



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ & ΛΕΒΗΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ  
ΜΕ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟ**

**Τζουγανάτος Νικόλαος**

**Επιβλέπων Καθηγητής:  
Εμμ. Κακαράς**

**Αθήνα, Ιούλιος 2010**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**  
**ΜΕ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟ**

**Τζουγανάτος Νικόλαος**

**Επιβλέπων Καθηγητής:**  
**Εμμ. Κακαράς**

**Αθήνα, Ιούλιος 2010**



## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη σύγκριση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υδρογόνου και πετρεσμένου αέρα και κατατέθηκε ως διπλωματική κατά το θερινό εξάμηνο του 2010 στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π..

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Εμμ. Κακαρά, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το θέμα αυτό και παρακολούθησε με ενδιαφέρον την εκπόνηση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στο Δρ. Σωτ. Καρέλλα, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων, ο οποίος ήταν πάντοτε διαθέσιμος να συζητήσει μαζί μου κάθε πρόβλημα που αντιμετώπισα κατά την επεξεργασία του θέματος. Η συμβολή του στην ολοκλήρωση της εργασίας ήταν αποφασιστική και οι συμβουλές και υποδείξεις του πολύτιμες.



## **ΣΥΝΟΨΗ**

Στην πρώτη ενότητα της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τα προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση αυτών, τα οποία σε συνδυασμό με ένα άλλο πλήθος λόγων οδηγούν στην ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση.

Στη δεύτερη ενότητα αναλύεται η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα, ενώ αναφέρονται τα υπάρχοντα συστήματα και τυπικά στοιχεία κόστους επένδυσης και λειτουργίας αυτών.

Στην τρίτη ενότητα περιλαμβάνεται περιγραφή της διαμόρφωσης και των χαρακτηριστικών των υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα και παρατίθενται επιλεγμένα συστήματα αποθήκευσης, τα οποία αποσκοπούν στη βέλτιστη ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο.

Η τέταρτη ενότητα πραγματεύεται την τεχνολογία υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας με αποθήκευση σε μορφή υδρογόνου, παρουσιάζεται το επίπεδο ανάπτυξης των επιμέρους συνιστωσών που τα αποτελούν και τέλος, γίνεται αναφορά των υπάρχοντων πιλοτικών σταθμών.

Στην πέμπτη ενότητα γίνεται προσομοίωση διαφόρων υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα στο υπολογιστικό πρόγραμμα IPSE-pro. Στη συνέχεια, ακολουθεί ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση αυτών με σκοπό την προβολή και αντιπαράθεση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους.

Η έκτη ενότητα εξετάζει την περίπτωση αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υδρογόνου προσομοιώνοντας το σχετικό σύστημα στο υπολογιστικό πρόγραμμα HOMER με χρήση ανεμολογικών στοιχείων και στοιχείων φορτίου για τη νήσο Κάρπαθο. Εν συνεχεία, γίνεται αποτίμηση των αποτελεσμάτων και εκτέλεση του προγράμματος για οικισμό με φορτίο ίσο με το 5% του αντίστοιχου της Καρπάθου.

Στην τελευταία ενότητα αναλύεται δυναμικά το διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση με χρήση των στοιχείων φορτίου του οικισμού της Καρπάθου. Τέλος, ακολουθεί σύγκριση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υδρογόνου με το σύστημα πεπιεσμένου αέρα από ενεργειακής και οικονομικής πλευράς.





## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>13</b>
1.1 Αποθήκευση ενέργειας - Λόγοι και εφαρμογές .....	13
1.2 Διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας .....	14
1.3 Κατηγοριοποίηση αποθηκευτικών διατάξεων .....	16
1.4 Οικονομική βιωσιμότητα αποθήκευσης ενέργειας .....	17
<b>2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE-CAES).....</b>	<b>19</b>
2.1 Εισαγωγή .....	19
2.2 Συνιστώσες.....	20
2.2.1 Αποθηκευτική διάταξη συμπιεσμένου αέρα .....	20
2.2.2 Συμπιεστής .....	21
2.2.3 Στρόβιλος .....	21
2.3 Συστήματα CAES - Αρχές λειτουργίας .....	21
2.3.1 Συστήματα CAES χωρίς αποθήκευση θερμότητας.....	21
2.3.2 Συστήματα CAES με αποθήκευση θερμότητας (αδιαβατική αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES).....	23
2.4 Εφαρμογές-Υπάρχοντες σταθμοί αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα ..	31
2.5 Τυπικά κόστη κατασκευής και λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα .....	34
<b>3. ΥΠΕΡΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE-CAES).....</b>	<b>39</b>
3.1 Εισαγωγή .....	39
3.2 Διαμόρφωση υπέργειων συστημάτων CAES .....	40
3.2.1 Υπέργειο σύστημα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα .....	41
3.2.2 Υπέργειο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα .....	42
3.3 Χαρακτηριστικά των υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης αέρα .....	43
3.4 Εφαρμογές - Υπάρχοντα και ερευνώμενα συστήματα υπέργειων CAES .....	44
<b>4. ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....</b>	<b>51</b>
4.1 Εισαγωγή .....	51
4.2 Γενική περιγραφή του συστήματος - Αρχές λειτουργίας .....	52
4.3 Συνιστώσες.....	53
4.3.1 Μονάδα παραγωγής υδρογόνου (ηλεκτρολυτική διάταξη).....	53

4.3.1.1 Αλκαλικοί ηλεκτρολύτες .....	54
4.3.1.2 PEM ηλεκτρολύτες .....	58
4.3.1.3 Κόστος ηλεκτρολυτικών διατάξεων .....	60
4.3.2 Μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου .....	61
4.3.2.1 Αποθήκευση υδρογόνου υπό μορφή συμπιεσμένου αερίου .....	61
4.3.2.2 Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή .....	62
4.3.2.3 Αποθήκευση υδρογόνου σε στερεή μορφή .....	64
4.3.2.4. Αξιολόγηση κρίσιμων παραμέτρων και επιλογή της κατάλληλης αποθηκευτικής διάταξης για αποθήκευση H <sub>2</sub> σε αποκεντρωμένα συστήματα .....	74
4.3.2.5 Υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου .....	79
4.3.3 Μονάδα χρήσης αποθηκευμένου υδρογόνου .....	82
4.3.3.1 Συστήματα κυψελών καυσίμου .....	82
4.3.3.1.1 Αρχές λειτουργίας και συνιστώσες .....	82
4.3.3.1.2 Θερμοδυναμική ανάλυση κυψέλης καυσίμου .....	85
4.3.3.1.3 Τύποι κυψελών καυσίμου .....	87
4.3.3.2 Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου .....	92
4.3.3.3 Αεριοστρόβιλοι υδρογόνου .....	94
4.3.3.4. Αξιολόγηση κρίσιμων παραμέτρων και επιλογή της κατάλληλης μονάδας χρήσης H <sub>2</sub> σε αποκεντρωμένα συστήματα .....	94
4.4 Εφαρμογές-Υπάρχοντες υβριδικοί σταθμοί αποθήκευσης υδρογόνου .....	96
<b>5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΕΡΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ IPSE-pro .....</b>	<b>105</b>
5.1 Μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση αέρα .....	105
5.2 Διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση αέρα .....	113
5.3 Μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση αέρα .....	122
5.4 Διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση αέρα .....	131
<b>6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΤΗ ΜΟΡΦΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ H<sub>2</sub> ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ HOMER .....</b>	<b>145</b>
6.1 Σταθερές είσοδοι προγράμματος .....	145
6.1.1 Φορτίο .....	145
6.1.2 Ανεμολογικά δεδομένα .....	146
6.2 Μεταβαλλόμενες είσοδοι προγράμματος .....	147
6.2.1 Ανεμογεννήτριες .....	148
6.2.2 Μονάδα ηλεκτρόλυσης .....	149
6.2.3 Μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου .....	150
6.2.4 Κυψέλη καυσίμου .....	150

6.3 Απαιτήσεις συστήματος .....	150
6.4 Εκτέλεση του προγράμματος και αποτελέσματα .....	151
6.5 Προσομοίωση του συστήματος αποθήκευσης για οικισμό της Καρπάθου .....	162
6.5.1 Στοιχεία φορτίου και ανεμολογικά δεδομένα .....	162
6.5.2 Ανεμογεννήτριες .....	163
6.5.3 Μονάδα ηλεκτρόλυσης .....	164
6.5.4 Μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου .....	164
6.5.5 Κυψέλη καυσίμου .....	165
6.5.6 Απαιτήσεις συστήματος .....	165
6.5.7 Εκτέλεση του προγράμματος και αποτελέσματα .....	166
<b>7. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΤΗ ΜΟΡΦΗ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....</b>	<b>177</b>
7.1 Δυναμική ανάλυση συστήματος αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα .....	177
7.1.1 Φορτίο, ανεμολογικά δεδομένα και αιολική παραγωγή .....	177
7.1.2 Συμπιεστές αέρα .....	177
7.1.3 Μονάδα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα .....	178
7.1.4 Στρόβιλοι .....	178
7.1.5 Απαιτήσεις συστήματος .....	179
7.1.6 Αποτελέσματα υπολογισμών .....	179
7.2 Σύγκριση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υδρογόνου και πεπιεσμένου αέρα .....	189
7.2.1 Βαθμός απόδοσης .....	189
7.2.2 Στοιχεία κόστους .....	193
<b>8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>199</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>201</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>205</b>



## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Αποθήκευση ενέργειας - Λόγοι και εφαρμογές**

Οι ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες τα τελευταία χρόνια έχουν σημειώσει αξιοπρόσεκτη ανάπτυξη, αποτελούν κατά κανόνα τεχνολογίες μεταβλητής παραγωγής ενέργειας, των οποίων το προφίλ παραγωγής δεν συμβαδίζει με το προφίλ ζήτησης ενέργειας από το καταναλωτικό κοινό. Κατά συνέπεια, η αύξηση αυτής της αποκεντρωμένης παραγωγής συνεπάγεται μεγαλύτερα προβλήματα σταθερότητας του συστήματος και οδηγεί στην ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση.

Πέραν αυτού του λόγου που ωθεί στην αποθήκευση ενέργειας, παρακάτω αναφέρονται περαιτέρω λόγοι που οδηγούν στην ανάπτυξη των αποθηκευτικών διατάξεων και οφέλη που μπορούν να αποκομιστούν από τη χρήση αυτών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας:

- Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας λόγω έλλειψης ικανότητας παραγωγής των διαθέσιμων μονάδων.
- Αποθήκευση ενέργειας για αποφυγή παραβίασης τεχνικών ελαχίστων θερμικών μονάδων.
- Περιορισμός μεταβλητής ενέργειας από ΑΠΕ με αποθήκευση ενέργειας για χρήση σε επόμενο χρονικό διάστημα οπότε και δεν θα υπάρχει διαθέσιμη παραγωγή. Είναι η συνηθισμένη πρακτική σε μικρά αυτόνομα και απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.
- Για εκμετάλλευση της διαφοράς κόστους παραγωγής από τις συμβατικές μονάδες είτε χωρίς αλλαγή του προγράμματος ένταξης μονάδων (μόνο οικονομική κατανομή), είτε μεταβάλλοντας κάπως το πρόγραμμα ένταξης μονάδων.
- Παροχή στρεφόμενης εφεδρείας (η στρεφόμενη εφεδρεία περιγράφεται ως το περιθώριο μεταξύ της δυνατότητας παραγωγής της κάθε μονάδας παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και της πραγματικής παραγωγής της σε κάθε στιγμή. Διατίθεται υποχρεωτικά από τον κάθε παραγωγό, κατόπιν εντολών του Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς, ώστε να διασφαλίζεται η συνεχής και αδιάλειπτη παροχή στους καταναλωτές σε περίπτωση απώλειας μιας από τις μονάδες που βρίσκονται σε λειτουργία), παροχή ισχύος σε έκτακτη χρονική στιγμή.
- Περιορισμός απωλειών δικτύου λόγω της παροχής ισχύος σε πολύ τοπικό επίπεδο.
- Αποφυγή ή μετάθεση επενδύσεων ενίσχυσης δικτύου, διανομής ειδικά αν υπάρχει συνδυασμός της διάταξης αποθήκευσης με κάποιας μορφής

παραγωγής από ΑΠΕ, αν έχουν επιλεγεί οι κατάλληλες θέσεις για την εγκατάστασή της.

- Διαχείριση ζητημάτων ποιότητας ισχύος λόγω της γρήγορης απόκρισης των μονάδων αυτών.
- Αδιάλειπτη παροχή ισχύος.
- Εκκίνηση μετά από σφάλμα black start (η διαδικασία επαναφοράς ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στη λειτουργία χωρίς στήριξη στις εξωτερικές πηγές ενέργειας).
- Υποστήριξη τάσης και συχνότητας.
- Παραγωγή άλλου αγαθού και αποθήκευσής του (π.χ. θερμότητας) σε ώρες στις οποίες το κόστος είναι χαμηλό για την αποφυγή κατανάλωσης ενέργειας σε ώρες υψηλού φορτίου). [1]

### 1.2 Διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά με τον εξής τρόπο: με δεδομένο ότι δεν μπορεί να αποθηκευθεί στην μορφή την οποία βρίσκεται, πρέπει αρχικά να μετασχηματιστεί σε μια άλλη μορφή ενέργειας η οποία θα είναι πιο εύκολο να αποθηκευθεί και στη συνέχεια όταν απαιτείται η απόδοση της αποθηκευμένης ενέργειας, να μετασχηματιστεί και πάλι σε ηλεκτρική ενέργεια με τις αντίστοιχες απώλειες μετατροπής.

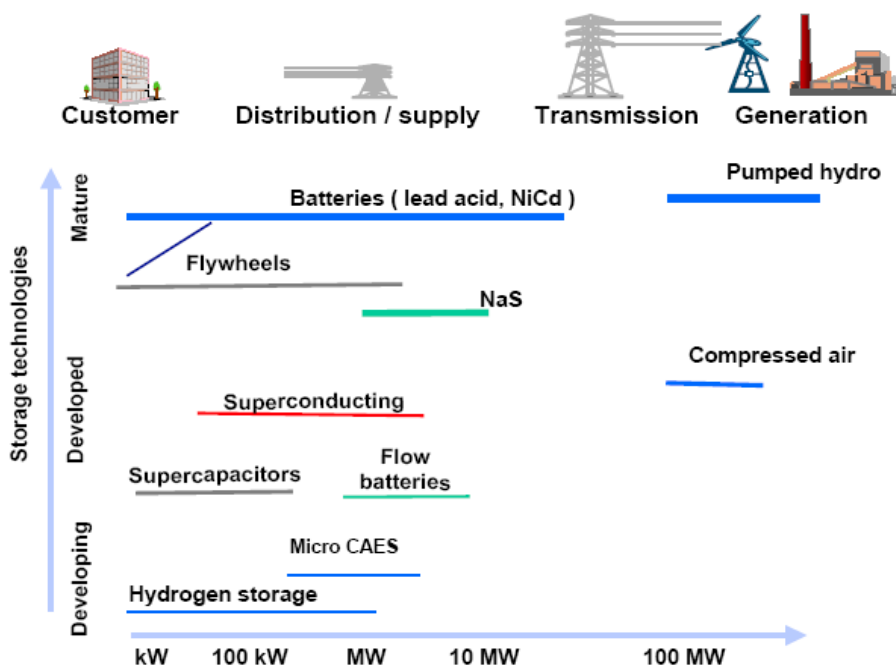
Διακρίνονται διάφορες τεχνολογίες για την αποθήκευση ενέργειας, οι οποίες στηρίζουν τη λειτουργία τους στον μετασχηματισμό της ηλεκτρικής ενέργειας σε σχεδόν όλες τις μορφές ενέργειας: μηχανική, χημική, θερμική και μαγνητική ή δυναμική ενέργεια. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι οι τεχνολογίες αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) σε τεχνολογίες άμεσης αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (μετατροπή σε χημική, μαγνητική ή δυναμική ενέργεια) και β) σε τεχνολογίες έμμεσης αποθήκευσης (η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε κάποιο άλλο αγαθό το οποίο να είναι ευκολότερο και αποδοτικότερο να αποθηκευτεί σε σύγκριση με τις τεχνολογίες άμεσης αποθήκευσης). Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν: 1) την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου με σκοπό την αξιοποίησή του σε κυψέλες καυσίμου είτε για παραγωγή ενέργειας ή στις μεταφορές, 2) την αποθήκευση θερμικής ενέργειας (θέρμανση/ψύξη χώρων ή νερού), 3) αποθήκευση νερού προερχόμενου από άντληση ή αφαλάτωση, 4) χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για συμπίεση αερίων.

Στην περίπτωση της έμμεσης αποθήκευσης είναι δυνατό να μεταβληθεί η καμπύλη ζήτησης του συστήματος αν αφαιρεθεί η αρχική πρόβλεψη κατανάλωσης ηλεκτρισμού για τα αγαθά αυτά από την αρχική πρόβλεψη του

συνολικού φορτίου του συστήματος και στη συνέχεια μία νέα πρόβλεψη της ηλεκτρικής ζήτησης για το συγκεκριμένο αγαθό σύμφωνα με τις αποφάσεις που λαμβάνονται για την αποθήκευσή του προστεθεί στη συνολική ζήτηση του συστήματος. Επομένως, ο στόχος της αποθήκευσης του αγαθού με τη βοήθεια ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μετατόπιση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή του αγαθού αυτού προκειμένου να επιτυγχάνεται τουλάχιστον ένας από τους παρακάτω στόχους:

- α) Βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής,
- β) Περιορισμός της τυχόν μεταβαλλόμενης ενέργεια από ΑΠΕ
- γ) Μείωση απαιτήσεων σε στρεφόμενη εφεδρεία
- δ) Περιορισμός της αιχμής του δικτύου διανομής ή του υπό εξέταση συστήματος. [1]

Η διάταξη αποθήκευσης που θα επιλεγεί σε κάθε εφαρμογή, ώστε να ικανοποιούνται τα εκάστοτε τεχνικά και οικονομικά κριτήρια -τα οποία ποικίλλουν αρκετά συναρτήσει των εφαρμογών και των αναγκών- θα είναι κάθε φορά διαφορετικού τύπου. Οι τεχνολογίες είναι πολλές, αλλά μια συγκριτική μελέτη καθίσταται δύσκολη από το γεγονός ότι, μεταξύ άλλων, καθεμία από αυτές βρίσκεται σε διαφορετικό στάδιο μελέτης και ανάπτυξης. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα όπου απεικονίζονται οι διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης με τα χαρακτηριστικά μεγέθη, τις εφαρμογές και το επίπεδο ανάπτυξης της καθεμίας.



Σχ.1.1. Μέγεθος, εφαρμογές και επίπεδο ανάπτυξης των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης. [1]

### 1.3 Κατηγοριοποίηση αποθηκευτικών διατάξεων

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν να διαιρεθούν σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τις εφαρμογές τους:

- Εφαρμογές χαμηλής ισχύος σε απομονωμένες περιοχές
- Εφαρμογές μέσης ισχύος σε απομονωμένες περιοχές (αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα, τροφοδοσία πόλης)
- Μείωση της συμφόρησης δικτύων
- Παροχή υπηρεσιών ποιότητας ισχύος

Οι πρώτες δύο κατηγορίες προορίζονται για μικρής κλίμακας συστήματα όπου η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως κινητική ενέργεια (σφόνδυλος), χημική ενέργεια, συμπιεσμένος αέρας ή υδρογόνο (κυψέλες καυσίμου).

