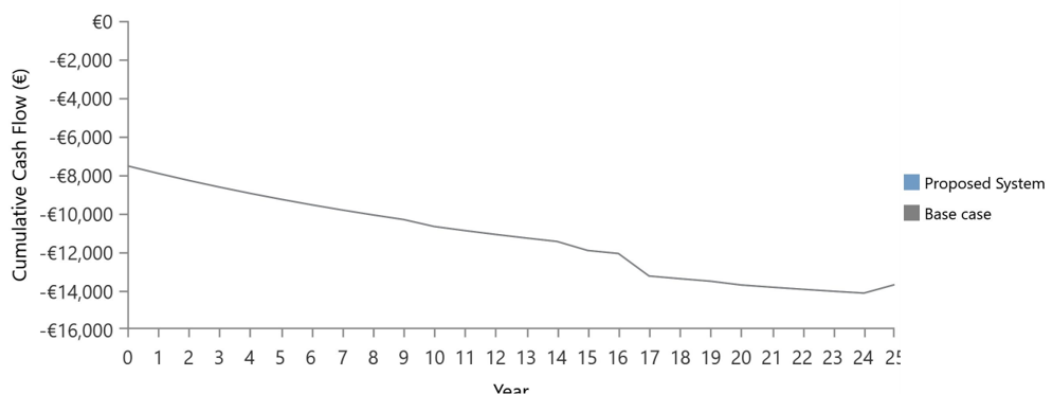


Διάγραμμα 63 Απεικόνιση τμηματικών και συνολικών τιμών NPC προτεινόμενου συστήματος

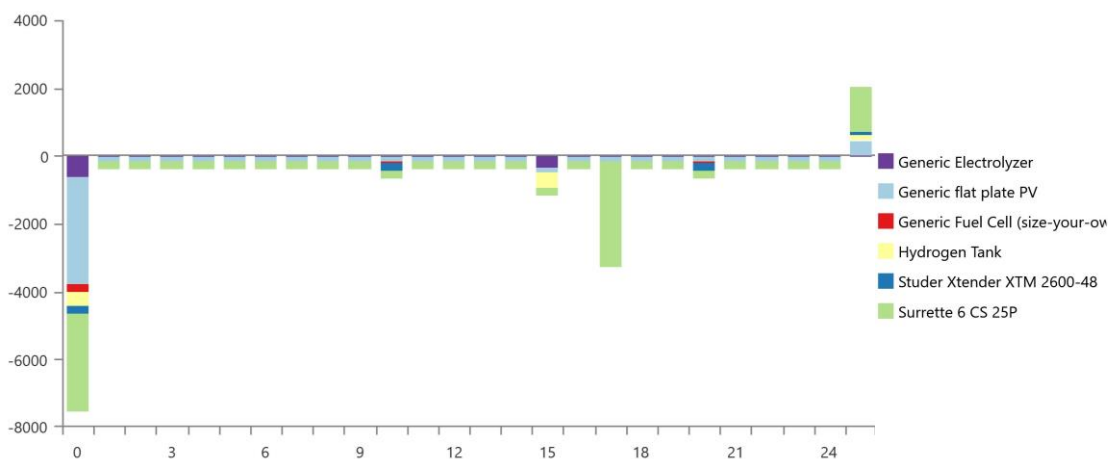


Διάγραμμα 64 Απεικόνιση τμηματικών τιμών χρηματικής ροής προτεινόμενου συστήματος χωρίς τη χρονική συνιστώσα του χρήματος (nominal cash flow) βάσει συνιστωσών δαπανών ανά χρόνο του επενδυτικού ορίζοντα

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Διάγραμμα 65 Απεικόνιση συνολικών τιμών χρηματικής ροής ανά συσκευή του προτεινόμενου συστήματος συμπεριλαμβανομένης της χρονικής συνιστώσας του χρήματος (discounted cash flow) ανά χρόνο του επενδυτικού ορίζοντα



Διάγραμμα 66 Απεικόνιση τιμών χρηματικής ροής ανά συσκευή του προτεινόμενου συστήματος χωρίς τη χρονική συνιστώσα του χρήματος (nominal cash flow) ανά χρόνο του επενδυτικού ορίζοντα

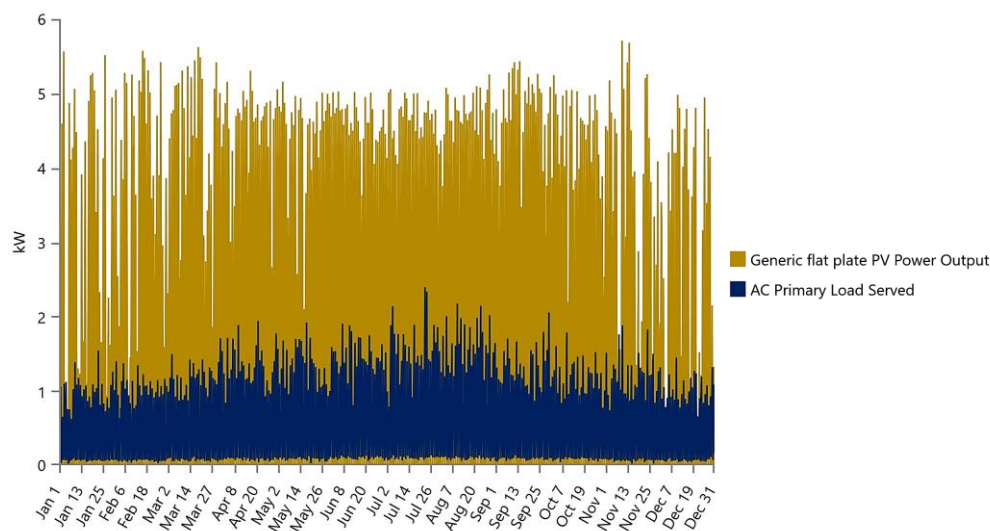
Πίνακας 19 Βασικότεροι τεχνοοικονομικοί συντελεστές προτεινόμενου συστήματος

Προτεινόμενο Σύστημα (Proposed System)	
NPC	€13688
CAPEX	€7522
O&M	€5157
LCOE	0.268 €/kWh
Κατανάλωση Καυσίμου	50.4 kg/y

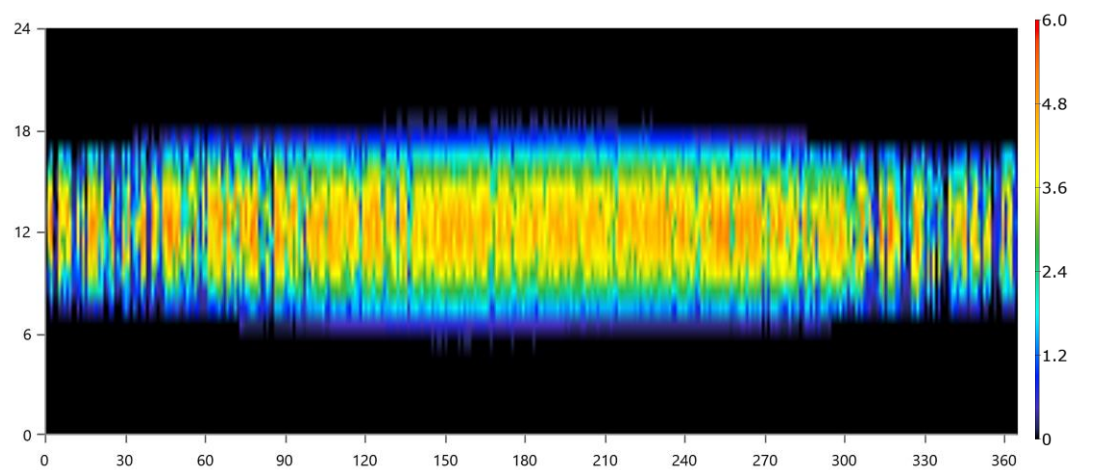
Γίνεται εμφανές από τα προηγούμενα διαγράμματα και τους πίνακες ότι η μείωση των NPC και LCOE ήταν μονόδρομος στην περίπτωση του νέου, βελτιστοποιημένου συστήματος αφού τα μεγέθη των υποσυστημάτων μειώθηκαν σημαντικά, εκτός από το μετασχηματιστή που παρέμεινε σχεδόν ίδιος και τη δεξαμενή αποθήκευσης που αυξήθηκε ποσοστιαία κατά 17.79%. Πιο συγκεκριμένα, η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών μειώθηκε κατά 37%,

αυτή της κυψέλης καυσίμου κατά 73.33% περίπου, η αντίστοιχη του ηλεκτρολύτη κατά 46.86% και οι συστοιχίες μπαταριών μειώθηκαν από δύο σε μία. Σημειώνεται ότι όλες οι προαναφερθείσες μεταβολές παρουσιάζονται σε σχέση με το βασικό σύστημα.

Ορμώμενοι λοιπόν από αυτές τις σημαντικές αλλαγές, το τεχνοοικονομικό «τοπίο» έχει αλλάξει όσον αφορά την αποδοτική χρήση όλων των υποσυστημάτων, όπως και φαίνεται στα επόμενα διαγράμματα.



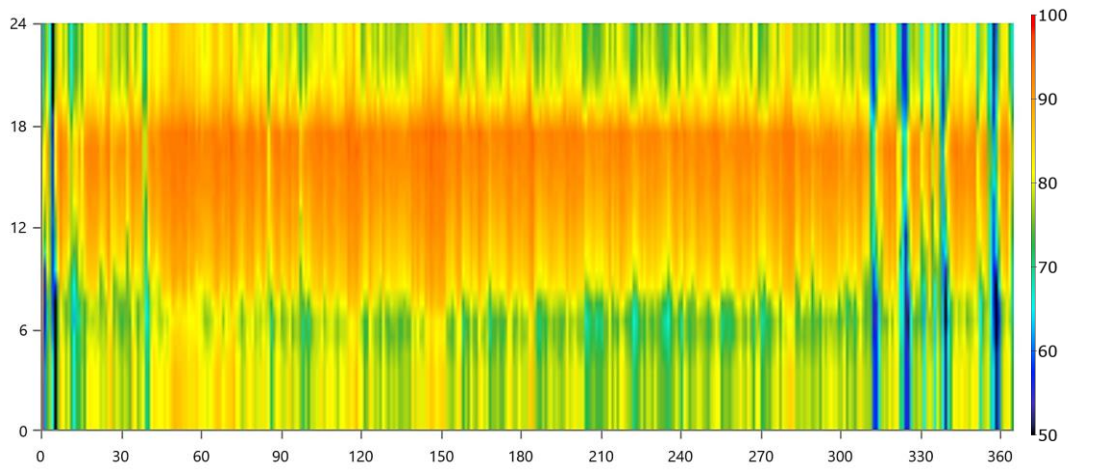
Διάγραμμα 67 Ημερήσια μεταβολή ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκών (PV) και φορτίου (Load) προτεινόμενου συστήματος



Διάγραμμα 68 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκών (PV) σε kW προτεινόμενου συστήματος

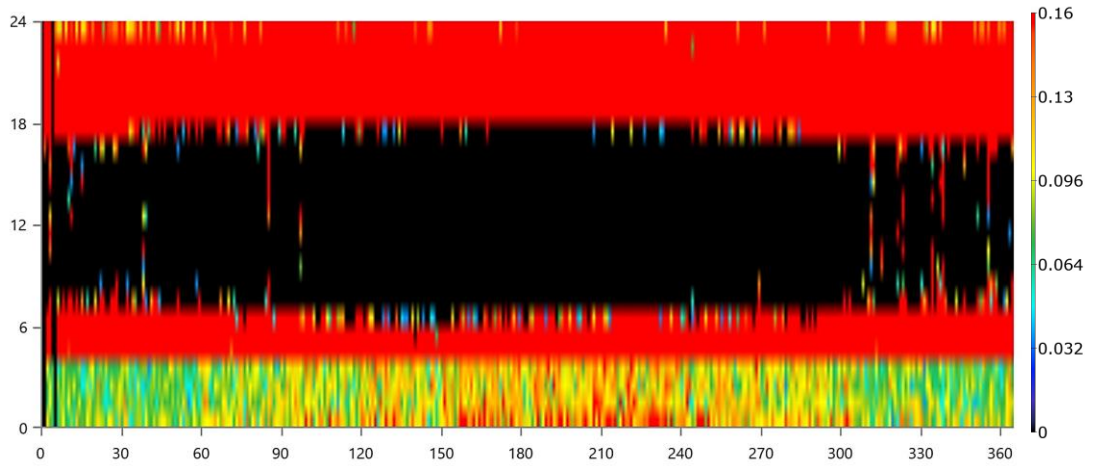
Συγκριτικά με το βασικό σύστημα, η μείωση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πάνελ και άρα την ονομαστικής ισχύος της συστοιχίας δεν έχει τόσο ισχυρό αντίκτυπο στα τεχνοοικονομικά αποτελέσματα εκτός από τη χαμηλότερη ισχύ εξόδου. Ωστόσο, η πηγή ισχύος αυτή καλύπτει κατά 100% το προβλεπόμενο φορτίο της εγκατάστασης (ίδιο με αυτό του βασικού

συστήματος), όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 68, με μειωμένο κόστος επένδυσης όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, και άρα αποτελεί ισχυρό πυλώνα οικοδόμησης του βελτιστοποιημένου συστήματος.