Οι επόμενες δύο κατηγορίες αφορούν σε μεγάλης κλίμακας συστήματα όπου η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως βαρυτική ενέργεια (υδραυλικά συστήματα), θερμική (αισθητή ή λανθάνουσα), χημική (συσσωρευτές, μπαταρίες ροής) ή υπό τη μορφή συμπιεσμένου αέρα. [2]

Επιπλέον, με κριτήριο το χρονικό ορίζοντα χρήσης μίας αποθηκευτικής διάταξης, αυτές κατηγοριοποιούνται ως εξής:

✓ διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης: Πρόκειται για τις διατάξεις αποθήκευσης που μπορούν να προσφέρουν ή να απορροφήσουν ενέργεια για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά). Τυπικές εφαρμογές αυτού του είδους είναι η αδιάλειπτη παροχή ισχύος και η διασφάλιση της ευστάθειας λειτουργίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

✓ διατάξεις μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης: Αφορά διατάξεις που χρησιμοποιούνται για χρονικούς ορίζοντες από μερικά λεπτά ως μερικές ώρες. Τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η διαχείριση ΑΠΕ, η ενίσχυση της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας και η διαχείριση παρεχόμενης ισχύος στους καταναλωτές.

✓ διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης: Αφορά διατάξεις αποθήκευσης για χρονικά διαστήματα από αρκετές ώρες μέχρι εβδομάδες και μήνες. Κυρίως χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ζήτησης μεταξύ ωρών αιχμής και μη αιχμής ή την ικανοποίηση ζήτησης αιχμής έχοντας αποθηκεύσει ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.



#### 1.4 Οικονομική βιωσιμότητα αποθήκευσης ενέργειας

Η αναγκαία συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται, ούτως ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμη η αποθήκευση ενέργειας για κάποιες από τις προαναφερθείσες εφαρμογές, αγνοώντας το κόστος εγκατάστασης της αποθηκευτικής διάταξης, είναι η ακόλουθη:

$$\xi > \frac{Cost\_low}{Cost\_high}$$

όπου  $\xi$  ο βαθμός απόδοσης της κυκλικής διαδικασίας μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλη μορφή ενέργειας και της επαναφοράς της σε ηλεκτρική,  $Cost\_low$  το κόστος για την αποθήκευση ενέργειας και  $Cost\_high$  το όφελος από την χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας.

Για να είναι πλήρως οικονομικά βιώσιμη η εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας θα πρέπει η ωφέλεια από την αποθήκευση της ενέργειας να είναι τέτοια, ώστε να αποπληρώνεται σε λογικό χρονικό διάστημα η επένδυση για την προμήθεια και συντήρηση της αποθηκευτικής διάταξης. [1]



## **2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE-CAES)**

### **2.1 Εισαγωγή**

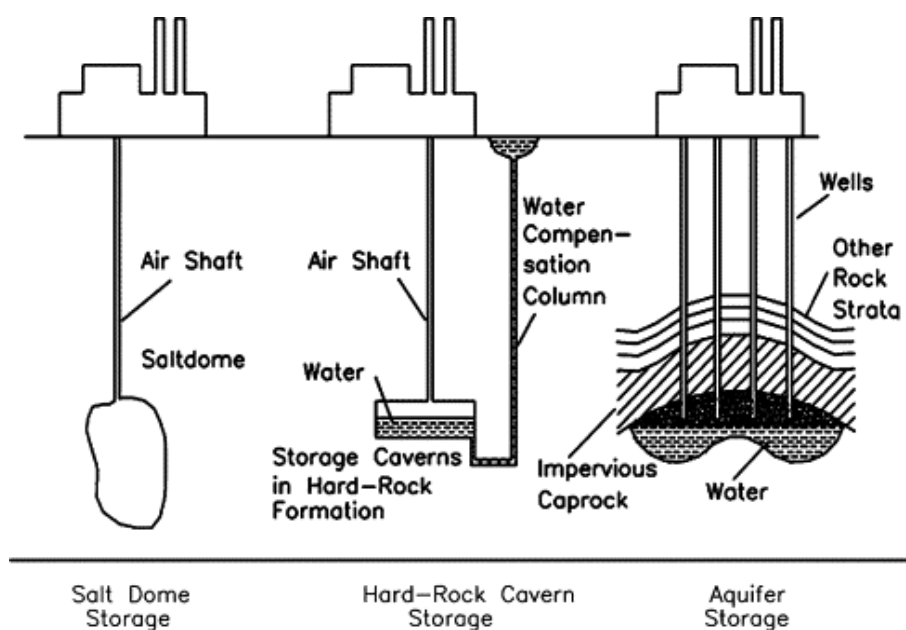
Μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στον τομέα της ενεργειακής αποθήκευσης αποτελούν τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, διότι συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα γνωστών τεχνολογιών (ηλεκτρικές μηχανές, συμπιεστές, στρόβιλοι) και χώρους αποθήκευσης μεγάλου όγκου. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία αποθήκευσης παρουσιάζουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των σταθμών παραγωγής φορτίου αιχμής με τη χρήση αεριοστροβίλου, με τους οποίους παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές παρόμοιο τρόπο λειτουργίας. Ωστόσο, η ειδοποιός διαφορά μεταξύ του τρόπου λειτουργίας των παραπάνω εντοπίζεται στο εξής σημείο: στην περίπτωση του αεριοστροβίλου, τα 2/3 του παραγόμενου από την εγκατάσταση ποσού ενέργειας δεσμεύεται για την λειτουργία του συμπιεστή και μόνο το υπόλοιπο 1/3 διατίθεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντιθέτως, στους αντίστοιχους σταθμούς αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, το μίγμα συμπιεσμένου αέρα-καυσίμου εισάγεται κατευθείαν στο θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα την εκμετάλλευση του συνολικού ποσού ενέργειας. [4] Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα σύγκρισης των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας για ποσό ενέργειας άνω των 100MWh, το σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα υπερτερεί των υπολοίπων παρουσιάζοντας ταυτόχρονα και χαμηλό κόστος επένδυσης [5]:

<b>Τεχνολογία αποθήκευσης</b>	<b>€/kW</b>	<b>ct/kWh</b>	<b>Βαθμός απόδοσης</b>	<b>Χρόνος απόκρισης</b>
Αντλιοταμείωση	550-1400	10-12	0,70-0,85	Min.
CAES (AA-CAES)	480-800	8-10	0,40-0,54 (0,7)	Min.
H <sub>2</sub> -GT (δεξαμενή αποθήκευσης)	800-1200	45	0,25-0,40	Min.
H <sub>2</sub> -καύσιμο (δεξαμενή αποθήκευσης)	900-2500	60	0,30-0,50	Sec.

## 2.2 Συνιστώσες

### 2.2.1 Αποθηκευτική διάταξη συμπιεσμένου αέρα

Πυρήνα ενός σταθμού με σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES) αποτελεί μία μεγάλη υπόγεια αποθηκευτική διάταξη συμπιεσμένου αέρα, η οποία τροφοδοτείται μέσω συμπιεστών αέρος κατά τις ώρες που παρουσιάζεται χαμηλό φορτίο και παρουσιάζεται περίσσεια παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ και εκφορτίζεται κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης, κατά τις οποίες η απευθείας παραγωγή από τις ΑΠΕ δεν επαρκεί. Πέρα του υδροφόρου ορίζοντα και των πορωδών σχηματισμών πετρωμάτων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση του αέρα, υπόγειοι ταμειυτήρες φυσικού αερίου και κοιλότητες που προκύπτουν από τη διάλυση άλατος του αλατούχου υδροφόρου ορίζοντα σε νερό αποτελούν τις καλύτερες επιλογές για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα. Η καταλληλότητα των παραπάνω υπόγειων χώρων αποθήκευσης αποδίδεται στην παρουσία γεωστατικής πίεσης, η οποία διευκολύνει τη συγκράτηση της αέριας μάζας. Επιπλέον, όπως αναφέρεται και στην αναφορά [2], ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχει δείξει ότι ο αέρας θα μπορούσε να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί υπόγεια, σε σωληνώσεις υψηλής πίεσης (20-100 bar). Ο απαιτούμενος όγκος των συγκεκριμένων δεξαμενών αποθήκευσης κυμαίνεται



Σχήμα 2.1. Διάφοροι τύποι δεξαμενών αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. [2]

συνήθως μεταξύ 300.000 και 600.000m<sup>3</sup> και η αποθήκευση του αέρα γίνεται σε πίεση μεταξύ 40-70bar κατά κανόνα.

### 2.2.2 Συμπιεστής

Για τη συμπίεση του αέρα προς περαιτέρω αποθήκευσή του στις προαναφερθείσες υπόγειες δεξαμενές χρησιμοποιούνται συνήθως αξονικοί συμπιεστές με δυνατότητα συμπίεσης της τάξεως των 20 bar και παροχή 1,4 Mm<sup>3</sup>/h ή ακτινικοί συμπιεστές παροχής 100.000 m<sup>3</sup>/h και δυνατότητα συμπίεσης στα 1.000bar. Στο σημερινό επίπεδο εξέλιξης της τεχνολογίας του συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, η φάση της συμπίεσης εκτελείται από δύο συμπιεστές (χαμηλής και υψηλής πίεσης) με ενδιάμεση ψύξη σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ των 40-200°C.

### 2.2.3 Στρόβιλος

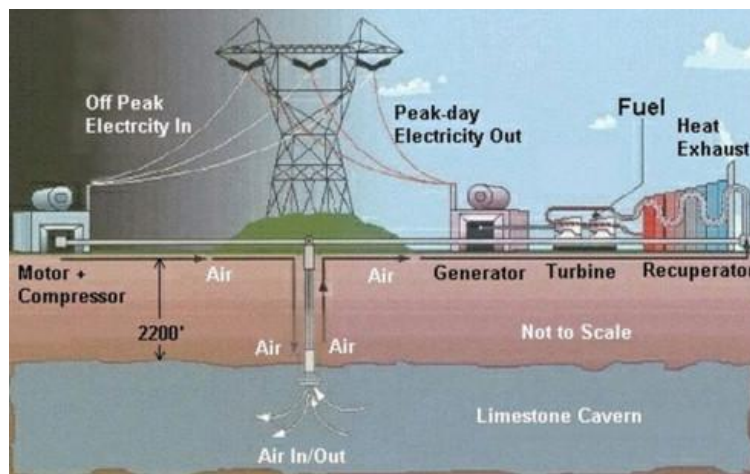
Όσον αφορά στην εκτόνωση του συμπιεσμένου αέρα, χρησιμοποιούνται στρόβιλοι αέρα με λόγο πίεσης έως και 22 και θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου σε αυτόν μέχρι 1230°C. Σε ατμοπαραγωγικές μονάδες με υπερκρίσιμο κύκλο λειτουργίας χρησιμοποιούνται ατμοστρόβιλοι με πίεση τροφοδοσίας και θερμοκρασία εισόδου 300bar και 600°C αντίστοιχα. Στα σύγχρονα συστήματα εφαρμόζεται ανακόμιση θερμότητας με σκοπό τη θέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν αυτός οδηγηθεί στο θάλαμο καύσης και στο στάδιο της αποτόνωσης, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κατά 10%. Μειονέκτημα, ωστόσο, αποτελεί το μεγάλο μέγεθος του ανακομιστή θερμότητας το οποίο συνεπάγεται και μεγάλο κόστος αυτού. Από τη διεξαγωγή συγκριτικών μελετών, που παρουσιάζονται στην αναφορά [5], προέκυψε ότι την καλύτερη επιλογή για το τμήμα της αποτόνωσης αποτελεί η χρήση στροβίλου που θα απαρτίζεται από δύο μέρη: α) τμήμα ενός κοινού στροβίλου αέρα και β) έναν ατμοστρόβιλο, που θα λειτουργεί ως στρόβιλος υψηλής πίεσης.

## 2.3 Συστήματα CAES - Αρχές λειτουργίας

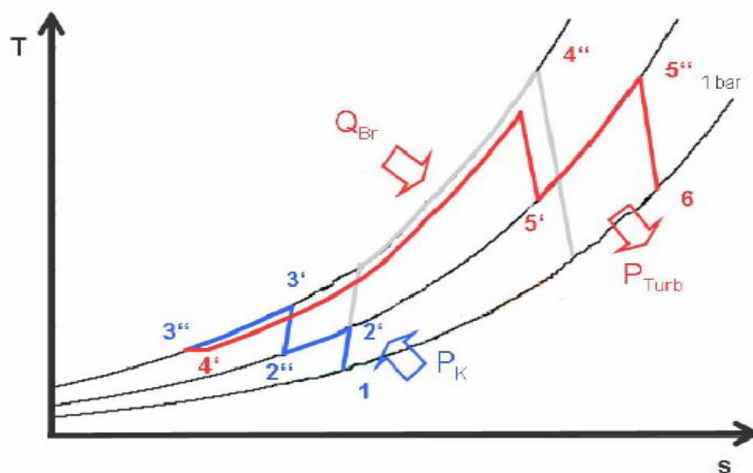
### 2.3.1 Συστήματα CAES χωρίς αποθήκευση θερμότητας

Οι μέχρι σήμερα κατασκευασμένοι σταθμοί με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση συστήματος συμπιεσμένου αέρα χρησιμοποιούν στο σύνολό τους συστήματα χωρίς αποθήκευση θερμότητας. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν κατά τον ακόλουθο τρόπο: Σε διαστήματα χαμηλής ζήτησης, λαμβάνεται η περίσσεια της ενέργειας από τον κινητήρα του συστήματος με σκοπό τη λειτουργία των συμπιεστών. Ακολουθεί συμπίεση του αέρα με ενδιάμεση ψύξη και στη συνέχεια ο αέρας υψηλής πίεσης, αφού ψυχθεί, οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης. Σε διαστήματα υψηλής ζήτησης, ο συμπιεσμένος αέρας (υψηλή πίεση, χαμηλή θερμοκρασία) οδηγείται προς το θάλαμο καύσης, όπου γίνεται προσθήκη καυσίμου με σκοπό τη θέρμανση του

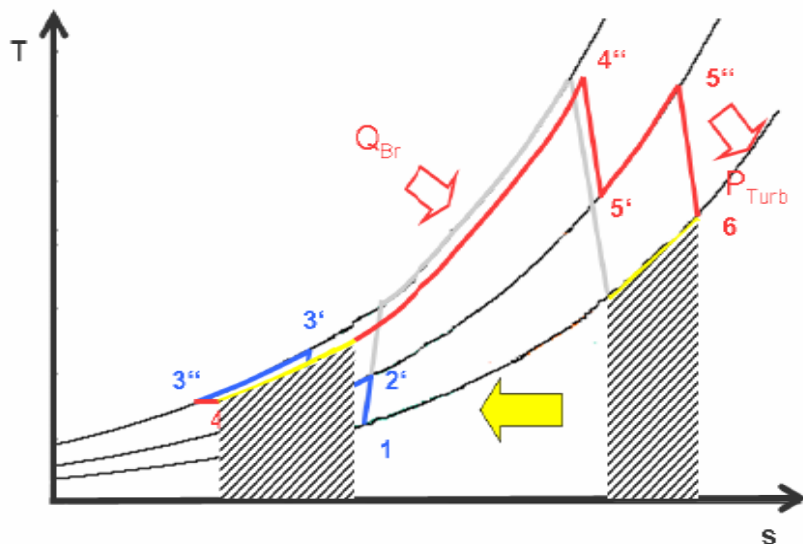
αέρα, τα καυσαέρια εκτονώνονται στους στροβίλους με αναθέρμανση και γίνεται η παραγωγή του επιθυμητού ποσού ενέργειας. Στα σύγχρονα συστήματα εφαρμόζεται ανακόμιση καυσαερίων με σκοπό τη θέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν αυτός οδηγηθεί στο θάλαμο καύσης, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κατά 10%. Συγκεκριμένα, οι συνήθεις βαθμοί απόδοσης του απλού συστήματος αποθήκευσης κυμαίνονται περί το 40%, ενώ με χρήση ανάκτηση θερμότητας επιτυγχάνονται βαθμοί απόδοσης της τάξεως του 50%. Παρακάτω ακολουθεί ένα σχήμα που περιγράφει τη λειτουργία της παραπάνω εγκατάστασης και το αντίστοιχο διάγραμμα T-s [5]:



Σχήμα 2.2. Λειτουργία εγκατάστασης αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με ανάκτηση θερμότητας [2]



Σχήμα 2.3. Διάγραμμα T-s της εγκατάστασης συμπιεσμένου αέρα χωρίς ανάκτηση θερμότητας [5]



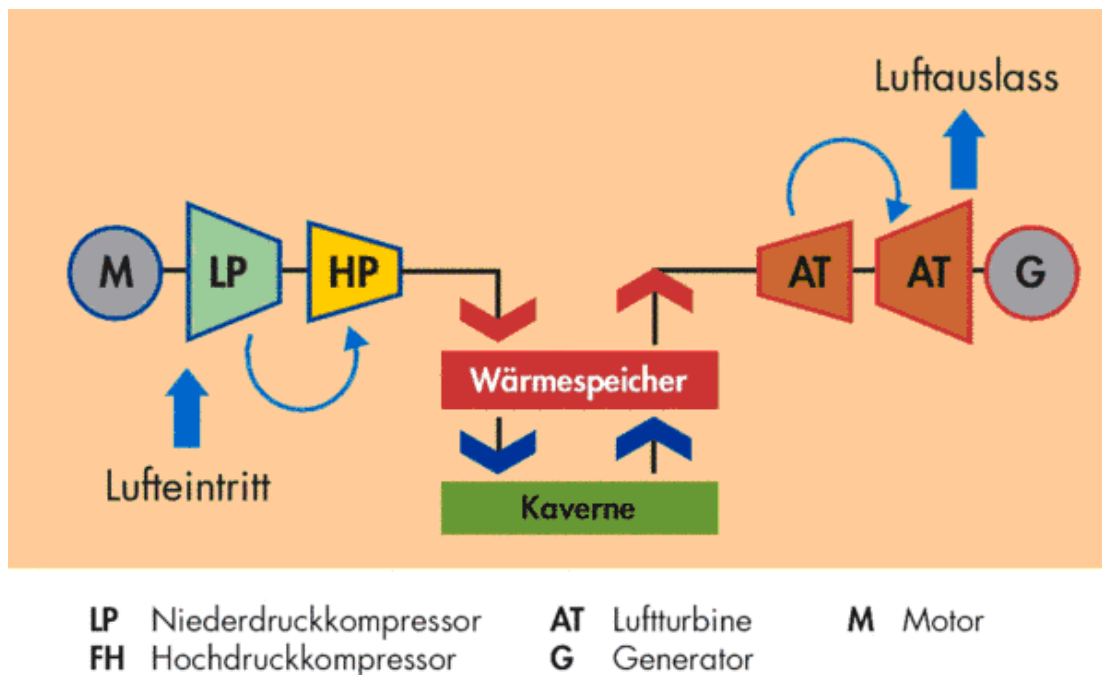
Σχήμα 2.4. Διάγραμμα T-s της εγκατάστασης συμπιεσμένου αέρα με ανάκτηση θερμότητας [5]

### 2.3.2 Συστήματα CAES με αποθήκευση θερμότητας (αδιαβατική αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES))

Σε ερευνητικό στάδιο υπό τη στήριξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης βρίσκεται το σύστημα της αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES), το οποίο δεν περιορίζεται μόνο στην αποθήκευση αέρα, αλλά αποθηκεύει σε ξεχωριστή δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας τη θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη συμπίεση. Η ιδέα για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου συστήματος δεν είναι σημερινή, αλλά ανάγεται στις αρχές της δεκαετίας του 1980, ιδέα η οποία ωστόσο δεν προχώρησε λόγω των τεχνολογικών εμποδίων που κατέστησαν αδύνατη την εφαρμογή της. Ωστόσο, η αυξανόμενη παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ και πολύ περισσότερο η αύξηση της τιμής των καυσίμων σε συνδυασμό με την ανάγκη για περιορισμό των εκπομπών αναζωπύρωσαν το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη της αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.

Στο συγκεκριμένο σύστημα αποθήκευσης, ο αέρας συμπιέζεται χωρίς ενδιάμεση ψύξη και πριν αποθηκευθεί, αποδίδει τη θερμότητά του στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας. Κατά την εκφόρτιση του συστήματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το αποθηκευμένο αυτό ποσό θερμότητας αποδίδεται στον συμπιεσμένο αέρα πριν αυτός οδηγηθεί στους στροβίλους για αποτόνωση με αποτέλεσμα τη θέρμανσή του στην απαιτούμενη θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα έναντι του απλού συστήματος αποθήκευσης ότι δεν απαιτείται η καύση συμπληρωματικού καυσίμου πριν

την αποτόνωση. Πρόκειται, λοιπόν, για μία καθαρά αποθηκευτική μέθοδο με μηδενικές εκπομπές. Επιπλέον, αυτό το σύστημα δεν απαιτεί ενδιάμεση ψύξη μεταξύ των συμπιέσεων του αέρα και έτσι επιτυγχάνονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες εξόδου από το συμπιεστή (θερμοκρασίες που φτάνουν τους 620°C). Συνήθης θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο είναι οι 600°C και η τεχνολογία αυτή αναμένεται να επιτύχει συνολικούς βαθμούς απόδοσης μέχρι και 70%. [4], [5], [6]



Σχήμα 2.5. Απεικόνιση του συστήματος AA-CAES [4].

Μία άλλη εφαρμογή του συστήματος AA-CAES, που εξετάζεται, είναι η διβάθμια διάταξη. Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης διάταξης είναι η ακόλουθη: Μετά τη συμπίεση του αέρα στο συμπιεστή χαμηλής πίεσης, ο αέρας αποδίδει τη θερμότητά του σε μία πρώτη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (χαμηλής πίεσης). Στη συνέχεια, ο αέρας οδηγείται στον συμπιεστή υψηλής πίεσης και αφού φτάσει στην τελική πίεση, αποδίδει το ποσό θερμότητας που απέκτησε κατά τη συμπίεση σε μία δεύτερη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας και καταλήγει στη δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Κατά τα διαστήματα αιχμής, δηλαδή όταν απαιτείται παραγωγή ενέργειας με χρήση του συμπιεσμένου αέρα, του αποδίδεται η θερμότητα της δεύτερης δεξαμενής προτού αποτονωθεί στον στρόβιλο υψηλής πίεσης και πριν αυτός εισαχθεί στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης, αναθερμαίνεται με χρήση της αποθηκευμένης στην πρώτη δεξαμενή θερμότητας.



Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση του διβάθμιου συστήματος αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα είναι: α) το γεγονός ότι επιτυγχάνονται υψηλότερες πιέσεις σε χαμηλότερη θερμοκρασία, β) η υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης που εμφανίζει σε σχέση με το μονοβάθμιο σύστημα AA-CAES. Ωστόσο, το συγκεκριμένο σύστημα απαιτεί τη χρήση και δεύτερης δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας και χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα (στρόβιλος και οδήγηση της ροής μέσω σωληνώσεων). [7]

Σημαντική παράμετρο στη μελέτη των συστημάτων αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, που σήμερα βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο, αποτελεί το γεγονός ότι όλες οι συνιστώσες ενός τέτοιου συστήματος πρέπει να σχεδιασθούν από την αρχή. Αναλυτικότερα, τα βασικότερα στοιχεία που πρέπει να αναπτυχθούν προκειμένου να εφαρμοσθεί η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι τα εξής:

- Δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας: αποτελεί τη βασικότερη συνιστώσα του συστήματος αδιαβατικής αποθήκευσης και η ισχύς της διαδραματίζει αποφασιστικό ρόλο στη διαμόρφωση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Απαιτείται η κατασκευή δεξαμενών με χωρητικότητα  $120\text{-}1.800\text{MWh}_{\text{th}}$ , οι οποίες θα χαρακτηρίζονται επιπλέον από υψηλό ρυθμό απόδοσης της αποθηκευμένης θερμότητας και όσο το δυνατόν πιο σταθερή θερμοκρασία εξόδου από τη δεξαμενή, ούτως ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη χρόνου αποφόρτισης 4-12 ωρών. Παράλληλα, πρέπει να επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση των θερμοκρασιακών απωλειών τόσο κατά το στάδιο της φόρτισης όσο και της αποφόρτισης.

Όσον αφορά στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αποθήκευσης, εξετάζονται όλες οι τεχνικές που επιτρέπουν μετάδοση θερμότητας με μικρές απώλειες εξέργειας. Γενικά, οι δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας μπορούν να αποθηκεύσουν τη θερμότητα στις εξής μορφές: α) αισθητή θερμότητα (μεταβολή θερμοκρασίας του μέσου αποθήκευσης), β) λανθάνουσα (σταθερή θερμοκρασία και αλλαγή φάσης του μέσου αποθήκευσης (PCM)) και γ) υπό θερμοχημική μορφή (ως ενέργεια σύνδεσης για τη διάσπαση μορίων στα άτομα που το αποτελούν). Ωστόσο, στο σύστημα αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα αποκλείεται κάθε άλλη μορφή αποθήκευσης πέραν της πρώτης καθότι οι θερμοκρασίες στο ψυχρό και στο θερμό άκρο της δεξαμενής αποθήκευσης είναι καθορισμένες. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή την αποθήκευση στις άλλες δύο μορφές μόνο υπό προϋποθέσεις λόγω του γεγονότος ότι η θερμοκρασία του αποθηκευτικού μέσου διατηρείται σταθερή. Τέλος, εξετάζεται και η κατασκευή υβριδικών δεξαμενών με συνδυασμένη

χρήση αισθητών μέσων αποθήκευσης και υλικών αλλαγής φάσης με σκοπό την επίτευξη υψηλότερου βαθμού απόδοσης.

Αναφορικά με τη μέθοδο κατασκευής της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας, εξετάζονται οι παρακάτω επιλογές:

α) Κατασκευή δεξαμενών άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς: σε τέτοιου είδους δεξαμενές ο συμπιεσμένος αέρας έρχεται σε άμεση επαφή με το μέσο μεταφοράς. Με τη μέθοδο αυτή εξασφαλίζεται μία μεγάλη και φθηνή επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας με αποτέλεσμα ελάχιστες απώλειες, ωστόσο μειονεκτεί στο γεγονός ότι απαιτείται η κατασκευή μίας ανθεκτικής στην πίεση και συνεπώς μεγαλύτερου κόστους δεξαμενής. Οι δεξαμενές αυτές είναι απλές στην κατασκευή και έχουν δοκιμασθεί με επιτυχία σε κάποιες βιομηχανικές εφαρμογές.

Όσον αφορά στο μέσο μεταφοράς, στις θερμοφυσικές συνθήκες που μας ενδιαφέρουν παρουσιάζεται πλήθος επιλογών με συνήθη τα κεραμικά υλικά, τα φυσικά πετρώματα, σκυρόδεμα ή χυτοσίδηρο. Τα συγκεκριμένα μέσα καλύπτουν μία ευρεία περιοχή ως προς τις θερμοφυσικές ιδιότητες και το κόστος και επιτρέπουν την κατασκευή δεξαμενών με χαμηλό κόστος μέσου μεταφοράς.

β) Κατασκευή δεξαμενών έμμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς: σε αυτήν την περίπτωση η μετάδοση της θερμότητας από (φόρτιση) και προς (αποφόρτιση) το ρεύμα του συμπιεσμένου αέρα επιτυγχάνεται με τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας. Στη μέθοδο αυτή απουσιάζουν τα μειονεκτήματα της πρώτης, ωστόσο υστερεί συγκριτικά με την παραπάνω στο γεγονός ότι χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη αποδοτικότητα μετάδοσης θερμότητας (απώλειες θερμοκρασίας και πίεσης) και από το υψηλό κόστος του εναλλάκτη. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι επίσης δοκιμασμένη σε κάποιες βιομηχανικές εφαρμογές, όπου χρησιμοποιούνται για προθέρμανση σε μονάδες ατμοπαραγωγών ή σε ηλιακά θερμικά συστήματα.

Όσον αφορά στο χρησιμοποιούμενο μέσο μεταφοράς, δεν υπάρχει κάποιο εμπορικά διαθέσιμο ρευστό, το οποίο να καλύπτει τη θερμοκρασιακή περιοχή μεταξύ 50-620°C στο σύνολό της. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η χρήση δύο μέσων, η οποία ωστόσο οδηγεί σε επιπρόσθετη αύξηση του κόστους της κατασκευής. Συνήθως χρησιμοποιούνται λάδι και ρευστά άλατα με το καθένα να καλύπτει διαφορετικά τμήματα της παραπάνω περιοχής θερμοκρασιών. Τέλος, η εγκατάσταση μπορεί να αποτελείται είτε από μία δεξαμενή αποθήκευσης (θερμοκλίνη) με το ρευστό να παρουσιάζει θερμοκρασιακές διαφορές είτε από σύστημα δύο δεξαμενών με μεταβαλλόμενη στάθμη του ρευστού. [8], [9]

- Συμπιεστής: Τα συστήματα αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα AA-CAES απαιτούν την εκ νέου κατασκευή συμπιεστή. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός του συμπιεστή πρέπει να γίνει έτσι, ώστε να προσεγγίζει την αδιαβατική συμπίεση και όχι την ισόθερμη όπως στην περίπτωση των συστημάτων χωρίς αποθήκευση θερμότητας. Στα απλά συστήματα CAES, όπως και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται τέτοιου είδους συμπιεστές, διότι με την προσέγγιση της ισόθερμης συμπίεσης επιτυγχάνεται μείωση της απαιτούμενης από το συμπιεστή ισχύος, απαιτείται μικρότερος αριθμός βαθμίδων για τη συμπίεση και αποφεύγεται κάθε πρόβλημα στη σχεδίαση και λειτουργία της μηχανής που έχει ως αίτιο την ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας.

Ωστόσο, στα συστήματα AA-CAES τίθεται ως απαίτηση η επίτευξη για υψηλές θερμοκρασίες εξόδου από το συμπιεστή, θέμα το οποίο δεν είχε τεθεί μέχρι στιγμής για τους συμβατικούς συμπιεστές. Συγκεκριμένα, οι συμπιεστές τέτοιων συστημάτων απαιτείται να συμπιέζουν τον αέρα σε πιέσεις της τάξεως των 100bar ή 160bar και θερμοκρασίες έως και 620°C ή 450°C για μονοβάθμια ή διβάθμια διάταξη αντίστοιχα.

Οι συμβατικοί συμπιεστές έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν τις απαιτήσεις πίεσης και ισχύος, ωστόσο δεν υπάρχουν συμπιεστές που μπορούν να συνδυάσουν τις παραπάνω τιμές με τις επιθυμητές τιμές της θερμοκρασίας στην έξοδο του συμπιεστή. Από την άλλη πλευρά, υφίστανται συμπιεστές που μπορούν να συμπιέσουν τον αέρα στην επιθυμητή θερμοκρασία, οι οποίοι όμως δεν έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν συμπίεση σε τόσο υψηλές πιέσεις ή να διακινήσουν την απαιτούμενη ποσότητα εργαζόμενου μέσου.

Συμπερασματικά, η απαίτηση για υψηλές τιμές πίεσης και θερμοκρασίας στις τελευταίες βαθμίδες της μηχανής σε συνδυασμό με την ανάγκη για επίτευξη υψηλού ισεντροπικού βαθμού απόδοσης και μικρού χρόνου εκκίνησης ωθούν στην ανάπτυξη νέων συμπιεστών υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Οι παραπάνω απαιτήσεις ωθούν στη χρησιμοποίηση των συμβατικών ακτινικών συμπιεστών ως βάση για το σχεδιασμό των νέων συμπιεστών. Ωστόσο, η ικανοποίηση όλων των επιμέρους απαιτήσεων καθιστά πολύ απαιτητικό και δύσκολο το σχεδιασμό της μηχανής, καθότι η ικανοποίηση ενός χαρακτηριστικού έρχεται εν μέρει σε σύγκρουση με τα υπόλοιπα. Έτσι, οι παρούσες μελέτες τείνουν προς την κατεύθυνση της δημιουργίας ενός συμπιεστή με πολλαπλά κελύφη (πιθανότατα τρία) που θα απαρτίζεται από τα εξής μέρη: α) το τμήμα χαμηλής πίεσης θα αποτελείται από ένα αξονικό συμπιεστή σε περίπτωση διακίνησης μεγάλων παροχών αέρα ή ακτινικό συμπιεστή απλής ατράκτου για διακίνηση χαμηλών τιμών παροχών (τμήμα χαμηλής πίεσης), β) ακτινικό συμπιεστή απλής ατράκτου (τμήματα μέσης και υψηλής πίεσης). [8], [9]



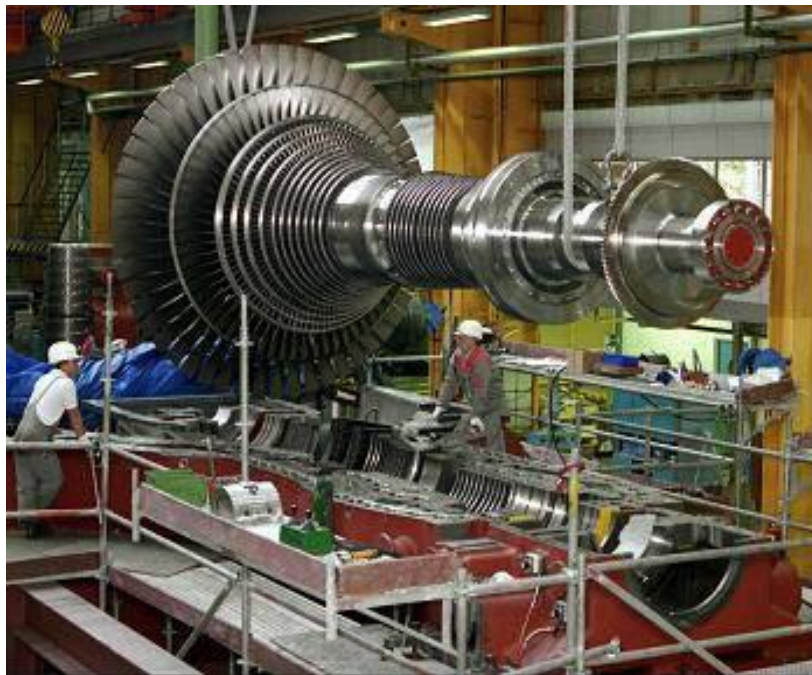
Σχήμα 2.6. Αξονικός συμπιεστής τμήματος χαμηλής πίεσης (αριστερά) και ακτινικός συμπιεστής τμημάτων μέσης και υψηλής πίεσης (δεξιά) [8]

- **Στρόβιλος:** Τέλος, απαιτείται η εκ νέου κατασκευή του στροβίλου της εγκατάστασης. Σκοπό της ανάπτυξης του στροβίλου για το σύστημα AA-CAES αποτελεί η επίτευξη υψηλών τιμών θερμοκρασίας εισόδου, παροχής και βαθμού απόδοσης.

Σύμφωνα με τις παρούσες μελέτες, το εύρος μεταβολής του φορτίου και κατά συνέπεια της παροχής μάζας και όγκου εισόδου στον στρόβιλο κυμαίνεται μεταξύ 40% και 100%. Επιπλέον μεταβολές στην παροχή όγκου προέρχονται και από το γεγονός ότι η δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα παρουσιάζει μεταβλητή πίεση σε συνάρτηση με το χρόνο, μεταβολές οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από το μέγεθος και το ποσοστό φόρτισης της δεξαμενής. Συγκεκριμένα, η παραπάνω μεταβολή της πίεσης ανάλογα με τους παράγοντες που την επηρεάζουν μπορεί μέχρι και να τριπλασιάσει ή να υποτριπλασιάσει την παροχή στον στρόβιλο. Συνεπώς, για την επίτευξη μεγάλων τιμών του βαθμού απόδοσης απαιτείται κατάλληλη ρύθμιση του όγκου εισόδου στην μηχανή. Ωστόσο, οι συμβατικές τεχνολογίες ρύθμισης με χρήση στραγγαλιστικών βαλβίδων και ρυθμιστικών βαθμίδων αποκλείονται καθότι η χρήση τους συνεπάγεται την ανάπτυξη σημαντικών απωλειών. Για αυτό το λόγο στο πλαίσιο της έρευνας του συστήματος AA-CAES σχεδιάζεται μία προσαρμοσμένη βαθμίδα εισόδου, η οποία με βάση κάποια ειδικά σχεδιασμένα πτερύγια επιτρέπει τη διαχείριση των μεταβολών πίεσης και παροχής όγκου με ταυτόχρονη επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης. Επιπρόσθετα, λόγω του γεγονότος ότι το σύστημα αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα απαιτεί την παραγωγή ενέργειας σε ελάχιστο χρονικό διάστημα (χρόνος απόκρισης της τάξεως κάποιων λεπτών), απαιτείται ο στρόβιλος να παρουσιάζει ιδιαίτερο μικρό χρόνο εκκίνησης. Συγκεκριμένα, ο στρόβιλος θα πρέπει να φτάνει στο πλήρες φορτίο σε διάστημα μερικών

λεπτών, διάστημα το οποίο είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερο από το αντίστοιχο των ατμοστροβίλων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, προτείνεται η προθέρμανση του στροβίλου κατά τη διάρκεια που βρίσκεται εκτός λειτουργίας, μέσω της οποίας αναπτύσσονται θερμοκρασιακά προφίλ που επιτρέπουν την άμεση εκκίνηση και λειτουργία του στροβίλου.

Ο σχεδιασμός των παραπάνω τροποποιήσεων για την κατασκευή ενός στροβίλου κατάλληλου για την αποτόνωση του συμπιεσμένου αέρα του συστήματος AA-CAES γίνεται χρησιμοποιώντας ως βάση το στρόβιλο της Alstom, που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.7. Στρόβιλος ενός κελύφους, απλής ροής και υψηλής πυκνότητας ισχύος της ALSTOM. [9]

Οι υψηλές πιέσεις (μέχρι 200bar) και θερμοκρασίες (έως και 600°C) που αναπτύσσονται στην είσοδο του στροβίλου αντιμετωπίζονται με χρήση ήδη υπαρχόντων και δοκιμασμένων τεχνικών και υλικών. Η εκ νέου σχεδίαση του στροβίλου στοχεύει στην κατασκευή μηχανών ενός κελύφους και απλής ροής, που θα έχουν ισχύ ως και 300MW, με όσο το δυνατόν υψηλότερων βαθμών απόδοσης με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Αξιοπρόσεκτη, μάλιστα, είναι η προκύπτουσα πυκνότητα ισχύος αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η τελευταία βαθμίδα από μόνη της παρέχει ισχύ της τάξεως των 50 MW. Η συνδεδεμένη με το στρόβιλο γεννήτρια θα είναι αερόψυκτη και θα πρέπει επίσης να χαρακτηρίζεται από έναν υψηλό βαθμό απόδοσης. [4], [7], [8], [9]

Στόχος του ερευνητικού προγράμματος για την ανάπτυξη του συστήματος αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα είναι η βελτιστοποίηση αυτού μέσω της κατά το δυνατόν καλύτερης ενσωμάτωσης των βασικών (συμπιεστής, διατάξεις αποθήκευσης θερμότητας και συμπιεσμένου αέρα, στρόβιλος) και των υπόλοιπων συνιστωσών (εναλλάκτες θερμότητας, γεννήτρια, κτλ.) σε ένα ενιαίο σύνολο τέτοιο, που θα είναι σε θέση να επιτύχει υψηλούς βαθμούς απόδοσης, να χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και καλή λειτουργική συμπεριφορά. Ωστόσο, παράλληλα με την έρευνα που διεξάγεται σε τεχνικό επίπεδο, και με σκοπό τη μείωση της διάρκειας του ερευνητικού σταδίου ανάπτυξης, εκπονούνται και οι αντίστοιχες οικονομικές αναλύσεις που συνεκτιμούν την εμπορευσιμότητα του υπό κατασκευή συστήματος.