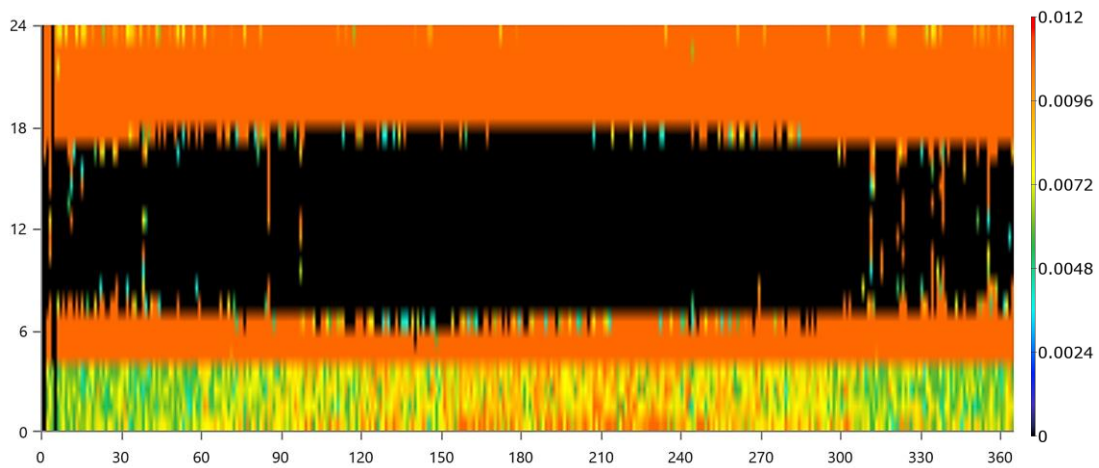


Διάγραμμα 69 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή κατάστασης φόρτισης (%SOC) μπαταριών (Battery) προτεινόμενου συστήματος

Για το προτεινόμενο σύστημα, οι συστοιχίες των μπαταριών μειώθηκαν από δύο του βασικού συστήματος σε μία και μοναδική αφού οι απαιτήσεις ισχύος της εγκατάστασης καλύπτονται επαρκώς ως φαίνεται από την προσομοίωση και ταυτοχρόνως, η αλλαγή αυτή αποδείχθηκε μεγάλης βαρύτητας όσον αφορά τη μείωση του διαχρονικού κόστους της επένδυσης που εξετάζεται. Πιο συγκεκριμένα, η «στάθμη» των μπαταριών φτάνει το 50% (χαμηλότερο επιτρεπτό όριο αποφόρτισης) αρκετές φορές κατά τη διάρκεια του ετήσιου χρονικού ορίζοντα και αυτό δείχνει ότι αξιοποιούνται στο έπακρο με αυτές τις συνθήκες που έχουν οριστεί και το προσδόκιμο τους, αν και μειώθηκε σε σχέση με τα 20 χρόνια στο βασικό σύστημα, επαρκεί στα 17 χρόνια για την κάλυψη των αναγκών του συστήματος.

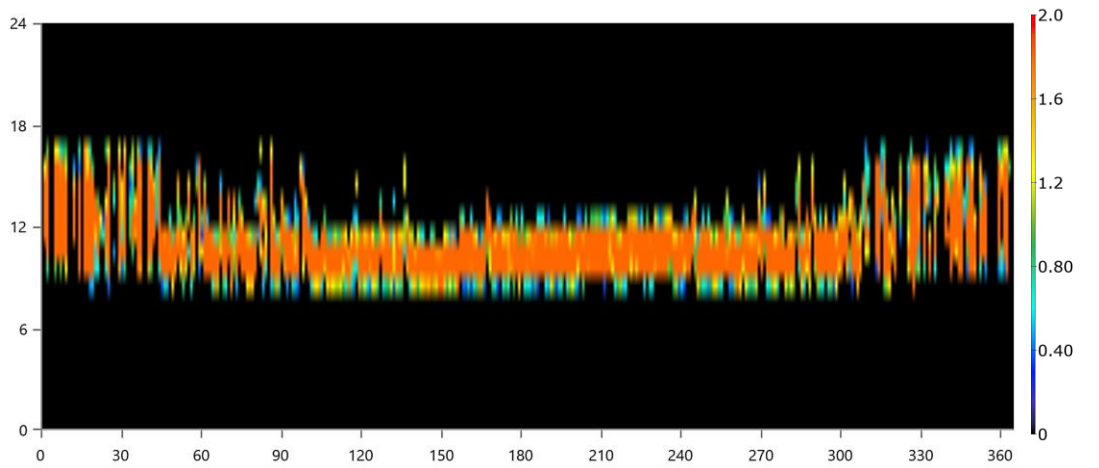


Διάγραμμα 70 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή ισχύος εξόδου κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell) σε kW προτεινόμενου συστήματος