Οι παρούσες μελέτες συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι το καταλληλότερο μέγεθος ενός τέτοιου συστήματος είναι τα 10MW για αποκεντρωμένο δίκτυο και τα 300MW για το κεντρικό. Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας με χαρακτηριστικές παραμέτρους του συστήματος για τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις:

	<b>Μονοβάθμια διάταξη 300MW (Κεντρικό δίκτυο)</b>	<b>Διβάθμια διάταξη 10MW (Αποκεντρωμένο δίκτυο)</b>
Χωρητικότητα [MWh]	1800	120
Ισχύς [MW]	300	10
Πίεση [bar]	100	15/150
Παροχή μάζας (φόρτιση) [kg/s]	220	20
Παροχή μάζας (αποφόρτιση) [kg/s]	550	20
Θερμοκρασία εισόδου στη διάταξη αποθ. θερμ. (φόρτιση) [°C]	620	450/450
Θερμοκρασία εισόδου στη διάταξη αποθ. θερμ. (αποφόρτιση) [°C]	20	20

Θερμοκρασία εξόδου από τη διάταξη αποθ. θερμ. (αποφόρτιση) [°C]	600	210/20
--	-----	--------

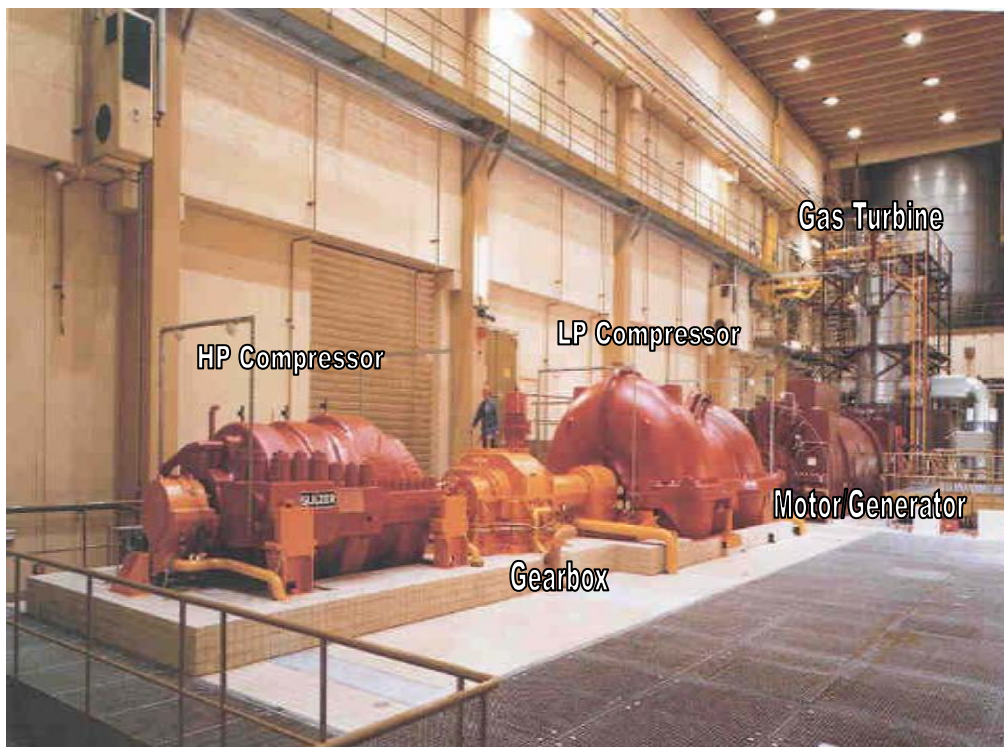
Τα καλύτερα σχεδιασμένα συστήματα χαρακτηρίζονται από βαθμό απόδοσης και κόστος επένδυσης της ίδιας τάξης μεγέθους με τα αντίστοιχα του συστήματος αποθήκευσης με αντλιοταμίευση. Διαφοροποιήσεις των παραπάνω συστημάτων αξιολογούνται με βάση της επικρατούσας κατάστασης στην αγορά. Έτσι, χρησιμοποιούνται τα σημερινά δεδομένα της αγοράς και σενάρια της μελλοντικής ανάπτυξής της, τα οποία λαμβάνοντας υπόψη σημαντικές παραμέτρους όπως η διακύμανση των τιμών των καυσίμων, η πιστοποίηση εκπομπών, οι πολιτικές κατευθύνσεις, κ.ά., προβλέπουν την ανάπτυξη των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών και τη διαμόρφωση των τιμών της αγοράς. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου εύρους των παραγόντων επιρροής (τεχνολογικοί, οικονομικοί, πολιτικοί), η ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας συστημάτων AA-CAES περιορίζεται στην γερμανική και την ολλανδική αγορά, χώρες για τις οποίες προβλέπεται αυξανόμενο δυναμικό αγοράς μέχρι και το 2020. [8], [9]

#### 2.4 Εφαρμογές-Υπάρχοντες σταθμοί αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Οι υπάρχοντες σταθμοί αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα μέχρι στιγμής παγκοσμίως ανέρχονται σε δύο, ενώ δύο ακόμα βρίσκονται υπό κατασκευή.

Συγκεκριμένα, ο πρώτος σταθμός κατασκευάστηκε από την εταιρεία Nordwestdeutsche Kraftwerke AG στο κρατίδιο του Niedersachsen και για την ακρίβεια, στην περιοχή Elsfleth-Neuenhuntrorf μεταξύ Βρέμης και Όλντενμπουργκ το 1978. Οι σχετικές μελέτες ξεκίνησαν το 1975, ο προϋπολογισμός υπολογίστηκε στα 92 εκατομμύρια γερμανικά μάρκα και η κατασκευή της εγκατάστασης δρομολογήθηκε στις αρχές του 1978. Ο κύριος ρόλος που επιτελεί ο παραπάνω σταθμός είναι η παροχή ισχύος σε περίπτωση που τεθεί κάποια μονάδα εκτός λειτουργίας και επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα αποφευχθεί η αγορά ακριβού ρεύματος κατά τις ώρες αιχμής. Στον συγκεκριμένο σταθμό χρησιμοποιείται το φθινό νυχτερινό ρεύμα για την τροφοδοσία συμπιεστή ισχύος 60 MW, ο οποίος θα εκτελέσει τη συμπίεση του αέρα πριν αυτός οδηγηθεί στις δεξαμενές αποθήκευσης, που έχουν προκύψει από αφαλάτωση υπόγειας κοιλότητας του αλατούχου υδροφόρου ορίζοντα. Η φόρτιση των δύο κυλινδρικών δεξαμενών αποθήκευσης, που βρίσκονται σε βάθος 600-800m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και καταλαμβάνουν

όγκο  $150.000\text{m}^3$  η καθεμία, διαρκεί 8 ώρες και ο αέρας αποθηκεύεται σε πιέσεις μεταξύ 46-72bar. Όσον αφορά στην αποφόρτιση, ο αποθηκευμένος υπό πίεση αέρας αποτονώνεται σε στρόβιλο ισχύος 290 MW και η πλήρης αποφόρτιση επέρχεται μετά από διάστημα 2 ωρών. Για την παραγωγή 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί σε ώρες αιχμής απαιτούνται 0,83kWh ηλεκτρικής ενέργειας και 1,56kWh ενέργεια καυσίμου. Ο σταθμός αποθήκευσης του Huntorf δεν χρησιμοποιεί ανακόμιση θερμότητας για την προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα με αποτέλεσμα ο συνολικός βαθμός της εγκατάστασης να κυμαίνεται περί το 42%. Σημαντική παράμετρο για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης αποτελεί η χρήση γλυκού νερού για τον καθαρισμό του στροβίλου, ώστε να αποφεύγονται επικαθίσεις υπολειμμάτων άλατος που επηρεάζουν δυσμενώς τη λειτουργία του στροβίλου.



Σχήμα 2.8. Εσωτερικό του σταθμού αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα στο Huntorf και οι συνιστώσες του. [11]

Μία παρόμοια εγκατάσταση βρίσκεται σε λειτουργία από το 1991 στο McIntosh της Αλαμπάμα (ΗΠΑ) και ο προϋπολογισμός του υπολογίστηκε στα 65.000.000\$. Η δεξαμενή αποθήκευσης του παραπάνω σταθμού αποθήκευσης καταλαμβάνει όγκο  $538.000\text{m}^3$  και βρίσκεται σε βάθος 450-700m κάτω από το έδαφος. Η φόρτιση της παραπάνω δεξαμενής γίνεται με αέρα που έχει συμπιεσθεί από μηχανή ισχύος 60 MW σε πίεση 45bar



(πλήρως αποφορτισμένη δεξαμενή) - 76bar (πλήρως φορτισμένη δεξαμενή) και διαρκεί 45 ώρες, ενώ η αποτόνωση του αποθηκευμένου αέρα λαμβάνει χώρα σε στρόβιλο ισχύος 110 MW με το σύστημα να είναι σε θέση να παράγει ενέργεια για χρονικό διάστημα 26 ωρών μέχρι να αποφορτιστεί πλήρως. Για την παραγωγή 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί σε ώρες αιχμής απαιτούνται 0,69kWh ηλεκτρικής ενέργειας και 1,17kWh ενέργεια καυσίμου. Το σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα στο σταθμό του McIntosh περιλαμβάνει τεχνολογία ανακόμισης θερμότητας των καυσαερίων με αποτέλεσμα την επίτευξη βαθμού απόδοσης που μπορεί να αγγίξει και το 54%. Η αύξηση αυτή του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης σε σχέση με τον αντίστοιχο του σταθμού στο Huntorf οφείλεται στο γεγονός ότι μειώνεται κατά περίπου 25% η ποσότητα του καυσίμου που προστίθεται στο θάλαμο καύσης πριν την αποτόνωση του αέρα.

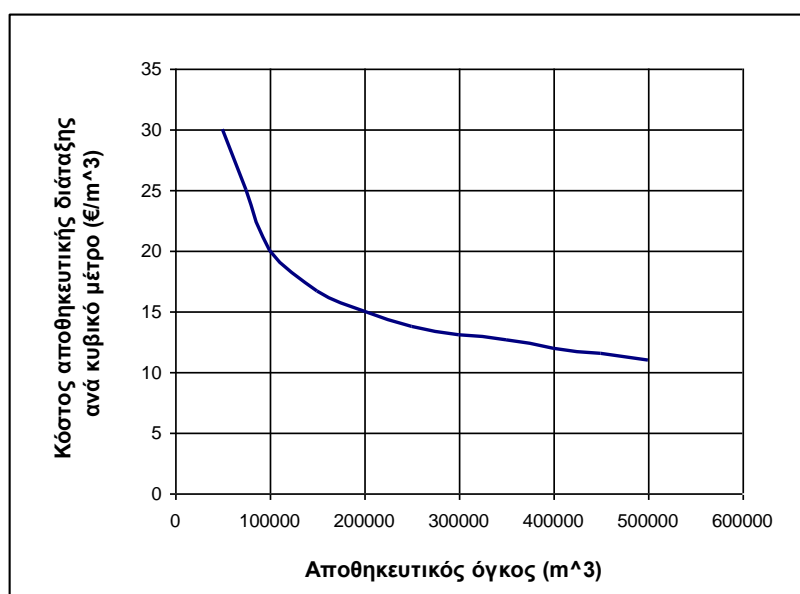
Όσον αφορά στις υπό κατασκευή εγκαταστάσεις αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, η πρώτη βρίσκεται στο Norton του Ohio (ΗΠΑ) και πρόκειται για σύστημα με ανακόμιση της θερμότητας των καυσαερίων προς προθέρμανση του αποθηκευμένου αέρα. Ο συγκεκριμένος σταθμός κατασκευάζεται με σκοπό την παραγωγή και πώληση ενέργειας σε οργανισμούς κοινής ωφέλειας και επιχειρήσεις προς χρήση κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης. Αποτελείται από ένα συμπιεστή ισχύος 1.800 MW, που συμπιέζει τον αέρα στα 100 bar πριν αυτός καταλήξει στην δεξαμενή αποθήκευσης όγκου 10.000.000 m<sup>3</sup>. Ως αποθηκευτική διάταξη σε αυτήν την εγκατάσταση δεν χρησιμοποιείται κοιλότητα του αλατούχου υδροφόρου ορίζοντα, αλλά ένα άλλοτε υπόγειο ορυχείο ασβεστόλιθου. Η παραγωγή της ενέργειας γίνεται από στρόβιλο ισχύος 2.700 MW και η διάρκεια της αποφόρτισης ανέρχεται στις 8 ημέρες.

Η δεύτερη υπό κατασκευή εγκατάσταση βρίσκεται στην Iowa της Minnesota (ΗΠΑ) και πρόκειται για ένα ενεργειακό σταθμό (Iowa Storage Energy Plant) που περιλαμβάνει την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου ισχύος 75-150 MW, το οποίο θα συνδέεται με σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση αναμένεται να παρουσιάζει αυξημένο βαθμό απόδοσης καθότι ως δεξαμενή αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα δεν θα χρησιμοποιηθεί το εσωτερικό κάποιου υπόγειου ορυχείου, αλλά ο υδροφόρος ορίζοντας. Το γεγονός αυτό περιορίζει τις μεταβολές της πίεσης στην αποθηκευτική διάταξη του αέρα, οι οποίες οδηγούν το συμπιεστή και το στρόβιλο να λειτουργούν με χαμηλότερο βαθμό απόδοσης λόγω της απομάκρυνσης τους από το σημείο σχεδίασης. Ο περιορισμός των μεταβολών της πίεσης οφείλεται στο γεγονός ότι η μετατόπιση του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα έχει ως αποτέλεσμα να καθορίζεται η πίεση του αέρα από τη σταθερή υδροστατική πίεση του νερού. [10], [11], [12], [13]

Τέλος, όσον αφορά στα συστήματα με αποθήκευση θερμότητας (AA-CAES), περίπου 20 φορείς συνεχίζουν την έρευνά τους σε αυτόν τον τομέα στο πλαίσιο του στηριζόμενου από την Ευρωπαϊκή Ένωση προγράμματος “Advanced Adiabatic-Compressed Air Energy Storage” και βιομηχανικές εφαρμογές των συστημάτων αναμένονται περί το 2015. Στο δεύτερο μισό του 2009 ξεκίνησε η κατασκευή της πειραματικής εγκατάστασης της EnBW AG με αναμενόμενη ολοκλήρωση των έργων το 2011 και θα λειτουργήσει αρχικά ως σύστημα αποθήκευσης χωρίς αποθήκευση θερμότητας. Σε δεύτερο στάδιο θα λειτουργήσει ως AA-CAES με βαθμό απόδοσης 70% και ισχύ 150-600MW. Σε τέτοια συστήματα αναμένεται ότι για την παραγωγή 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιείται σε ώρες αιχμής θα απαιτούνται 1,42kWh ηλεκτρικής ενέργειας και μηδενική ενέργεια καυσίμου. [4], [13]

## 2.5 Τυπικά κόστη κατασκευής και λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι άμεσα εξαρτώμενο από το είδος και τον όγκο της υπόγειας αποθηκευτικής διάταξης του συμπιεσμένου αέρα. Ειδικότερα, για χρήση κοιλάδας του αλατούχου υδροφόρου ορίζοντα ως αποθηκευτικής διάταξης του συστήματος, το ανά κυβική μονάδα όγκου κόστος της διάταξης μειώνεται όσο ο αποθηκευτικός όγκος αυξάνεται, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.9. Διάγραμμα απεικόνισης του ανηγμένου κόστους της αποθηκευτικής διάταξης συναρτήσει του όγκου αποθήκευσης. [5]

Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες αντιπροσωπευτικές τιμές του κόστους επένδυσης και λειτουργίας μίας εγκατάστασης αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα χωρίς αποθήκευση θερμότητας: [5]

- Κόστος επένδυσης

Συνιστώσα συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	Κόστος
Αποθηκευτική διάταξη	2,1-3,3 €/kWh
Στρόβιλος	150 €/kW
Συμπιεστής	140 €/kW
Υπολογισμοί (Balance of plant)	180 €/kW
<b>Συνολικό κόστος επένδυσης</b>	<b>400-1000 €/kW</b>

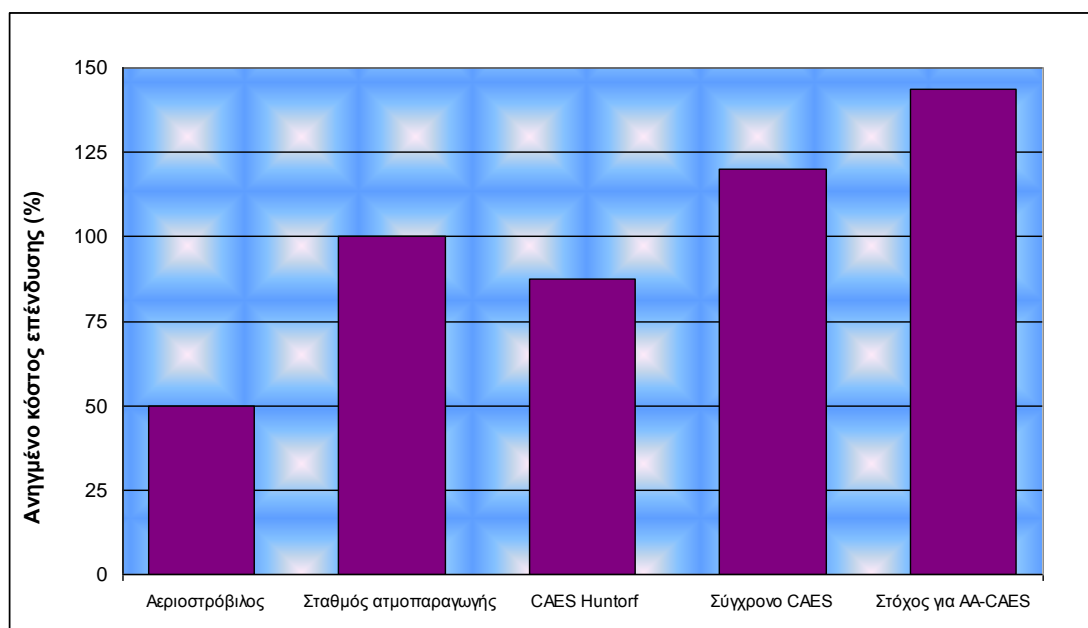
- Κόστος λειτουργίας

Σταθερό κόστος	4,5 €/kW
Μεταβλητό κόστος	0,15 €/kWh
Κόστος καυσίμου	3,9 €/GJ
Κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (παραγωγή σε αιολικά πάρκα)	0,087 €/kWh
Κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (παραγωγή σε συμβατικό σταθμό)	0,028 €/kWh

- Χρηματοδότηση

Ίδια κεφάλαια	25%
Επιτόκιο δανεισμού	11%
Επιτόκιο αναγωγής	8%
Πληθωρισμός	2%

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία χονδρική εκτίμηση του κόστους τόσο των υπαρχόντων όσο και των υπό ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, μεγέθη τα οποία εν συνεχεία θα συγκριθούν με τα κόστη που εμφανίζονται σε εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων και ατμοπαραγωγών. Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα [14] που απεικονίζει τα ανηγμένα στην ισχύ της γεννήτριας κόστη επένδυσης για συστήματα CAES και τις ανταγωνιστικές του τεχνολογίες:

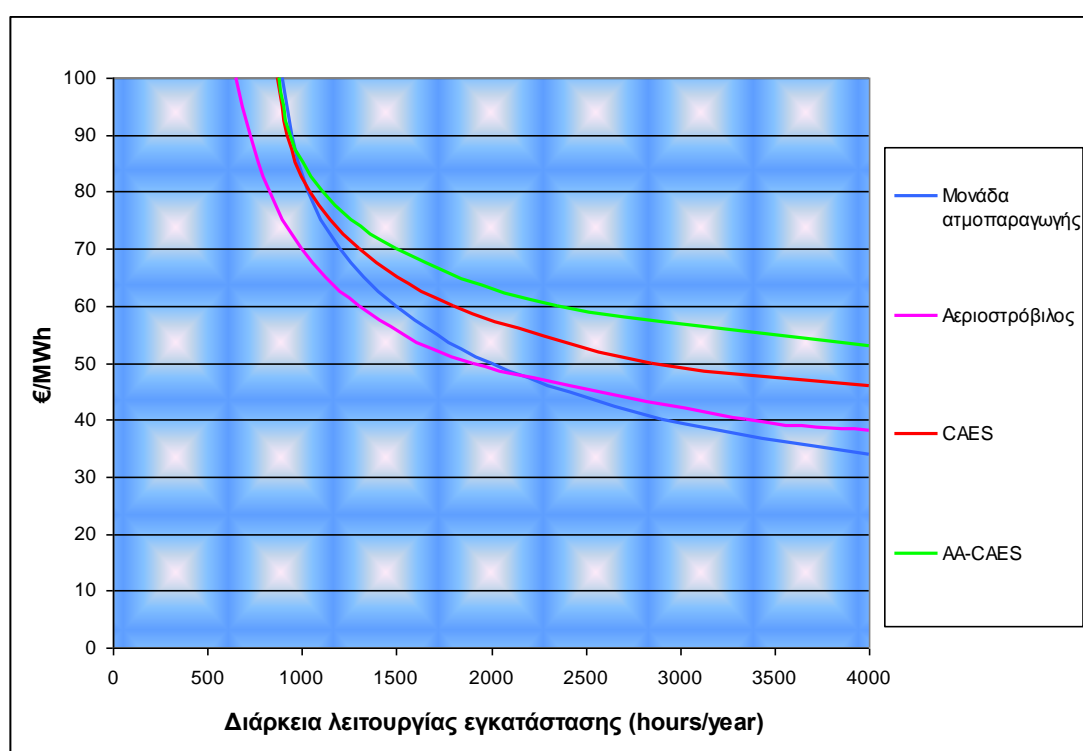


Σχήμα 2.10. Σύγκριση του ανηγμένου κόστους επένδυσης των συστημάτων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με τις ανταγωνιστικές τους τεχνολογίες (πηγή: Alstom) [14]

Για τον υπολογισμό του κόστους επένδυσης του κατασκευασμένου το 1978 σταθμού αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα στο Huntorf έγινε αναγωγή των χρηματορροών στην παρούσα αξία. Λόγω του ότι τα ακριβή οικονομικά στοιχεία διατηρούνται απόρρητα, αποφεύγεται να γίνει ακριβέστερος προσδιορισμός του κόστους. Παρατηρώντας τα ανηγμένα κόστη που παρουσιάζονται στο διάγραμμα από την σκοπιά του ιδιαίτερα χαμηλού κόστους αεριοστροβίλου, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι υπόλοιπες τεχνολογίες χαρακτηρίζονται από κόστη της ίδιας τάξης μεγέθους. Όσον αφορά στο σύστημα αδιαβατικής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι πρόκειται για ένα μέγεθος που αποτελεί στόχο, ο οποίος ωστόσο κρίνεται ότι είναι επιτεύξιμος. Πιθανώς, όμως, τα πρώτα συστήματα AA-CAES που θα διατεθούν στην αγορά να παρουσιάσουν κόστος σημαντικά υψηλότερο. Αντιθέτως, το κόστος επένδυσης των σύγχρονων CAES μπορεί, σύμφωνα με την Alstom, να επιτευχθεί ακόμα και σήμερα. Σημαντικό στοιχείο για το κόστος ενός CAES αποτελεί το γεγονός ότι το κόστος εγκατάστασης και

Λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι άμεσα εξαρτώμενο όχι μόνο από την εγκατεστημένη ισχύ της γεννήτριας, αλλά επιπλέον από την ισχύ του συμπιεστή και από το είδος και τον όγκο της υπόγειας αποθηκευτικής διάταξης του συμπιεσμένου αέρα, χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία είναι όλα ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο, για το σύγχρονο σύστημα CAES υποτέθηκε ότι παρουσιάζει λόγο διάρκειας φόρτισης προς διάρκεια αποφόρτισης ίσο με 1 προς 1.

Όσον αφορά στο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στο παρακάτω διάγραμμα [14] δίνεται μία εκτίμηση αυτού συναρτήσει του χρονικού διαστήματος λειτουργίας της εγκατάστασης σε ένα χρόνο:



Σχήμα 2.11. Σύγκριση κόστους παραγωγής ενέργειας συστημάτων CAES με τις ανταγωνιστικές τους τεχνολογίες [14]

Στην παραπάνω εκτίμηση θεωρήθηκε ότι η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι διαμορφωμένη στα 30 €/MWh και ότι η αγορά φυσικού αερίου κοστίζει 3 €/GJ. Η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ανταποκρίνεται στη σημερινή τιμή πώλησης της μη αιχμιακής περιόδου, ενώ η τιμή του φυσικού αερίου στον αναμενόμενο μέσο όρο των τιμών που θα διαμορφωθούν κατά τα ερχόμενα είκοσι έτη. Ωστόσο, νέες μελέτες προβλέπουν σημαντικά υψηλότερες τιμές του φυσικού αερίου στο μέλλον. Σε περίπτωση, λοιπόν, που η μέση τιμή του φυσικού αερίου διαμορφωθεί στα 5 €/GJ στα επόμενα είκοσι έτη, το σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα θα αποτελεί την

οικονομικότερη τεχνολογία στην περιοχή των 1500 ωρών λειτουργίας ανά έτος. Αντίθετα, σε περίπτωση χαμηλότερης τιμής του φυσικού αερίου και πάνω από την περιοχή των 1500 ωρών λειτουργίας ανά έτος, η παραγωγή ενέργειας σε ατμοπαραγωγικές μονάδες αποδεικνύεται ότι είναι η πιο συμφέρουσα.

Συμπερασματικά, η σύγκριση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση συστημάτων CAES και AA-CAES με το αντίστοιχο κόστος των ανταγωνιστικών τους τεχνολογιών διασαφηνίζει ότι τα συστήματα αυτά λόγω του υψηλού μεταβλητού τους κόστους είναι ανταγωνιστικά μόνο όταν χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας σε περιόδους αιχμής της ζήτησης και με σχετικά μικρή διάρκεια λειτουργίας κατά τη διάρκεια ενός έτους. [14]

### **3. ΥΠΕΡΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE-CAES)**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Τα μικρά, αποκεντρωμένα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι ο αέρας δεν αποθηκεύεται σε μεγάλη κλίμακα σε υπόγειες δεξαμενές, αλλά σε μικρότερες ποσότητες πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Ως πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης μπορούν να θεωρηθούν τα ακόλουθα:

- η μονάδα αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα είναι ανεξάρτητη από τη γεωλογική διαμόρφωση κάθε περιοχής και μπορεί να εγκατασταθεί στη βέλτιστη από τεχνικής πλευράς τοποθεσία (π.χ. σε πολύ κοντινή απόσταση από ένα αιολικό πάρκο ή σε θέση που διευκολύνει τη σύνδεση με το δίκτυο)
- η μονάδα αποθήκευσης μπορεί να σχεδιασθεί, να κατασκευασθεί και να αξιοποιηθεί ως συνιστώσα της μονάδας παραγωγής ενέργειας (π.χ. αιολικό πάρκο). Κατά αυτόν τον τρόπο ξεπερνιούνται κάποια εμπόδια, που εμφανίζονται στο στάδιο της κατασκευής και λειτουργίας των CAES στην περίπτωση που αυτά λειτουργούν μεμονωμένα.

Στα συστήματα αυτά απαιτείται η επίτευξη σημαντικά υψηλότερων πιέσεων και όσο το δυνατόν μεγαλύτερης πυκνότητας ισχύος. Ως διατάξεις αποθήκευσης του αέρα στα υπέργεια συστήματα χρησιμοποιούνται τα εξής:

- ✓ συμβατικές φιάλες πεπιεσμένου αέρα,
- ✓ υπόγειες και στεγανοποιημένες σωληνώσεις υψηλής πίεσης,
- ✓ ειδικής κατασκευής διατάξεις,
- ✓ υδραυλικοί συσσωρευτές (διατάξεις αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, όπου ο αέρας συμπιέζεται με τη βοήθεια ρευστού).

Τα περισσότερα γνωστά συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα μικρής κλίμακας σχεδιάσθηκαν ούτως ώστε να μπορούν να εξασφαλίζουν την παροχή αδιάλειπτης ισχύος. Συνεπώς, για την εφαρμογή που προορίζονται τα συγκεκριμένα συστήματα, απαιτείται από αυτά να χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία, απλότητα κατασκευής και χαμηλούς χρόνους απόκρισης. Αντιθέτως, στοιχεία όπως ο βαθμός απόδοσης του συστήματος, η ενεργειακή του πυκνότητα και το ανηγμένο κόστος παραγωγής της παρεχόμενης ενέργειας είναι δευτερευούσης σημασίας. Σε διαφορετικές περιπτώσεις και όταν αυτό απαιτείται από την αντίστοιχη εφαρμογή, τα παραπάνω συστήματα εξελίσσονται περαιτέρω ούτως ώστε να επιτύχουν μεγαλύτερες τιμές ισχύος και χωρητικότητας αποθήκευσης.

Στο σημείο αυτό, ωστόσο, απαραίτητο κρίνεται να εξετασθεί το κατά πόσο αυτά τα τροποποιημένα συστήματα μπορούν να βρουν εφαρμογή στο πλαίσιο της ενδιάμεσης αποθήκευσης ενέργειας παραγόμενης από αιολικά πάρκα. Συγκεκριμένα, πρέπει να εξετασθούν οι εξής παράγοντες:

- ποιος είναι ο κατασκευαστής του συστήματος,
- ποια είναι η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται το σύστημα,
- σε ποιο στάδιο ανάπτυξης βρίσκεται το σύστημα,
- πού βρίσκει εφαρμογές το συγκεκριμένο είδος συστημάτων,
- ποια τα πλεονεκτήματα και ποια τα μειονεκτήματα του συστήματος,
- ποιες τεχνικές και οικονομικές παράμετροι αναμένεται να επιτευχθούν,
- κατά πόσο έχει αυτή η τεχνολογία τη δυνατότητα να συμβάλλει στη βέλτιστη ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. [15]

### 3.2 Διαμόρφωση υπέργειων συστημάτων CAES

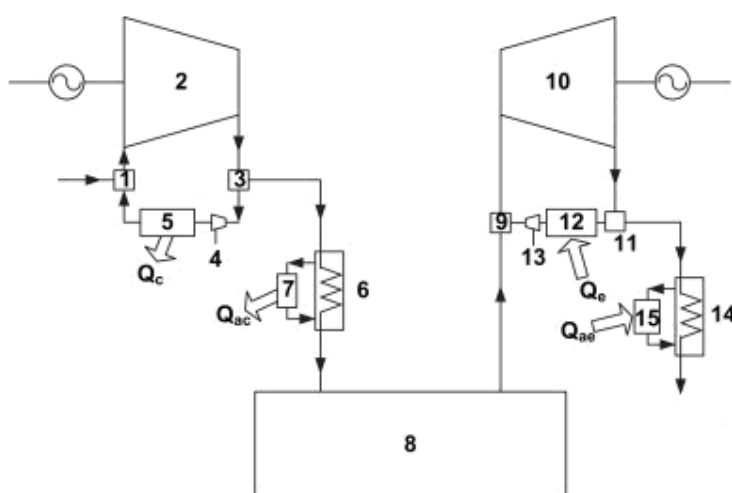
Πληθώρα διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα μπορούν να κατασκευασθούν με βάση κάποιες τροποποιήσεις των διεργασιών της συμπίεσης και της εκτόνωσης. Σε αντίθεση με τα υπόγεια συστήματα αποθήκευσης, όπου είναι σύνηθες η συμπίεση και η εκτόνωση να εκτελούνται σε περισσότερες της μίας βαθμίδες με ενδιάμεση ψύξη και αναθέρμανση αντίστοιχα, στα υπέργεια συστήματα απαιτείται η κατά το δυνατόν απλοποίηση του συστήματος επιτυγχάνοντας παράλληλα έναν υψηλό βαθμό απόδοσης. Για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι επιθυμητό η συμπίεση και η εκτόνωση να προσεγγίζουν την ισόθερμη μεταβολή (θερμοδυναμικός κύκλος Ericsson) παρά την αδιαβατική (κύκλος Brayton).

Για την επίτευξη σχεδόν ισόθερμων μεταβολών είναι απαραίτητος ο ψεκάσμος νερού (ή υγρού) κατά τη συμπίεση του αέρα ούτως, ώστε να απορροφήσει την εκλυόμενη θερμότητα. Μετά την έξοδο του μίγματος αέρα-νερού από το συμπιεστή, ο αέρας διαχωρίζεται από το νερό και οδηγείται, αφού ψυχθεί με τη βοήθεια υδρόψυκτου εναλλάκτη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, στην αποθηκευτική διάταξη. Από την άλλη πλευρά, το πεπιεσμένο νερό ψύχεται, αφού ανακτηθεί η ενέργεια που του προσδόθηκε κατά τη συμπίεση μέσω ενός υδραυλικού κινητήρα, και ανακυκλοφορεί. Οι ποσότητες τόσο του θερμού νερού, που προκύπτει από το διαχωρισμό του μίγματος αέρα-νερού μετά τη συμπίεση, όσο και του νερού που χρησιμοποιείται στον εναλλάκτη με σκοπό την ψύξη του συμπιεσμένου αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη θερμικών αναγκών. [12]



### 3.2.1 Υπέργειο σύστημα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα

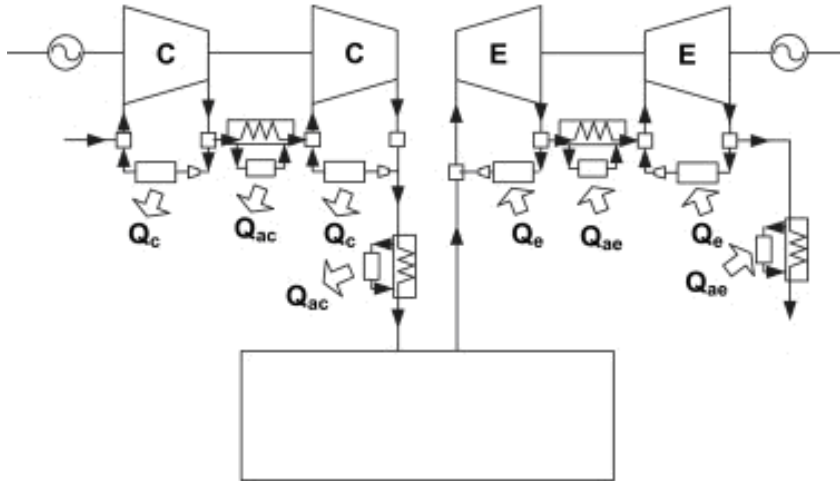
Όσον αφορά στη διεργασία της εκτόνωσης του συμπιεσμένου αέρα, παρά το γεγονός ότι στα συστήματα CAES είναι συνήθης η παρουσία ενός εναλλάκτη θερμότητας ή θαλάμου καύσης με στόχο τη θέρμανση του αέρα πριν την είσοδό του στο στρόβιλο και συνεπώς την αύξηση της παραγόμενης ισχύος, η παρουσία των συνιστωσών αυτών δεν είναι απαραίτητη. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μονοβάθμια διάταξη του συγκεκριμένου συστήματος:



Σχήμα 3.1. Μονοβάθμιο σύστημα micro-CAES χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη. (1), (9) ανάμιξη αέρα-υγρού, (2) συμπιεστής, (3), (11) διαχωριστής μίγματος, (4) υδραυλικός κινητήρας, (5), (6), (7), (12), (14), (15) εναλλάκτης θερμότητας, (8) φιάλες πεπιεσμένου αέρα, (10) στρόβιλος, (13) αντλία. [12]

Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που δεν επιτελείται θέρμανση του αέρα πριν την εκτόνωσή του στο στρόβιλο του συστήματος, ο εκτονωμένος αέρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη ψυκτικών αναγκών και η επίτευξη εκτόνωσης που προσεγγίζει την ισόθερμη μεταβολή απαιτεί τον ψεκασμό νερού (ή υγρού) στο εσωτερικό του στρόβιλου. Το υγρό αυτό διαχωρίζεται από τον αέρα μετά την εκτόνωση, χρησιμοποιείται επίσης για την κάλυψη ψυκτικών αναγκών και, τέλος, συμπιέζεται με τη χρήση αντλίας πριν ανακυκλοφορήσει και ψεκασθεί εκ νέου στο στρόβιλο του συστήματος.