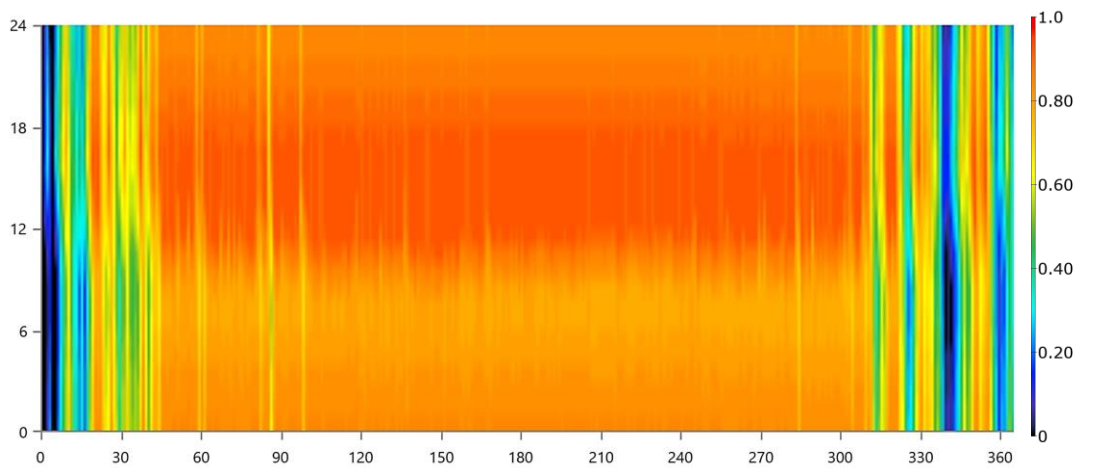


Διάγραμμα 71 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή του ρυθμού κατανάλωσης (kg/h) του αποθηκευμένου υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου προτεινόμενου συστήματος

Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα διαγράμματα που προέκυψαν από το λογισμικό, στην περίπτωση του βελτιστοποιημένου συστήματος, η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί πιο κοντά στο μέγιστο της ονομαστικής του ισχύος και περισσότερες ώρες από αυτήν του βασικού συστήματος μέσα στο χρόνο. Οπότε, αν και το προσδόκιμο ζωής μειώνεται από 11.4 χρόνια (βασικό σύστημα) σε 9.93, η μέση ηλεκτρική απόδοση και ο συντελεστής φορτίου (Capacity Factor – CF) έχουν φτάσει το 42.1% (από 31.6%) και το 50.5% (από 29.8%), αντιστοίχως. Επομένως, και ο λόγος ρυθμού κατανάλωσης υδρογόνου προς το μέγιστο ρυθμό κατανάλωσης από την κυψέλη καυσίμου αυξάνεται.



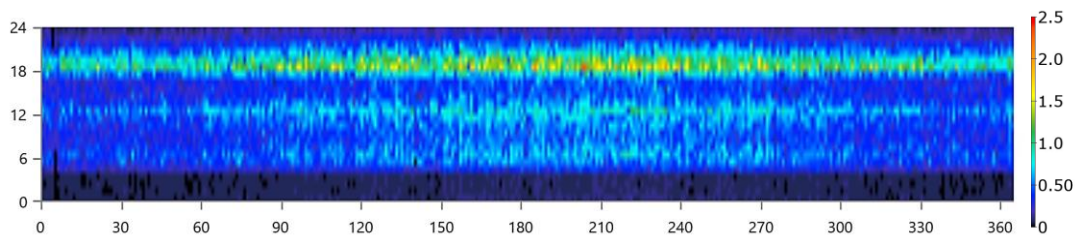
Διάγραμμα 72 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή της ισχύος εισόδου του ηλεκτρολύτη (Electrolyzer) σε kW προτεινόμενου συστήματος



Διάγραμμα 73 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή της "στάθμης" της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου (Hydrogen Tank) σε kg προτεινόμενου συστήματος

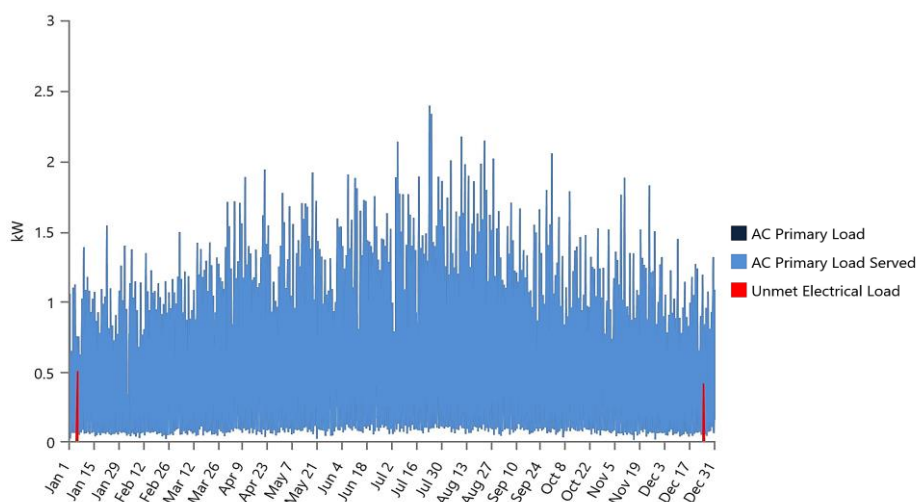
Τα παραπάνω διαγράμματα υποδεικνύουν ακριβώς τη μείωση της ονομαστικής ισχύος της κυψέλης καυσίμου αφού ο ηλεκτρολύτης, αν και μειωμένης ονομαστικής ισχύος συγκριτικά με αυτόν του βασικού συστήματος, χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο CF = 14.4% (από 22.5%), 1546 ώρες λειτουργίας ανά χρόνο (από 2399) και πιο σημαντικό όλων υποτριπλασιασμό του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου αφού η δεξαμενή αποθήκευσης, αν και μεγαλύτερη σε χωρητικότητα, γεμίζει και παραμένει γεμάτη το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου (εκτός του χειμώνα) λόγω αδυναμίας της κυψέλης καυσίμου να «τραβήξει» μεγαλύτερες ποσότητες υδρογόνου όπως αυτή του βασικού συστήματος.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

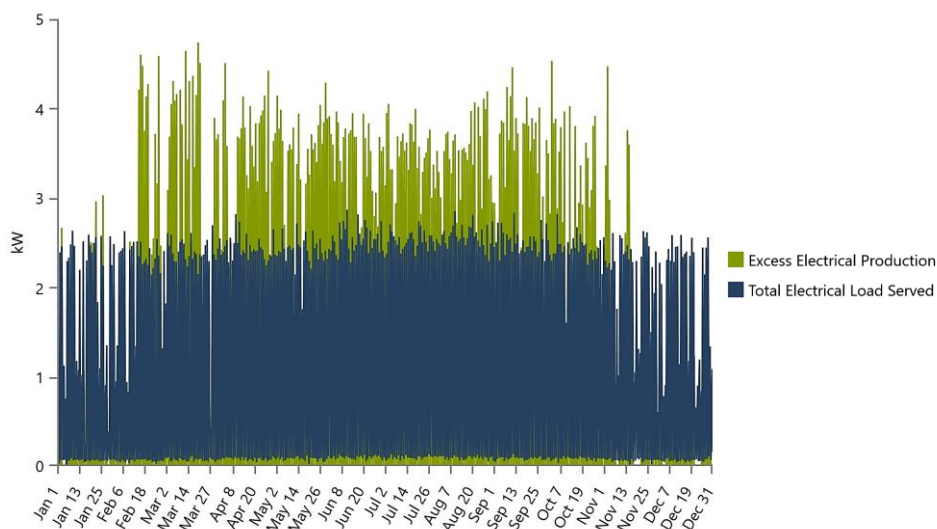


Διάγραμμα 74 Ημερήσια και ωριαία μεταβολή της ισχύος εξόδου του μετασχηματιστή (Converter - Inverter Operation - DC to AC) σε kW προτεινόμενου συστήματος