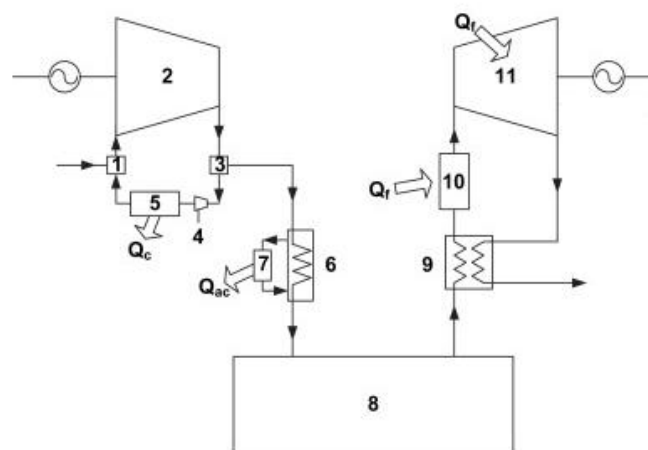
Το αντίστοιχο διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης αέρα περιλαμβάνει ενδιάμεση ψύξη του αέρα μεταξύ των δύο συμπιεστών και αναθέρμανσή του μεταξύ των στρόβιλων και συντελεί στην αύξηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Στη συνέχεια ακολουθεί απεικόνιση του διβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα: [12]



Σχήμα 3.2. Διβάθμιο σύστημα micro-CAES χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη. [12]

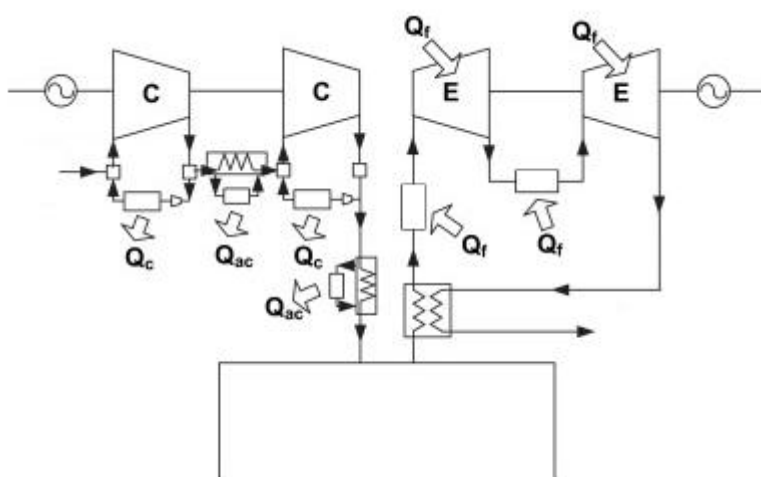
### 3.2.2 Υπέργειο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα

Εναλλακτικά, αν το σύστημα αποθήκευσης παρέχει τη δυνατότητα προθέρμανσης του αέρα πριν την είσοδό του στο στρόβιλο, η επίτευξη εκτόνωσης που προσεγγίζει την ισόθερμη μεταβολή απαιτεί θέρμανση του στροβίλου με καύση συμπληρωματικού καυσίμου ή ψεκασμό υγρού υψηλής θερμοκρασίας (έλαια) στο εσωτερικό του κατά την εκτόνωση.



Σχήμα 3.3. Μονοβάθμιο σύστημα micro-CAES με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα. (1) ανάμιξη αέρα-υγρού, (2) συμπιεστής, (3) διαχωριστής μίγματος, (4) υδραυλικός κινητήρας, (5), (6), (7) εναλλάκτης θερμότητας, (8) φιάλες πεπιεσμένου αέρα, (9) ανακομιστής θερμότητας, (10) θερμαντήρας αέρα, (11) στρόβιλος. [12]

Επιπλέον, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, το σύστημα αυτό περιλαμβάνει και ανακομιστή θερμότητας των καυσαερίων του στροβίλου με σκοπό τη θέρμανση του ψυχρού συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδό του από την αποθηκευτική διάταξη και πριν την είσοδό του στον θερμαντήρα αέρα ή το στρόβιλο. Τέλος, απεικονίζεται το διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση, το οποίο περιλαμβάνει ενδιάμεση ψύξη μεταξύ των δύο βαθμίδων συμπίεσης και αναθέρμανση του εκτονωμένου αέρα μεταξύ των δύο βαθμίδων εκτόνωσης: [12]



Σχήμα 3.4. Διβάθμιο σύστημα micro-CAES με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη. [12]

### 3.3 Χαρακτηριστικά των υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης αέρα

Σε ένα σύστημα micro-CAES εμφανίζονται αισθητά μεγαλύτεροι λόγοι πίεσης κατά τη συμπίεση και την εκτόνωση σε σύγκριση με τους αντίστοιχους σε έναν αεριοστρόβιλο ή μία ψυκτική διάταξη και κατά συνέπεια, οι εμφανιζόμενες θερμοκρασιακές διαφορές κατά τις δύο αυτές διεργασίες είναι πολύ μεγαλύτερες. Επιπρόσθετα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η συμπίεση και η εκτόνωση στα υπέργεια συστήματα αποθήκευσης είναι επιθυμητό να προσεγγίζουν την ισόθερμη μεταβολή (θερμοδυναμικός κύκλος Ericsson) παρά την αδιαβατική (κύκλος Brayton), κάτι το οποίο οφείλεται στους υψηλούς λόγους πίεσης που εμφανίζονται και αποσκοπούν στην επίτευξη υψηλότερων βαθμών απόδοσης.

Όσον αφορά στην περίπτωση συστημάτων, όπου οι διεργασίες της συμπίεσης και της εκτόνωσης πραγματοποιούνται κατά αδιαβατικό τρόπο, αυτά εμφανίζουν υψηλή καταστροφή εξέργειας λόγω των υψηλών θερμοκρασιακών διαφορών του αέρα μεταξύ της αρχής και του πέρατος κάθε διεργασίας και της μικρής ανάκτησης θερμότητας από τον υδραυλικό κινητήρα

ή τον ανακομιστή αντίστοιχα. Συμπερασματικά, δύο ή περισσότερες βαθμίδες συμπίεσης ή εκτόνωσης με ενδιάμεση ψύξη ή αναθέρμανση του εργαζόμενου μέσου αντίστοιχα απαιτούνται για την αύξηση της ενεργειακής και εξεργειακής απόδοσης του συστήματος.

Αντιθέτως, σε συστήματα με διεργασίες που προσεγγίζουν την ισόθερμη μεταβολή, η αύξηση που παρατηρείται στην ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του συστήματος με δύο βαθμίδες είναι αμελητέα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη ενός μονοβάθμιου συστήματος και συνεπώς, η χρησιμοποίηση δύο βαθμίδων για τη συμπίεση και την εκτόνωση του αέρα δεν κρίνεται απαραίτητη. Επιπλέον, στα συστήματα με σχεδόν ισόθερμες μεταβολές είναι εφικτό να επιτευχθούν μετά τη συμπίεση ή την εκτόνωση οι απαιτούμενες για την κάλυψη του θερμικού ή του ψυκτικού φορτίου αντίστοιχα θερμοκρασίες μέσω της κατάλληλης παροχής μάζας του ψεκαζόμενου υγρού, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούνται οι εξεργειακές απώλειες. Τέλος, ένα τέτοιο σύστημα αποτελεί πολύ καλή επιλογή για εφαρμογή σε αποκεντρωμένα δίκτυα, καθότι συνδυάζει, όπως το σύνολο των υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης, τις δυνατότητες αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας με την κάλυψη θερμικών και ψυκτικών αναγκών, αλλά με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. [12]

### 3.4 Εφαρμογές - Υπάρχοντα και ερευνώμενα συστήματα υπέργειων CAES

Παγκοσμίως υπάρχει πληθώρα διαφορετικών ιδεών για την ανάπτυξη υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια επιλεγμένα συστήματα αποθήκευσης, τα οποία, σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους, έχουν τη δυνατότητα να εφαρμοσθούν με σκοπό τη βέλτιστη ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο.

- SCAES (Small CAES)

Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από την αμερικάνικη εταιρεία Energy Storage and Power Consultants (ESPC) Inc. και πρόκειται για έναν αεριοστρόβιλο με την επιπλέον δυνατότητα εισαγωγής συμπιεσμένου αέρα στο στρόβιλο (Rolls Royce Allison με ηλεκτρική ισχύ μεταξύ 8-15 MW). Όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος, αυτό έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί με δύο τρόπους: ως συμβατικός αεριοστρόβιλος με ανακόμιση θερμότητας χωρίς την επιπλέον προσθήκη συμπιεσμένου αέρα και ως σύστημα αποθήκευσης, όπου πέραν του αέρα που παρέχεται κατευθείαν από το συμπιεστή, προστίθεται επιπρόσθετος αέρας υψηλής πίεσης από την αποθηκευτική διάταξη. Συγκεκριμένα, η περίσσεια της παραγωγής από το

αιολικό πάρκο διατίθεται για τη λειτουργία του κινητήρα που κινεί το συμπιεστή. Αέρας ατμοσφαιρικής πίεσης συμπιέζεται με ενδιάμεση ψύξη σε υψηλές πιέσεις (100-140bar) και αφού ψυχθεί, αποθηκεύεται σε υπόγειες σωληνώσεις. Σε ώρες αιχμής της ζήτησης, ο αποθηκευμένος εξάγεται από τις σωληνώσεις και αφού θερμανθεί με χρήση ανακομιστή θερμότητας των καυσαερίων του στροβίλου, οδηγείται στο θάλαμο καύσης (προσθήκη φυσικού αερίου) και τέλος, αποτονώνεται στο στρόβιλο της εγκατάστασης.

Σκοπός της αποθήκευσης του αέρα σε πιέσεις αντίστοιχες αυτών που συναντώνται σε υπόγεια συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα είναι η ελαχιστοποίηση του όγκου της διάταξης αποθήκευσης του αέρα. Η επιλογή υπογείων στεγανοποιημένων σωληνώσεων για την αποθήκευση του αέρα κρίθηκε από την ESPC, μετά από έρευνα που διεξήγαγε, η πιο συμφέρουσα από οικονομικής πλευράς.

Όσον αφορά στο στάδιο της ανάπτυξης του συγκεκριμένου συστήματος, αυτό βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο επίπεδο. Ωστόσο, προβλέπεται ότι το κόστος του θα ανέρχεται στα ίδια επίπεδα με το αντίστοιχο των υπόγειων CAES, αλλά θα χαρακτηρίζεται από μικρότερη διάρκεια αποφόρτισης (μέχρι 4 ώρες). Συγκεκριμένα, προβλέπεται ανηγμένο κόστος επένδυσης της τάξεως των 600€/kW, μέγεθος που μοιάζει ρεαλιστικό κυρίως λόγω της υψηλής πίεσης αποθήκευσης και της υψηλής ισχύος του στροβίλου. Αναφορικά με την αποθηκευτική διάταξη, η ESPC υποστηρίζει ότι το κόστος επένδυσης των σωληνώσεων θα κυμαίνεται μεταξύ 30-50 €/kWh. Ελέγχοντας την αληθοφάνεια των οικονομικών μεγεθών που δίνει η εταιρεία, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, με βάση τις τρέχουσες τιμές του χάλυβα, τα μεγέθη αυτά αντιπροσωπεύουν την κατώτατη επιτεύξιμη τιμή.

Συνοψίζοντας, το SCAES παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι αποτελείται από συνιστώσες ήδη δοκιμασμένες σε βιομηχανικές εφαρμογές με την εξαίρεση της διάταξης αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, γεγονός το οποίο αποκλείει την λήψη κάποιου ιδιαίτερου ρίσκου κατά την εφαρμογή του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, το κύριο πρόβλημα συνοψίζεται στο υψηλό κόστος της διάταξης αποθήκευσης του αέρα. Μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν ήδη υπάρχουσες (π.χ. που δεν χρησιμοποιούνται πλέον στον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκαν) σωληνώσεις υψηλής πίεσης, κρίνεται ένα σύστημα SCAES οικονομικά βιώσιμο. Ωστόσο, η βιωσιμότητα του συστήματος ενισχύεται από κάποιες ειδικές παραμέτρους, όπως:

- τα μικρά, αποκεντρωμένα δίκτυα παραγωγής ενέργειας (ισχυρές μεταβολές φορτίου)
- η βέλτιστη ενσωμάτωση ενέργειας παραγόμενης από ΑΠΕ (αιολική ενέργεια) στο δίκτυο

- η διαμόρφωση υψηλών τιμών των καυσίμων
- η έλλειψη δυνατότητας κατασκευής υβριδικού συστήματος με χρήση αντλιοταμείωσης
- η έλλειψη δυνατότητας αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα σε υπόγειες δεξαμενές λόγω της μη κατάλληλης γεωλογικής διαμόρφωσης του υπεδάφους
- η πτώση της τιμής του χάλυβα, που αποτελεί το υλικό κατασκευής των σωληνώσεων υψηλής πίεσης. [15]

- T-CAES (Transportable CAES)

Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από την επίσης αμερικάνικη εταιρεία Enis WindGen Renewable Energy Systems LLC και αποτελείται από μία υπέργεια διάταξη αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (αποθήκευση αέρα σε πιέσεις περί τα 80bar), η οποία φορτίζεται με θερμό αέρα που έχει υποστεί συμπίεση με ενδιάμεση ψύξη. Ο αέρας αυτός οδηγείται στη συνέχεια με πίεση που ανέρχεται στα 40bar κατά προσέγγιση στο στρόβιλο του συστήματος, όπου και αποτονώνεται χωρίς να έχει προηγηθεί θάλαμος καύσης και κατά συνέπεια χρήση πρόσθετου καυσίμου. Το σύστημα αυτό, εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχει τη δυνατότητα ανάκτησης της θερμότητας του συμπιεστή και του στροβίλου για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών αντίστοιχα ή ακόμα και της απευθείας χρήσης του συμπιεσμένου αέρα σε άλλες εφαρμογές με αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης της συνολικής εγκατάστασης.

Όσον αφορά στη διάταξη αποθήκευσης του αέρα, αυτή είναι εξοπλισμένη με παχείς τοίχους χάλυβα, οι οποίοι έχουν και θερμομονωτική δράση, αλλά και με εναλλάκτες θερμότητας ψυκτικού μέσου-αέρα, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση της δεξαμενής. Οι εναλλάκτες καταλαμβάνουν περίπου το 3% του όγκου της δεξαμενής και υπάρχουν τρεις επιλογές για την πρόσδοση της απαιτούμενης θερμότητας σε αυτούς:

- ✓ μέσω ηλιακών θερμικών συστημάτων,
- ✓ μέσω ενός καυστήρα ισχύος 40 kW,
- ✓ μέσω ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας του συμπιεστή.

Λόγω της χρήσης των εναλλακτών θερμότητας, η θερμοκρασία στο εσωτερικό της δεξαμενής αποθήκευσης κυμαίνεται μεταξύ των 30°C (αποφόρτιση) και 70°C (φόρτιση) περίπου. Για ένα τέτοιο σύστημα, μία δεξαμενή αποθήκευσης αέρα όγκου 1.300m<sup>3</sup> και χωρητικότητας 4 MWh (ισχύς 1 MW και διάρκεια

αποφόρτισης 4 ώρες) θα είχε τις εξής διαστάσεις: διάμετρο 1,8m, μήκος 540m (περίπου 30 δεξαμενές μήκους 20m), πάχος τοίχου χάλυβα 5,5cm και βάρος 1.327t.

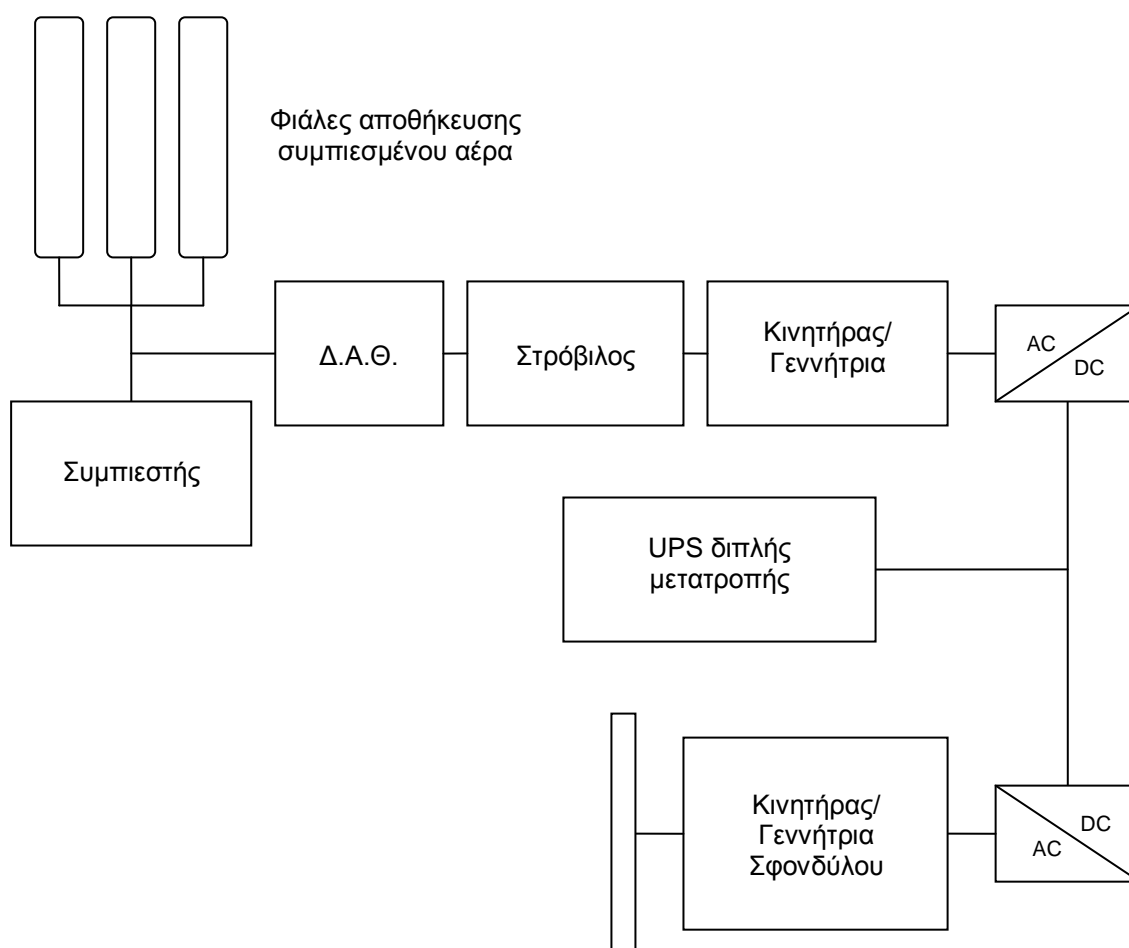
Όσον αφορά στο στάδιο ανάπτυξης του συστήματος T-CAES, εφαρμογή μέχρι σήμερα έχουν βρει κάποια συστήματα μικρής ισχύος (75kW), ενώ στην παρούσα περίοδο ερευνάται η κατασκευή συστημάτων ισχύος 0,2 - 2,5 MW<sub>el</sub>, η τεχνική λειτουργικότητα και το κόστος των οποίων στηρίζονται ακόμα σε θεωρητικές μελέτες. Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία, το ανηγμένο κόστος επένδυσης του συστήματος θα ανέρχεται στα 2600€/kW για τον συμπιεστή, το στρόβιλο και τη γεννήτρια, ενώ αναφορικά με την αποθηκευτική διάταξη, η Enis WindGen Renewable Energy Systems LLC υποστηρίζει ότι το κόστος επένδυσης θα κυμαίνεται περί τα 750 €/kWh. Αντιθέτως, δεν δίδονται στοιχεία για τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος από τον κατασκευαστή. Ωστόσο, ακόμα και σε περίπτωση που το μέγεθος αυτό είχε προσδιορισθεί μέσω των κατάλληλων υπολογισμών, θα ήταν δύσκολο να συγκριθεί με τους αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης των υπόλοιπων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, καθότι ο βαθμός απόδοσης ενός T-CAES περιλαμβάνει και τα ποσά θερμότητας που ανακτώνται από το συμπιεστή και το στρόβιλο για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών αντίστοιχα.

Συνοψίζοντας, η δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας στοχεύει στη βελτιστοποίηση του συστήματος από θερμοδυναμική άποψη και στη αποφυγή του βασικότερου μειονεκτήματος των συστημάτων CAES (μικρός βαθμός απόδοσης και υψηλό κόστος επένδυσης). Η βελτιστοποίηση αυτή οδηγεί σε μία πιθανή μείωση του ανηγμένου κόστους αποθήκευσης. Από την άλλη πλευρά, η ανάκτηση θερμότητας για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών ή η χρήση του συμπιεσμένου αέρα σε άλλες εφαρμογές προϋποθέτει μικρή απόσταση μεταξύ του τόπου παραγωγής και χρήσης αυτών. [15]

- TACAS (Thermal and Compressed Air Energy Storage)

Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από την αμερικάνικη εταιρεία Active Power και αποτελεί ένα συνδυασμό τριών συνιστωσών: α) αποθηκευτική διάταξη συμπιεσμένου αέρα (συμβατικές φιάλες συμπιεσμένου αέρα με πίεση που κυμαίνεται μεταξύ 300-400bar), β) διάταξη αποθήκευσης θερμότητας (εξοπλισμένη με ηλεκτρικές αντιστάσεις θέρμανσης) και γ) σφόνδυλο. Το σύστημα αυτό αποτελεί εξέλιξη της αποθηκευτικής διάταξης με χρήση σφονδύλου, η οποία διατίθεται στην αγορά από τη συγκεκριμένη εταιρεία από

το 1997. Το σύστημα λειτουργεί κατά τον ακόλουθο τρόπο: κατά την αποφόρτισή του, ο συμπιεσμένος αέρας οδηγείται στο στρόβιλο της εγκατάστασης διαμέσου της διάταξης αποθήκευσης θερμότητας ούτως ώστε να απορροφήσει το απαιτούμενο ποσό θερμότητας πριν αποτονωθεί. Όσον αφορά στις φιάλες αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα, αυτές ψύχονται κατά την αποφόρτιση και εν συνεχεία αφαιρούν ένα ποσό θερμότητας από το περιβάλλον. Κατά συνέπεια, ο αέρας εξόδου του στροβίλου ψύχεται λόγω των εκφορτιζόμενων φιαλών αποθήκευσης σε θερμοκρασίες χαμηλότερες αυτής του περιβάλλοντος, κάτι το οποίο επιτρέπει τη χρήση του για κάλυψη ψυκτικών αναγκών. Τέλος, ένας σφόνδυλος μικρών διαστάσεων απορροφά τις διακυμάνσεις του φορτίου και συμβάλλει, ώστε ο στρόβιλος να επιτυγχάνει μικρότερο χρόνο απόκρισης (περίπου 1 sec).



Σχήμα 3.5. Σχηματική απεικόνιση του συστήματος TACAS. [15]

Όσον αφορά στο στάδιο ανάπτυξης του συστήματος TACAS, μέχρι σήμερα έχουν βρει εφαρμογή συστήματα ισχύος μεταξύ 16 και 80 kW με



σκοπό την εξασφάλιση συνεχούς και αδιάλειπτης παροχής ισχύος και τα οποία κυκλοφορούν στην αγορά με το όνομα “Cool Air UPS”. Ο μέγιστος χρόνος αποφόρτισης ενός τέτοιου συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 15 και 35 λεπτών. Επιπλέον, αναπτύσσονται συστήματα ακόμα μικρότερης ισχύος της τάξεως των 10 kW για εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες με σκοπό τη σταθεροποίηση της τάσης DC (“Cool Air DC”).

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, στο μέλλον αναμένεται η κατασκευή συστημάτων TACAS ισχύος μεταξύ 2-5 MW, χωρητικότητας 8-20 MWh και χρόνου αποφόρτισης μέχρι 4 ώρες για χρήση σε αιολικά πάρκα με σκοπό τη μετατόπιση φορτίων. Ωστόσο, το κόστος των υλικών για την κατασκευή της διάταξης αποθήκευσης θερμότητας για συστήματα αυτής της ισχύος είναι ιδιαίτερα υψηλό, γεγονός το οποίο καταδεικνύει τη δυσκολία διάθεσης του συστήματος σε λογικές τιμές. Συνεπώς, η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν προβλέπεται να βρει εφαρμογή με σκοπό την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. [15]



## **4. ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

### **4.1 Εισαγωγή**

Για περισσότερο από μία δεκαετία, το υδρογόνο, ως εναλλακτική λύση των παραδοσιακών πηγών ενέργειας όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, βρίσκεται στο επίκεντρο της ερευνητικής και αναπτυξιακής προσπάθειας σε όλες τις τεχνολογικά προηγμένες χώρες του κόσμου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην άποψη ότι το υδρογόνο μπορεί να βοηθήσει στην κάλυψη της αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης και να επιβραδύνει την παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Πράγματι, το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ποικίλες πηγές συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών καυσίμων, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και του νερού. Επιπλέον, είναι μη τοξικό και ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον καθώς το μόνο προϊόν της μετατροπής του σε ηλεκτρική ενέργεια -πέραν ελάχιστης ποσότητας οξειδίων του αζώτου που προκύπτουν κατά την καύση υδρογόνου σε υψηλές θερμοκρασίες- είναι το καθαρό νερό. Τέλος, το υδρογόνο παρουσιάζει κάποια μοναδικά χαρακτηριστικά τα οποία το καθιστούν ιδανικό ενεργειακό φορέα:

- ✓ η υψηλή ενεργειακή του πυκνότητα ανά μονάδα βάρους.
- ✓ η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο και αντίστροφα χαρακτηρίζεται από αρκετά υψηλή αποδοτικότητα.
- ✓ ως πρώτη ύλη για την παραγωγή του χρησιμοποιείται το νερό, που διατίθεται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη και ότι το προϊόν που προκύπτει από την αξιοποίηση του υδρογόνου (μέσω χημικής ή ηλεκτρολυτικής μετατροπής του) είναι το νερό ή ο ατμός, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αποτελεί ένα πλήρως ανανεώσιμο καύσιμο.
- ✓ μπορεί να αποθηκευθεί σε υγρή, αέρια και στερεά μορφή (μεταλλικά υδρίδια).
- ✓ η μεταφορά του μπορεί να γίνει σε μεγάλες αποστάσεις με δίκτυο αγωγών, ενώ σε μικρότερες αποστάσεις προβλέπεται μεταφορά του με φορτηγά, τρένα και δεξαμενόπλοια με το υδρογόνο σε υψηλή συμπίεση ή σε υγρή μορφή.
- ✓ έχει τη δυνατότητα μετατροπής σε άλλες μορφές ενέργειας με διάφορους τρόπους και πιο αποδοτικά από κάθε άλλο καύσιμο. Συγκεκριμένα, πέραν της καύσης, μετατροπή του υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί και με καταλυτική διάσπαση, ηλεκτρόλυση και φωτόλυση. [16], [17]

Όσον αφορά συγκεκριμένα στα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας με αποθήκευση υδρογόνου, αυτά συγκεντρώνουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- παρέχουν τη δυνατότητα εφαρμογής συστημάτων διαφορετικών μεγεθών, δηλαδή συστημάτων με ισχύ από 10 kW μέχρι και 1 GW.
- ο ρυθμός φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος, όπως και η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης, αποτελούν ανεξάρτητες μεταβλητές.
- η κατασκευή τους γίνεται σε επιμέρους μονάδες και παρέχεται η δυνατότητα προσθήκης νέων τμημάτων ή επαναδιαμόρφωσης παλαιών.
- είναι συστήματα φιλικά προς το περιβάλλον.

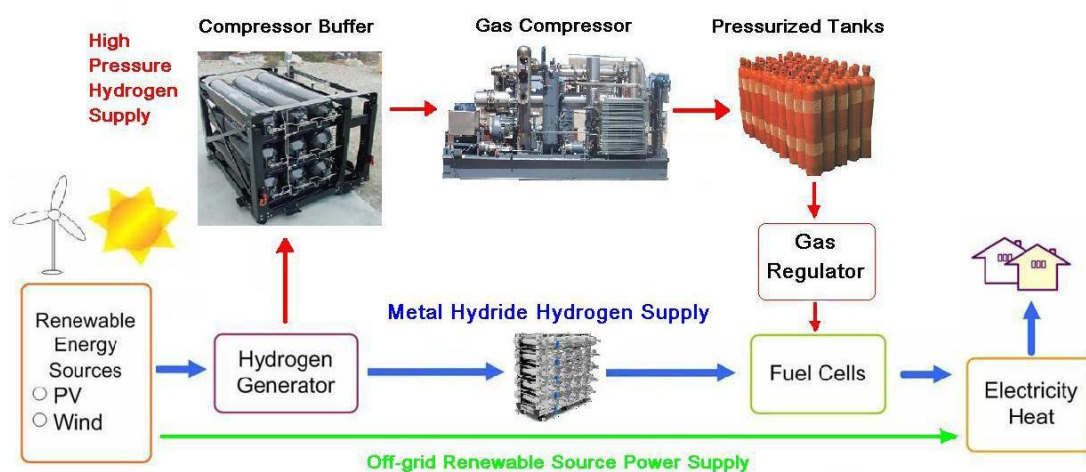
Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται στην παρούσα φάση από υψηλό κόστος και σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης (δεν ξεπερνά το 50%), μειονέκτημα το οποίο είναι πολύ πιο έντονο στην περίπτωση που η παραγωγή ενέργειας γίνεται με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης ή στροβίλου αντί κυψέλης καυσίμου. [13]

#### 4.2 Γενική περιγραφή του συστήματος - Αρχές λειτουργίας

Ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δυνατότητα αποθήκευσης υδρογόνου αποτελείται από τις εξής συνιστώσες: μία ηλεκτρολυτική μονάδα με εισόδους νερό και ηλεκτρική ενέργεια προς μετατροπή του νερού σε υδρογόνο, μία μονάδα καθαρισμού του υδρογόνου, μία συμβατική-ενδιάμεση δεξαμενή υδρογόνου (buffer tank) με σκοπό τη διευκόλυνση της λειτουργίας του συμπιεστή υδρογόνου που ακολουθεί και την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, έναν συμπιεστή υδρογόνου (εκτός και αν η αποθήκευση γίνεται στην πίεση εξόδου από την ηλεκτρολυτική μονάδα), μία μονάδα αποθήκευσης και τέλος, μία μονάδα μετατροπής του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια (κυψέλη καυσίμου ή M.E.K.). [13], [18]

Τα συστήματα αυτά λειτουργούν κατά τον ακόλουθο τρόπο: Σε διαστήματα χαμηλής ζήτησης, η περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας τροφοδοτεί τον ηλεκτρολύτη και αφού το παραγόμενο υδρογόνο συμπιεσθεί, καταλήγει στη μονάδα αποθήκευσης. Σε διαστήματα υψηλής ζήτησης, το αποθηκευμένο υδρογόνο οδηγείται προς τη μονάδα μετατροπής του προς ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό την παραγωγή κατάλληλου ποσού ενέργειας για την κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου. Σε περίπτωση που η διατιθέμενη στον

ηλεκτρολύτη ισχύς είναι υψηλότερη της ονομαστικής του ισχύος και ανεξαρτήτως του αν η δεξαμενή αποθήκευσης είναι πλήρως γεμισμένη, η περίσσεια απορρίπτεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη άλλων αναγκών, όπως η άντληση ή θέρμανση νερού χρήσης. Στη συνέχεια απεικονίζεται σχηματικά ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αποθήκευσης υδρογόνου:



Σχήμα 4.1. Σχηματική απεικόνιση υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας και αποθήκευσης υδρογόνου υπό αέρια μορφή [19]

### 4.3 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

#### 4.3.1 Μονάδα παραγωγής υδρογόνου (ηλεκτρολυτική διάταξη)

Η χρήση ηλεκτρολυτικού υδρογόνου ήταν ανέκαθεν περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής του, γεγονός το οποίο αποδίδεται στην κατανάλωση ισχύος από την ηλεκτρολυτική μονάδα. Ως εκ τούτου η χρήση του περιορίστηκε στη χημική βιομηχανία και δεν επεκτάθηκε σε ενεργειακές εφαρμογές. Ωστόσο, σε υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας με αποθήκευση υδρογόνου χρησιμοποιείται η περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας για την τροφοδοσία του ηλεκτρολύτη και την παραγωγή υδρογόνου, γεγονός το οποίο καθιστά το σύστημα ενδιαφέρον από οικονομικής απόψεως. Με σκοπό, μάλιστα, τη μεγιστοποίηση της ποσότητας του αποθηκευμένου υδρογόνου κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης ισχύος, επιδιώκεται η κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών. [20]

Οι εγκατεστημένες σε απομονωμένα δίκτυα ηλεκτρολυτικές μονάδες θα πρέπει να καλύπτουν δύο βασικές προϋποθέσεις, δηλαδή να χαρακτηρίζονται από μικρό χρόνο εκκίνησης που θα εξασφαλίζει την αποδοτική τους λειτουργία ακόμα και για μικρά χρονικά διαστήματα και να έχουν τη

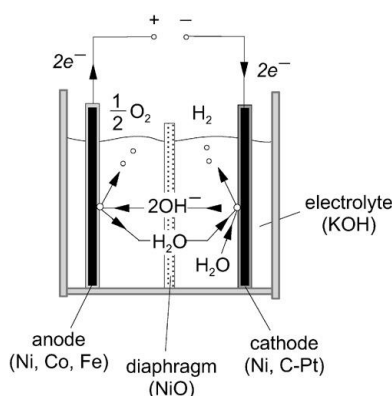
δυνατότητα εκκίνησης ακόμα και σε περίπτωση τροφοδοσίας τους με ρεύμα σχετικά χαμηλής ισχύος, γεγονός το οποίο θα τους επιτρέψει να παράγουν υδρογόνο κάθε φορά που εμφανίζεται έστω και μικρή περίσσεια παραγόμενης ενέργειας. Η πρώτη προϋπόθεση, ωστόσο, είναι δευτερευούσης σημασίας λόγω της δυνατότητας για πρόβλεψη του φορτίου και των καιρικών φαινομένων.

Τα μόνα είδη ηλεκτρολυτικών διατάξεων που ικανοποιούν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις είναι οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες και οι μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων PEM, οι οποίοι όμως χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλό κόστος κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει μαζική παραγωγή για μονάδες μέσης ισχύος. Όσον αφορά στο επίπεδο ανάπτυξης της κάθε τεχνολογίας, οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες αποτελούν μία ώριμη τεχνολογία σε αντίθεση με τους ηλεκτρολύτες PEM, οι οποίοι βασίζονται σε πολύ πρόσφατη τεχνολογία με αποτέλεσμα να μην είναι ακόμα διαθέσιμες στην αγορά διατάξεις μέσης και μεγάλης ισχύος (διαθεσιμότητα μόνο πιλοτικών διατάξεων με παραγωγή υδρογόνου έως και 10-20 Nm<sup>3</sup>/h). [21]

#### 4.3.1.1 Αλκαλικοί ηλεκτρολύτες

##### Αρχές λειτουργίας

Κατά την ηλεκτρόλυση σε αλκαλικούς ηλεκτρολύτες, η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο επιτυγχάνεται με τη διέλευση dc ρεύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων του ηλεκτρολυτικού κελιού, τα οποία είναι βυθισμένα σε ηλεκτρολύτη καλής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα, δύο μόρια νερού με την πρόσληψη δύο ηλεκτρονίων από το κύκλωμα διασπώνται σε ένα μόριο υδρογόνου H<sub>2</sub> και δύο ιόντα υδροξυλίου OH<sup>-</sup> στο ηλεκτρόδιο της καθόδου. Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης αντίδρασης απαιτείται η εφαρμογή κάποιας ελάχιστης τάσης στα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου, η οποία προσδιορίζεται από τη μεταβολή της ενέργειας Gibbs. [22], [23]



Σχήμα 4.2. Αρχές λειτουργίας αλκαλικού ηλεκτρολύτη. [23]

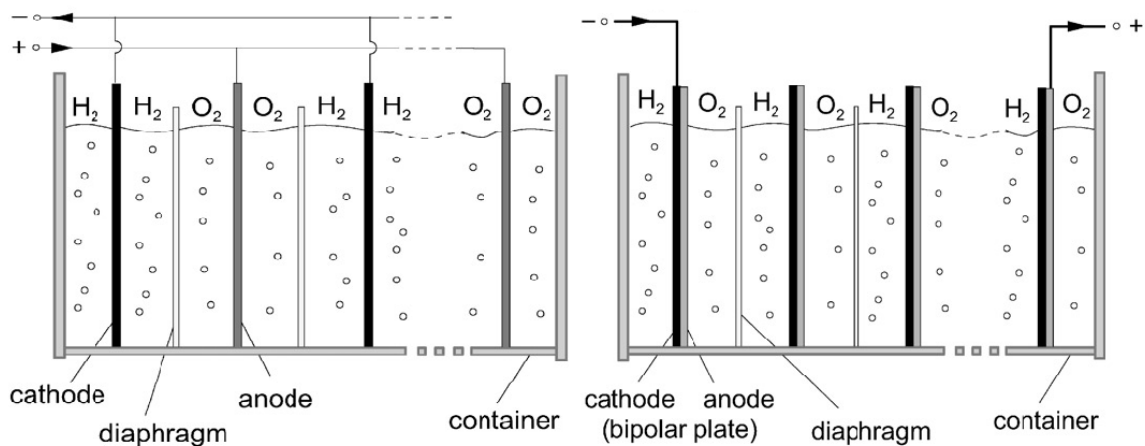
Το υδρογόνο διαφεύγει σε αέρια μορφή από την επιφάνεια της καθόδου και τα ιόντα υδροξυλίου διαπερνούν το πορώδες διάφραγμα και κινούνται προς την άνοδο κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που έχει αναπτυχθεί μεταξύ καθόδου και ανόδου. Στο ηλεκτρόδιο της ανόδου, τα δύο ιόντα του υδροξυλίου διασπώνται σε μισό μόριο οξυγόνου, το οποίο εν συνεχεία διαφεύγει σε αέρια μορφή από την επιφάνεια της ανόδου, και ένα μόριο νερού, ενώ ταυτόχρονα αποδίδονται και δύο ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα. [22], [23]

#### Κατασκευαστικά στοιχεία και λειτουργικά χαρακτηριστικά

Όσον αφορά στα κατασκευαστικά στοιχεία των συμβατικών αλκαλικών ηλεκτρολυτικών διατάξεων, αυτές χρησιμοποιούν υδροξείδιο του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτη (25-35% κατά βάρος διάλυμα σε νερό). Η περιεκτικότητα του ηλεκτρολύτη σε υδροξείδιο του καλίου κυμαίνεται σε αυτό το εύρος συγκέντρωσης καθότι στην περιοχή αυτή επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόδια πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή στη διάβρωση, καλή αγωγιμότητα και καταλυτικές ιδιότητες, ενώ το διάφραγμα από χαμηλή αντίσταση. Ως εκ τούτου επιλέγεται νικέλιο, κοβάλτιο ή σίδηρος για την κατασκευή του ηλεκτροδίου της ανόδου, νικέλιο με καταλύτη πλατίνας-ενεργού άνθρακα για το ηλεκτρόδιο της καθόδου και άσβεστος ή οξειδίο νικελίου ως υλικό του διαφράγματος. Οι αλκαλικές ηλεκτρολυτικές διατάξεις παρουσιάζουν τα ακόλουθα λειτουργικά χαρακτηριστικά:

- ✓ θερμοκρασία λειτουργίας που κυμαίνεται μεταξύ 70-90°C
- ✓ ατμοσφαιρική πίεση (εκτός της ηλεκτρολυτικής διάταξης της εταιρίας Lurgi, όπου η ηλεκτρόλυση γίνεται στις 30 atm)
- ✓ εφαρμοζόμενη τάση για τη διεξαγωγή της ηλεκτρόλυσης που κυμαίνεται μεταξύ 1,84-2,25V
- ✓ πυκνότητα ρεύματος: 0,13-0,23 A/cm<sup>2</sup>
- ✓ κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή των 4,3-4,9 kWh/Nm<sup>3</sup> υδρογόνου
- ✓ βαθμό απόδοσης που ανέρχεται περίπου στο 80%. [23], [24]

Αναφορικά με τους τρόπους διάταξης και σύνδεσης των κελιών σε μία μονάδα ηλεκτρόλυσης, εμφανίζονται δύο πιθανές επιλογές: ο μονοπολικός και ο διπολικός. Στην πρώτη περίπτωση, τα θετικά ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους, ενώ το ίδιο ισχύει και για τα αρνητικά. Αντίθετα, στους διπολικούς ηλεκτρολύτες τα κελιά είναι συνδεδεμένα τόσο γεωμετρικά όσο και ηλεκτρικά σε σειρά.