Ως προς τον μετασχηματιστή του προτεινόμενου συστήματος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν επηρεάζει τόσο τα τεchnοοικονομικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος και στην προκειμένη περίπτωση, οι αλλαγές επ' αυτού είναι αμελητέες.



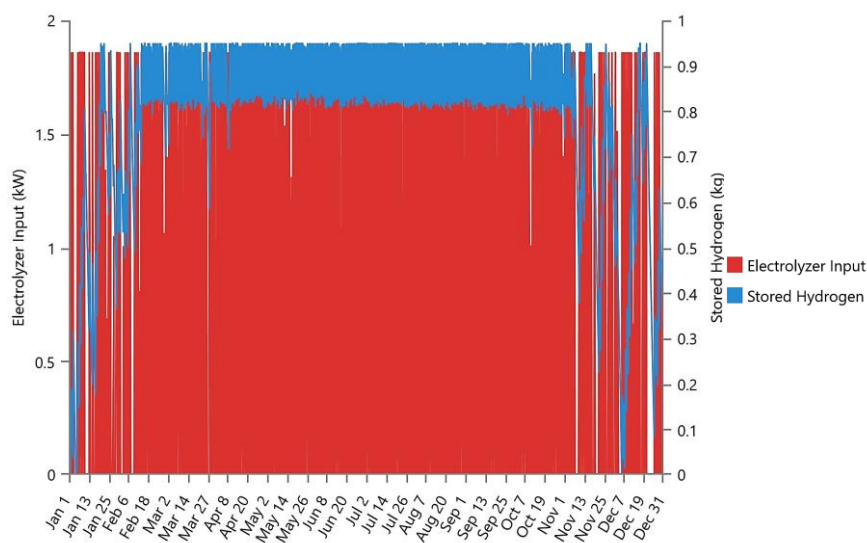
Διάγραμμα 75 Ημερήσια μεταβολή καλυμμένων απαιτήσεων φορτίου AC και φορτίου που δεν καλύφθηκε προτεινόμενου συστήματος



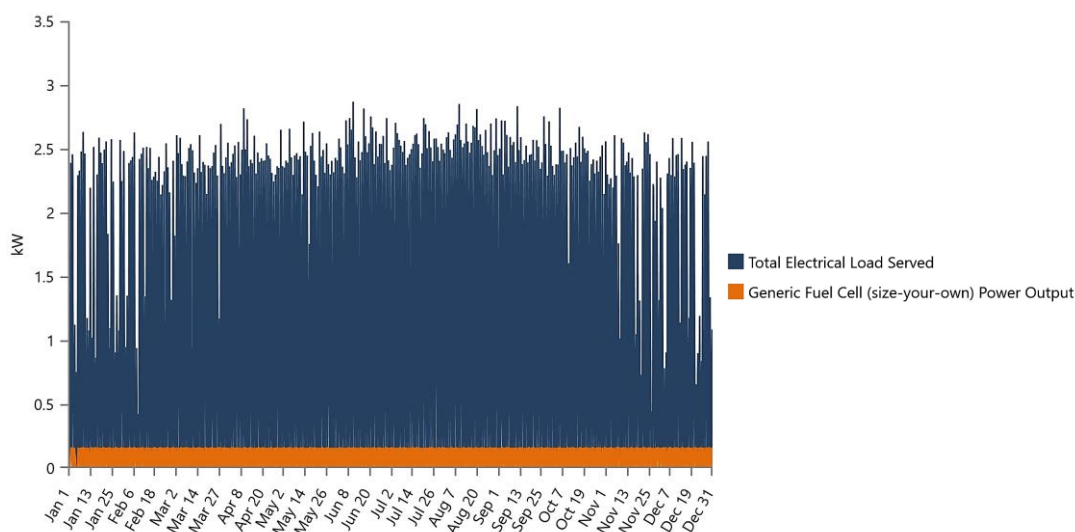
Διάγραμμα 76 Ημερήσια μεταβολή ηλεκτρικού φορτίου που καλύφθηκε και πλεονάζουσας ισχύος προτεινόμενου συστήματος

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Με βάση τα προηγούμενα δύο διαγράμματα, γίνεται εμφανές ότι το βελτιστοποιημένο σύστημα καλύπτει ολοκληρωτικά τις απαιτήσεις φορτίου της κατοικίας, με το ακάλυπτο φορτίο στη διάρκεια του χρόνου να μην ξεπερνά το 0.08% στις 4110 kWh/y. Σε περίπτωση που το ποσοστό αυτό ήταν μεγαλύτερο και το ακάλυπτο φορτίο βρισκόταν σε ένα χρονικό πλαίσιο καίριο (και όχι κατά τις βραδινές και μεταμεσονύχτιες ώρες), τότε το πρόγραμμα θα παρουσίαζε πρόβλημα κατά την προσομοίωση αφού ο βασικότερος περιορισμός είναι η ολική κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων και άρα, το λογισμικό συμπέρανε ότι αυτή η απόκλιση θεωρείται αμελητέα.



Διάγραμμα 77 Ημερήσια μεταβολή ισχύος εισόδου ηλεκτρολύτη (Electrolyzer) και αποθηκευμένου υδρογόνου προτεινόμενου συστήματος



Διάγραμμα 78 Ημερήσια μεταβολή συνολικού φορτίου που καλύφθηκε και ισχύος εξόδου κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell) προτεινόμενου συστήματος

Από το Διάγραμμα 77 τώρα προκύπτει ότι όταν ο ηλεκτρολύτης λειτουργεί με μεγαλύτερη ισχύ εισόδου και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (πχ καλοκαιρινοί μήνες), τότε και το αποθηκευμένο υδρογόνο είναι μέγιστο και διατηρεί μία σταθερή πορεία μεταβολών, ενώ όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι περιορισμένη (πχ χειμερινοί μήνες) η ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου δύναται εύκολα μειωθεί σημαντικά έως το μηδέν, λόγω μείωσης της πλεονάζουσας ισχύος και αύξησης της απαιτούμενης ισχύος (μείωση καθαρότητας ουρανού, μείωση του χρονικού μήκους της μέρας σε σχέση με τη νύχτα).

Από την άλλη μεριά, η κυψέλη καυσίμου, ουσιαστικά λόγω της μειωμένης ονομαστικής ισχύος σε σχέση με το βασικό σύστημα, συνεισφέρει λιγότερο στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου με ποσοστό 6.28% (από 8.55%), όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 78. Ωστόσο, όσο χαμηλό και να φαίνεται αυτό το ποσοστό, έχει ιδιαίτερη σημασία στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων που τίθενται για την εγκατάσταση. Επιπλέον, το σταθμισμένο κόστος του υδρογόνου (LCOH) υπολογίστηκε στα 21.7 €/kg για την περίπτωση της βελτιστοποίησης, τιμή η οποία είναι πολύ υψηλή και οφείλεται στη μειωμένη παραγωγή υδρογόνου από τον ηλεκτρολύτη λόγω αδυναμίας κατανάλωσης του από την κυψέλη καυσίμου και άρα, υπερχειλίσης της δεξαμενής αποθήκευσης. Προχωρώντας σε περαιτέρω δοκιμές και προσομοιώσεις, σε περίπτωση που το παραγόμενο υδρογόνο απαιτείται να δοθεί προς πώληση τότε μία αύξηση της ονομαστικής ισχύος της κυψέλης και της χωρητικότητας της δεξαμενής, με παράλληλη αύξηση της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών, θα βοηθούσε στη μείωση του LCOH έως τα 7 €/kg, με ταυτόχρονη όμως αύξηση των NPC και LCOE και άρα, δημιουργώντας μη συμφέρουσες επενδυτικές συνθήκες.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα και στοιχεία που παρουσιάστηκαν εντός της παρούσας εργασίας, γίνεται αντιληπτό πως ένα αυτόνομο, υβριδικό σύστημα παραγωγής πράσινου υδρογόνου με χρήση φωτοβολταϊκών μπορεί να λειτουργήσει, καλύπτοντας ολοκληρωτικά τις ενεργειακές απαιτήσεις της εκάστοτε εγκατάστασης και οι εφαρμογές του ποικίλουν, από οικιακές και βιομηχανικής φύσεως έως προσανατολισμένες στον ενεργειακό κορεσμό μίας κοινότητας. Ωστόσο, όπως αναδείχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές τιμές που επικρατούν στην αγορά για το κάθε «κομμάτι» που συνιστά το σύστημα αυτό, η «εξίσωση» του βέλτιστου σχεδιασμού και υλοποίησης ενός τέτοιου σύνθετου πρότζεκτ παρουσιάζει περαιτέρω θέματα και μεταβλητές (αυξομειώσεις τιμών εξαρτημάτων, διακυμάνσεις απωλειών, χωρικοί περιορισμοί εγκατάστασης κ.α.), τα οποία δεν είναι το ίδιο προσπελάσιμα και χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Η παρούσα εργασία κατέληξε σε αποτελέσματα και τελικές τιμές οι οποίες δε θα μπορούσαν να προκύψουν δίχως τη χρήση παραδοχών και ημί – εμπειρικών προσεγγίσεων, σύμφωνα πάντοτε με εμπειριστατωμένα μοντέλα και πρακτικές αντλούμενες από τη βιβλιογραφία, όπως και σημειώνεται σε πολλά σημεία. Ωστόσο, η ανάλυση αυτή αποτελεί ορμητήριο και βασική πηγή άντλησης πληροφοριών περί τη δημιουργία μίας πλήρως λειτουργικής εγκατάστασης, σε οποιαδήποτε κλίμακα χρειαστεί. Επιπλέον, ο ανανεώσιμος χαρακτήρας, η εκμηδένιση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και η όλο και μεγαλύτερη οικονομική ανταγωνιστικότητα αυτών των εγκαταστάσεων, συγκριτικά με τις συμβατικές του πετρελαίου και του λιγνίτη, ενθαρρύνουν την περαιτέρω προώθηση της έρευνας και ανάπτυξης σε αυτούς τους τομείς σε παγκόσμιο επίπεδο. Το σημαντικότερο που επιβάλλεται λοιπόν να κατανοηθεί από τα τελικά τεχνοοικονομικά αποτελέσματα είναι ότι το επενδυτικό εγχείρημα ενός αυτόνομου, υβριδικού συστήματος πράσινου υδρογόνου από φωτοβολταϊκά πάνελ φαντάζει πλέον πιο προσιτό από ποτέ και έως το 2030, υπολογίζεται πως, υπό την αιγίδα προγραμμάτων και χρηματοδοτικών εργαλείων όπως της Ευρωπαϊκής Τράπεζας Υδρογόνου (European Hydrogen Bank) που παρουσιάστηκε το Μάρτιο του 2023, θα διευκολυνθούν οι επενδυτικές προσπάθειες, εντός και εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω διασύνδεσης της ευρωπαϊκής ενεργειακής αγοράς με παροχές ανανεώσιμου υδρογόνου και εύρεσης λύσεων για την κάλυψη του αρχικού επενδυτικού κόστους [65]. Όμως, για την επίτευξη όλων αυτών των στόχων που έχουν τεθεί όσον αφορά το πράσινο υδρογόνο, είναι αδήριτη ανάγκη η βελτιστοποίηση του ενεργειακού συστήματος να έρθει σε πρώτη μοίρα, με γνώμονα **αμφότερα** το περιβάλλον και το «πορτοφόλι». Διότι, η ύπαρξη ισορροπίας ή όχι σε τέτοιου είδους μείζονα θέματα θα καθορίσει τη συνέχεια ή την ανακοπή της ανθρώπινη πορείας.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. Ghribi, A. Khelifa, S. Diaf, and M. Belhamel, 'Study of hydrogen production system by using PV solar energy and PEM electrolyser in Algeria', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, no. 20, pp. 8480–8490, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.175.
- [2] 'CO2 Emissions in 2022 – Analysis - IEA'. Accessed: Aug. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [3] 'Electricity - Energy System', IEA. Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/electricity>
- [4] Michael, 'Major Breakthrough in Solar Panel Efficiency', The Renewable Energy Institute. Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.renewableinstitute.org/major-breakthrough-in-solar-panel-efficiency/>
- [5] 'Hydrogen', IEA. Accessed: Aug. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- [6] *Solar Hydrogen Production*. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/C2017-0-02289-9.
- [7] S. Dunn, 'Hydrogen, History of', in *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 2004, pp. 241–252. doi: 10.1016/B0-12-176480-X/00039-5.
- [8] A. Nechache, M. Cassir, and A. Ringuedé, 'Solid oxide electrolysis cell analysis by means of electrochemical impedance spectroscopy: A review', *J. Power Sources*, vol. 258, pp. 164–181, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.110.
- [9] 'Hydrogen Production: Water Electrolysis', Découvrez la Greentech. Accessed: Sep. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.discoverthegreentech.com/en/hydrogen/production/electrolysis/>
- [10] D. Guban, I. K. Muritala, M. Roeb, and C. Sattler, 'Assessment of sustainable high temperature hydrogen production technologies', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, no. 49, pp. 26156–26165, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.145.
- [11] H. Dotan *et al.*, 'Decoupled hydrogen and oxygen evolution by a two-step electrochemical–chemical cycle for efficient overall water splitting', *Nat. Energy*, vol. 4, no. 9, pp. 786–795, Sep. 2019, doi: 10.1038/s41560-019-0462-7.
- [12] D. B. Pal, A. Singh, and A. Bhatnagar, 'A review on biomass based hydrogen production technologies', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 3, pp. 1461–1480, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.124.
- [13] H. Luo *et al.*, 'Progress and Perspectives in Photo- and Electrochemical-Oxidation of Biomass for Sustainable Chemicals and Hydrogen Production', *Adv. Energy Mater.*, vol. 11, no. 43, p. 2101180, Nov. 2021, doi: 10.1002/aenm.202101180.
- [14] A. Ajanovic, M. Sayer, and R. Haas, 'The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 57, pp. 24136–24154, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.094.

- [15] M. Hermesmann and T. E. Müller, 'Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems', *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 90, p. 100996, May 2022, doi: 10.1016/j.pecs.2022.100996.
- [16] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, 'A comparative overview of hydrogen production processes', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 597–611, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
- [17] 'The Future of Hydrogen'.
- [18] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, 'A comprehensive review on PEM water electrolysis', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, no. 12, pp. 4901–4934, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [19] S. Shiva Kumar and H. Lim, 'An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production', *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 13793–13813, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.127.
- [20] L. Zhang *et al.*, 'A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies', *Fuel*, vol. 355, p. 129455, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.129455.
- [21] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, 'Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review', *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 442–454, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [22] Q. Xu *et al.*, 'Anion Exchange Membrane Water Electrolyzer: Electrode Design, Lab-Scaled Testing System and Performance Evaluation', *EnergyChem*, vol. 4, no. 5, p. 100087, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.enchem.2022.100087.
- [23] C. Meurer, H. Barthels, W. A. Brocke, B. Emonts, and H. G. Groehn, 'PHOEBUS—AN AUTONOMOUS SUPPLY SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY: SIX YEARS OF OPERATIONAL EXPERIENCE AND ADVANCED CONCEPTS'.
- [24] Y. Ulleberg, 'STAND-ALONE POWER SYSTEMS FOR THE FUTURE: OPTIMAL DESIGN, OPERATION & CONTROL OF SOLAR-HYDROGEN ENERGY SYSTEMS'.
- [25] B. Mahmah *et al.*, 'MedHySol: Future federator project of massive production of solar hydrogen', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 4922–4933, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.068.
- [26] 'Global Hydrogen Review 2022', 2022.
- [27] P. Marocco, D. Ferrero, A. Lanzini, and M. Santarelli, 'Optimal design of stand-alone solutions based on RES + hydrogen storage feeding off-grid communities', *Energy Convers. Manag.*, vol. 238, p. 114147, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114147.
- [28] Γ. Βεζαράκης and Κ. Κωνσταντίνου, 'Μοντελοποίηση και Βέλτιστος Σχεδιασμός Ολοκληρωμένου Αυτόνομου Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ με Παράλληλη Αποθήκευση και Χρήση Υδρογόνου'. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2008. [Online]. Available: https://users.auth.gr/~seferlis/diploma_el_files/2008_Vezyrakis_Giorgos_&_Konstantinou_Costas.pdf

- [29] T. Ahmad, S. Sobhan, and Md. F. Nayan, 'Comparative Analysis between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect on Its Efficiency', *J. Power Energy Eng.*, vol. 04, no. 03, pp. 31–46, 2016, doi: 10.4236/jpee.2016.43004.
- [30] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes / John A. Duffie, William A. Beckman*, 4th ed. Hoboken: John Wiley, 2013.
- [31] B. Laoun, A. Khellaf, M. W. Naceur, and A. M. Kannan, 'Modeling of solar photovoltaic-polymer electrolyte membrane electrolyzer direct coupling for hydrogen generation', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 24, pp. 10120–10135, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.041.
- [32] 'Spec Sheet for Peimar SF400M (BF)'. PEIMAR, 2023. [Online]. Available: [https://www.peimar.com/datasheet/Peimar_EN_SF400M\(BF\).pdf](https://www.peimar.com/datasheet/Peimar_EN_SF400M(BF).pdf)
- [33] P. Acharya, M. N. Shaikh, S. K. Jha, and A. P. Papadakis, 'Electrical Modelling Of a Photovoltaic Module', in *Engineering and Industry*, vol. 3, F. Mavromatakis and K. Siderakis, Eds., Trivent Publishing, 2016. doi: 10.22618/TP.El.20163.389014.
- [34] I. Kaj and V. Konané, 'Modeling battery cells under discharge using kinetic and stochastic battery models', *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 17–18, pp. 7901–7915, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.apm.2016.03.049.
- [35] J. F. Manwell and J. G. McGowan, 'Lead acid battery storage model for hybrid energy systems', *Sol. Energy*, vol. 50, no. 5, pp. 399–405, May 1993, doi: 10.1016/0038-092X(93)90060-2.
- [36] '97/03899 A combined optimisation concept for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems', *Fuel Energy Abstr.*, vol. 38, no. 5, p. 327, Sep. 1997, doi: 10.1016/S0140-6701(97)81191-5.
- [37] 'Surrette 6 CS 25P - 5000 Series Spec Sheet'. Rolls - Surrette Battery Company Limited, 2022. [Online]. Available: <https://www.rollsbattery.com/battery/6-cs-25p/?pdf=7923>
- [38] 'How to charge all lead acid batteries; how to charge SLA lead acid batteries, a tutorial for engineers about lead acid chargers and charging.' Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.powerstream.com/SLA.htm>
- [39] S. Krishnan *et al.*, 'Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 83, pp. 32313–32330, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.031.
- [40] O. Ulleberg, 'Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 28, no. 1, pp. 21–33, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00033-2.
- [41] M. Sánchez, E. Amores, L. Rodríguez, and C. Clemente-Jul, 'Semi-empirical model and experimental validation for the performance evaluation of a 15 kW alkaline water electrolyzer', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 43, no. 45, pp. 20332–20345, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.029.

- [42] R. L. LeRoy, C. T. Bowen, and D. J. LeRoy, 'The Thermodynamics of Aqueous Water Electrolysis', *J. Electrochem. Soc.*, vol. 127, no. 9, pp. 1954–1962, Sep. 1980, doi: 10.1149/1.2130044.
- [43] '16.7: Electrolysis', Chemistry LibreTexts. Accessed: Nov. 30, 2023. [Online]. Available: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Chemistry_-_Atoms_First_1e_\(OpenSTAX\)/16%3A_Electrochemistry/16.7%3A_Electrolysis](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Chemistry_-_Atoms_First_1e_(OpenSTAX)/16%3A_Electrochemistry/16.7%3A_Electrolysis)
- [44] M. Sánchez, E. Amores, D. Abad, L. Rodríguez, and C. Clemente-Jul, 'Aspen Plus model of an alkaline electrolysis system for hydrogen production', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3916–3929, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.027.
- [45] N. Skordoulias, E. I. Koytsoumpa, and S. Karellas, 'Techno-economic evaluation of medium scale power to hydrogen to combined heat and power generation systems', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, no. 63, pp. 26871–26890, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.057.
- [46] D. Melideo, A. Liponi, D. Rastelli, M. E. Rizza, L. Ferrari, and U. Desideri, 'EFFECTS OF RENEWABLE ENERGY UNSTABLE SOURCE TO HYDROGEN PRODUCTION: SAFETY CONSIDERATIONS'.
- [47] 'Electrolytes', in *Aspen Plus®*, John Wiley & Sons, Ltd, 2016, pp. 301–324. doi: 10.1002/9781119293644.ch11.
- [48] E. F. Fuchs and M. A. S. Masoum, 'Power quality solutions for renewable energy systems', in *Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives*, Elsevier, 2023, pp. 1087–1208. doi: 10.1016/B978-0-12-817856-0.00012-1.
- [49] N. Klopčič, I. Grimmer, F. Winkler, M. Sartory, and A. Trattner, 'A review on metal hydride materials for hydrogen storage', *J. Energy Storage*, vol. 72, p. 108456, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108456.
- [50] J. M. Andújar and F. Segura, 'Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2309–2322, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.03.015.
- [51] A. A. Kulikovskiy, H.-F. Oetjen, and Ch. Wannek, 'A Simple and Accurate Method for High-Temperature PEM Fuel Cell Characterisation', *Fuel Cells*, vol. 10, no. 3, pp. 363–368, Jun. 2010, doi: 10.1002/fuce.200900135.
- [52] S. Touré, A. Konaté, D. Traoré, and D. Fofana, 'Novel determination method of charge transfer coefficient of PEM fuel cell using the Lagrange's multiplier method', *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 188, p. 012041, Oct. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/188/1/012041.
- [53] A. Kampker, H. Heimes, M. Kehrer, S. Hagedorn, P. Reims, and O. Kaul, 'Fuel cell system production cost modeling and analysis', *Energy Rep.*, vol. 9, pp. 248–255, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.364.
- [54] D. K. Biswal, D. Bandopadhyaya, and S. K. Dwivedy, 'Preparation and experimental investigation of thermo-electro-mechanical behavior of Ag-IPMC actuator', *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 5, pp. 777–782, May 2012, doi: 10.1007/s12541-012-0102-7.

- [55] A. Kumar *et al.*, 'Polypyrrole and polyaniline-based membranes for fuel cell devices: A review', *Surf. Interfaces*, vol. 29, p. 101738, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.surfin.2022.101738.
- [56] C.-H. Wang *et al.*, 'Low methanol-permeable polyaniline/Nafion composite membrane for direct methanol fuel cells', *J. Power Sources*, vol. 190, no. 2, pp. 279–284, May 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.125.
- [57] F. Barbir, 'Fuel Cell Electrochemistry', in *PEM Fuel Cells*, Elsevier, 2005, pp. 33–72. doi: 10.1016/B978-012078142-3/50004-5.
- [58] H. K. Esfeh and Mohd. K. Abd. Hamid, 'Temperature Effect on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Part II: Parametric Study', *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 2617–2620, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.261.
- [59] Z. Song, Y. Pan, H. Chen, and T. Zhang, 'Effects of temperature on the performance of fuel cell hybrid electric vehicles: A review', *Appl. Energy*, vol. 302, p. 117572, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117572.
- [60] 'Fuel Cell Construction and Performance Characterisation'. [Online]. Available: https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/99-00/bio_fuel_cells/groupproject/library/constructionefficiency/pageframe.htm
- [61] L. El Boujdaini, F. Jurado, A. Mezrhab, M. A. Moussaoui, and D. Vera, 'Cost and size optimization of hybrid solar and hydrogen subsystem using HomerPro software', *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 62, pp. 24018–24036, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.199.
- [62] 'Σχέδιο Καθαρής Ενεργειακής Μετάβασης'. Clean Energy for EU Islands, Oct. 2020. [Online]. Available: https://clean-energy-islands.ec.europa.eu/system/files/2021-11/CETA_Halki_Oct2020.pdf
- [63] 'ASDC | Home'. Accessed: Dec. 24, 2023. [Online]. Available: <https://asdc.larc.nasa.gov/>
- [64] A. A. Kebede *et al.*, 'Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application', *J. Energy Storage*, vol. 40, p. 102748, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102748.
- [65] 'Hydrogen'. Accessed: Dec. 31, 2023. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en