Σχήμα 4.3. Μονοπολική και διπολική διάταξη αλκαλικού ηλεκτρολύτη [23]

Ένα πλεονέκτημα των διπολικών συστοιχιών είναι ότι είναι πιο συμπαγείς από τις μονοπολικές με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών λόγω της ωμικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη και άρα την αύξηση του βαθμού απόδοσής του. Επίσης, οι διπολικές συστοιχίες πλεονεκτούν στην εξοικονόμηση χώρου και ηλεκτρικών ζυγών, στοιχεία που είναι σημαντικά για εγκαταστάσεις μεγάλης ονομαστικής ισχύος. Από την άλλη πλευρά, τα διπολικά κελιά εμφανίζουν παρασιτικά ρεύματα που προκαλούν προβλήματα διάβρωσης. Ενώ οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες ατμοσφαιρικής πίεσης είναι μονοπολικοί, οι ηλεκτρολύτες υψηλής πίεσης κατασκευάζονται με την διπολική διάταξη. Οι διπολικοί ηλεκτρολύτες απαιτούν εκλεπτυσμένο και σύνθετο σχεδιασμό και κατασκευή με συνέπεια να χαρακτηρίζονται από υψηλότερα κατασκευαστικά κόστη σε σχέση με τους μονοπολικούς. Παρόλα αυτά, σήμερα οι περισσότεροι εμπορικοί αλκαλικοί ηλεκτρολύτες είναι διπολικοί. [22], [23]

Συνοψίζοντας, οι συμβατικές ηλεκτρολυτικές διατάξεις παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής τους και του πλήθους των εφαρμογών τους, ωστόσο χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα ρεύματος και από χαμηλούς βαθμούς απόδοσης.

Με σκοπό, λοιπόν, την αντιμετώπιση των παραπάνω αρνητικών στοιχείων των συμβατικών ηλεκτρολυτικών διατάξεων, αναπτύχθηκαν οι εξελιγμένοι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες (advanced alkaline electrolytes). Οι ηλεκτρολυτικές αυτές διατάξεις χρησιμοποιούν υδροξείδιο του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτη (25-40% κατά βάρος διάλυμα σε νερό), ενεργό νικέλιο για την κατασκευή του ηλεκτροδίου της ανόδου και της καθόδου και έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- ✓ θερμοκρασία λειτουργίας που κυμαίνεται μεταξύ 90-145°C



- ✓ πίεση λειτουργίας που φτάνει μέχρι και 120 bar
- ✓ εφαρμοζόμενη τάση για τη διεξαγωγή της ηλεκτρόλυσης που κυμαίνεται μεταξύ 1,5-3,0V
- ✓ πυκνότητα ρεύματος: 0,2-2,0 A/cm<sup>2</sup>
- ✓ κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή των 3,8-4,3 kWh/Nm<sup>3</sup> υδρογόνου
- ✓ βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 80-90%. [24], [25]

Στους εξελιγμένους αλκαλικούς ηλεκτρολύτες έχει επιτευχθεί μείωση της τάσης λειτουργίας του ηλεκτρολυτικού κελιού, ενώ παράλληλα η πυκνότητα του ρεύματος παρουσιάζεται αυξημένη σε σχέση με τους συμβατικούς αλκαλικούς ηλεκτρολύτες. Η μείωση της τάσης λειτουργίας συνεπάγεται μείωση του μοναδιαίου κόστους ηλεκτρικής ισχύος και ως εκ τούτου του κόστους λειτουργίας, ενώ η αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος οδηγεί σε μείωση του κόστους επένδυσης. Ωστόσο, η αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος οδηγεί σε αύξηση της ωμικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη λόγω έντονης εμφάνισης φυσαλίδων όπως και σε αύξηση των υπερδυναμικών ανόδου και καθόδου.

Συνοπτικά, οι τρεις βασικές βελτιώσεις που παρατηρούνται σε έναν εξελιγμένο αλκαλικό ηλεκτρολύτη είναι οι εξής:

- νέα διαμόρφωση του ηλεκτρολυτικού κελιού με σκοπό τη μείωση της επιφανειακής ειδικής αντίστασης παρά την αυξημένη πυκνότητα ρεύματος (π.χ. κελιά μηδενικού κενού, διαφράγματα χαμηλής αντιστάσεως). Στα κελιά μηδενικού κενού τα υλικά των ηλεκτροδίων συμπιέζονται εκατέρωθεν του διαφράγματος ούτως ώστε το υδρογόνο και το οξυγόνο να οδηγούνται να εγκαταλείψουν τα ηλεκτρόδια από την πίσω πλευρά. Η πλειοψηφία, μάλιστα, των κατασκευαστών έχει υιοθετήσει τη συγκεκριμένη διαμόρφωση.

- αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας (μέχρι και 160°C) επιδιώκοντας τη μείωση της αντίστασης του κελιού και ως εκ τούτου την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη.

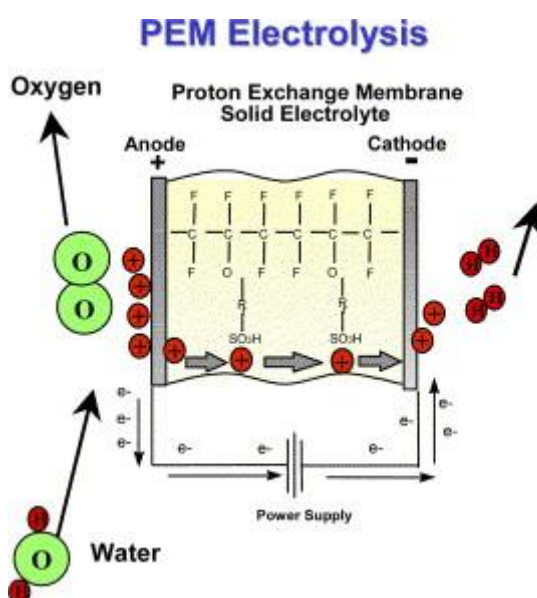
- ανάπτυξη νέων ηλεκτροκαταλυτών με σκοπό τη μείωση των υπερδυναμικών ανόδου και καθόδου (π.χ. επίχριση του ηλεκτροδίου της ανόδου με μίγμα μετάλλων μεταξύ των οποίων θα περιλαμβάνεται και οξειδίο του κοβαλτίου και του ηλεκτροδίου της καθόδου με νικέλιο Raney). [23]

Τέλος, οι εξελιγμένοι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες πέραν των πλεονεκτημάτων τους παρουσιάζουν και τα ακόλουθα μειονεκτήματα: καταρχήν, εμφανίζονται προβλήματα διάβρωσης και επιπλέον ο βαθμός απόδοσης, αν και αυξημένος συγκριτικά με τους συμβατικούς ηλεκτρολύτες, είναι μικρότερος σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης. [24]

#### 4.3.1.2 PEM ηλεκτρολύτες

##### Αρχές λειτουργίας

Κατά την ηλεκτρόλυση σε PEM ηλεκτρολύτες, η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο επιτυγχάνεται ως εξής: το νερό διασπάται σε οξυγόνο, πρωτόνια (κατιόντα υδρογόνου) και ηλεκτρόνια στο ηλεκτρόδιο της ανόδου υπό την επίδραση dc τάσης υψηλότερης των 1,482 V. Τα πρωτόνια διαπερνούν τη μεμβράνη του στερεού πολυμερούς ηλεκτρολύτη και οδηγούνται προς την κάθοδο, όπου σε συνδυασμό με ηλεκτρόνια του κυκλώματος σχηματίζουν μόρια υδρογόνου. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα διερχόμενα διαμέσου της μεμβράνης πρωτόνια συμπαρασύρουν λόγω ηλεκτροώσμωσης μόρια νερού από το ηλεκτρόδιο της ανόδου προς αυτό της καθόδου. [26]



Σχήμα 4.4. Αρχές λειτουργίας PEM ηλεκτρολύτη [26]

##### Κατασκευαστικά στοιχεία και λειτουργικά χαρακτηριστικά

Όσον αφορά στα κατασκευαστικά στοιχεία των PEM ηλεκτρολυτικών διατάξεων, αυτές χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη μία πολυμερή μεμβράνη στερεής μορφής. Το υλικό κατασκευής της μεμβράνης είναι το Nafion<sup>TM</sup>, το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρεία DuPont και είναι κοινό για τις μεμβράνες των PEM κυψελών καυσίμου. Η χρήση της συγκεκριμένης μεμβράνης προτάθηκε αρχικά από την General Electric για εφαρμογή σε κυψέλες καυσίμου και αργότερα χρησιμοποιήθηκε σε ηλεκτρολυτικές διατάξεις, οι οποίες αναπτύχθηκαν ιδιαίτερα κατά τις δεκαετίες του '70 και '80 από την ελβετική εταιρεία ABB. [22] Παρότι, όμως, η αρχή λειτουργίας είναι αντίστροφη από αυτή των αντίστοιχων κυψελών καυσίμου, τα υλικά που

χρησιμοποιούνται για τη συγκρότηση των PEM ηλεκτρολυτικών διατάξεων πέραν της μεμβράνης δεν είναι τα ίδια με αυτά των PEM κυψελών λόγω διάβρωσης. [26] Συγκεκριμένα, το ηλεκτρόδιο της ανόδου κατασκευάζεται από πορώδες τιτάνιο ενώ ως καταλυτικό υλικό χρησιμοποιείται μίγμα οξειδίων ευγενών μετάλλων. Όσον αφορά στο ηλεκτρόδιο της καθόδου, αυτό κατασκευάζεται από πορώδη γραφίτη με τον καταλύτη να κατασκευάζεται είτε από λευκόχρυσο (Pt) είτε, σε πιο πρόσφατες διατάξεις, από μίγμα οξειδίων. Οι ηλεκτρολυτικές διατάξεις PEM παρουσιάζουν τα ακόλουθα λειτουργικά χαρακτηριστικά:

- ✓ θερμοκρασία λειτουργίας που κυμαίνεται μεταξύ 80-150°C
- ✓ πίεση λειτουργίας που φτάνει μέχρι και στα 400 bar
- ✓ εφαρμοζόμενη τάση για τη διεξαγωγή της ηλεκτρόλυσης που κυμαίνεται μεταξύ 1,4-2,0V
- ✓ πυκνότητα ρεύματος: 1,0-40 A/cm<sup>2</sup>
- ✓ κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή των 0,5-10 kWh/Nm<sup>3</sup> υδρογόνου
- ✓ βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 80-90%. [22], [25]

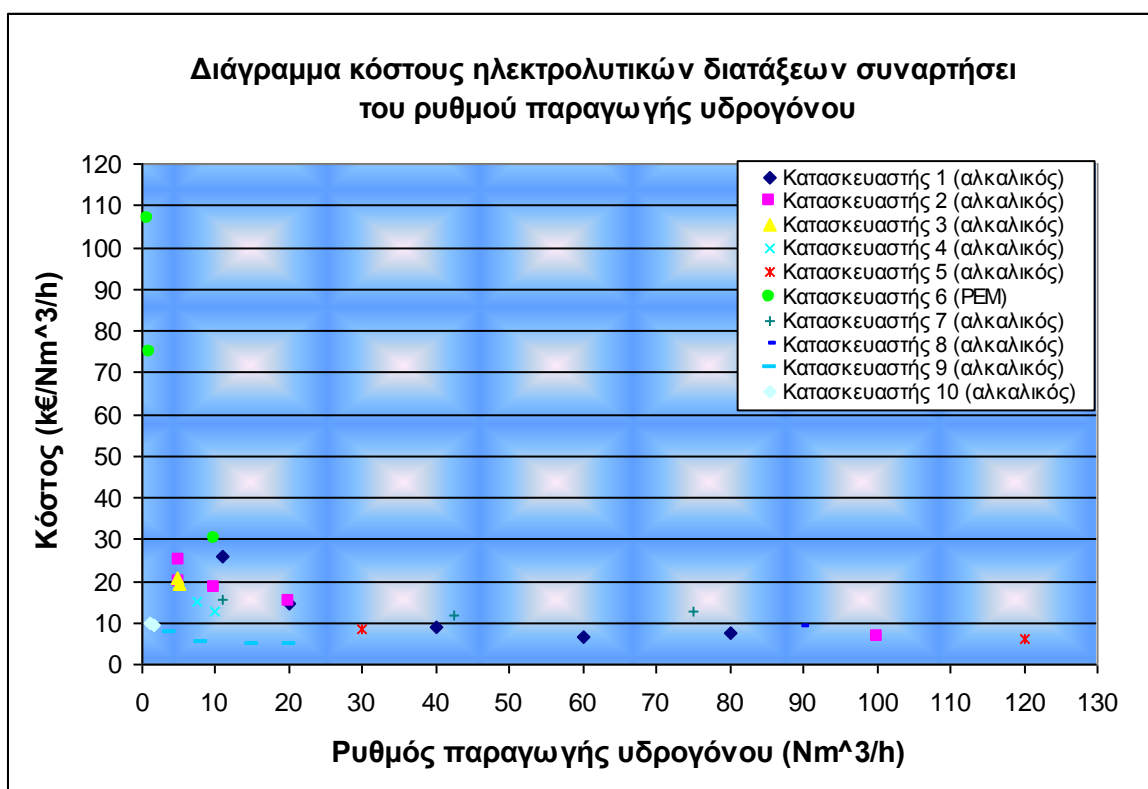
Αναφορικά με τον τρόπο διάταξης και σύνδεσης των ηλεκτρολυτικών κελιών, τα επιμέρους κελιά συνδέονται διπολικά, δηλαδή σε σειρά τόσο γεωμετρικά όσο και ηλεκτρικά, με πλάκα διαχωρισμού από γραφίτη. [22]

Ένα πολύ σημαντικό λειτουργικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι PEM ηλεκτρολύτες είναι ότι η πίεση εξόδου του υδρογόνου σε αυτές τις ηλεκτρολυτικές διατάξεις είναι πολύ μεγάλη (έως και 400bar) με αποτέλεσμα να είναι περιττή η ύπαρξη αντλιών και συμπιεστών. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται καταρχήν η κατανάλωση πολύ μεγάλων ποσοτήτων ωφέλιμης ενέργειας που έχουν ως αποτέλεσμα την πτώση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, ενώ επιπλέον διασφαλίζεται η αξιοπιστία του συστήματος λόγω της μη προσθήκης πολλών κινουμένων μερών σε αυτό. Επίσης, παρέχουν υψηλότερο βαθμό ασφάλειας και αξιοπιστίας καθότι δεν κυκλοφορεί στα κελιά καυστικός ηλεκτρολύτης όπως στις αλκαλικές ηλεκτρολυτικές διατάξεις. Τέλος, οι PEM ηλεκτρολύτες είναι πιο αποτελεσματικοί στην αποτροπή της ανάμιξης των αερίων προϊόντων της ηλεκτρόλυσης, παρουσιάζουν τη δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος και χαρακτηρίζονται από ευκολότερη συντήρηση. Ωστόσο, η χρήση τέτοιου είδους ηλεκτρολυτών απαιτεί υψηλή καθαρότητα του νερού (1μSiemens με 5μSiemens να είναι η απαιτούμενη καθαρότητα του νερού για αλκαλικούς ηλεκτρολύτες) και παρουσιάζει το επιπλέον μειονέκτημα

ότι δεν υπάρχει μεγάλη εμπειρία εφαρμογών. Τέλος, ο περιορισμένος αριθμός κατασκευαστών των συγκεκριμένων ηλεκτρολυτικών διατάξεων σε συνδυασμό με τη σχετικά μικρή χρονική διάρκεια της εγγύησης που αυτοί παρέχουν έχει οδηγήσει στην επιλογή αλκαλικών ηλεκτρολυτών για χρήση σε εφαρμογές μεσαίας και μεγάλης κλίμακας. [21], [22]

#### 4.3.1.3 Κόστος ηλεκτρολυτικών διατάξεων

Τέλος, όσον αφορά στο κόστος των ηλεκτρολυτικών διατάξεων, οι εταιρείες κατασκευής τους προβλέπουν ότι το τελικό κόστος των αλκαλικών ηλεκτρολυτικών διατάξεων για εφαρμογή σε υβριδικούς σταθμούς αποκεντρωμένων συστημάτων θα ανέρχεται στα 8150 €/Nm<sup>3</sup>/h. Αντιστοίχως, το κόστος των PEM ηλεκτρολυτών θα είναι κατά 30% μεγαλύτερο εκτός και αν η ανάπτυξη της τεχνολογίας μειώσει το τελικό κόστος παραγωγής τους. Εν συνεχεία ακολουθεί διάγραμμα που απεικονίζει το κόστος των διατάξεων ηλεκτρόλυσης διαφόρων κατασκευαστών συναρτήσει του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου: [21]



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα κόστους ηλεκτρολυτικών διατάξεων συναρτήσει του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου [21]

#### 4.3.2 Μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του US Department of Energy (DOE), οι μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες: α) φυσικές και β) χημικές μέθοδοι αποθήκευσης. Οι φυσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου και υδρογόνου υπό τη μορφή συμπιεσμένου αερίου, ενώ οι χημικές μέθοδοι αφορούν στην αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια, ζεόλιθους, ανθρακικά νανο-υλικά, σπογγώδη σίδηρο, αμμωνία, μεθανόλη και κ.ο.κ.

##### 4.3.2.1 Αποθήκευση υδρογόνου υπό μορφή συμπιεσμένου αερίου

Η απλούστερη και πιο κοινή μέθοδος είναι η αποθήκευση του υδρογόνου υπό τη μορφή συμπιεσμένου αερίου σε χαλύβδινες φιάλες (κύλινδροι) με χωρητικότητα που κυμαίνεται μεταξύ 12-50 λίτρων. Τυπικές θερμοκρασίες αποθήκευσης είναι από -50 μέχρι και 60°C, ενώ η πίεση αποθήκευσης ανέρχεται συνήθως μέχρι και τα 200 bar. Ωστόσο, η κατά μάζα περιεκτικότητα σε υδρογόνο δεν ξεπερνά το 2-3% ακόμα και για τις φιάλες μεγάλου μεγέθους. [21] Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι κύλινδροι έχουν χωρητικότητα 40 L και βάρος 50 kg, ενώ ο όγκος του αποθηκευμένου υδρογόνου ανέρχεται στα 8 Nm<sup>3</sup> και το βάρος του στα 0,7 kg επιτυγχάνοντας κατά μάζα περιεκτικότητα σε υδρογόνο 1,4 wt% H<sub>2</sub>. [27]

Όσον αφορά στην ανάπτυξη των υλικών κατασκευής των φιαλών αποθήκευσης, εκεί σημειώθηκε σημαντική πρόοδος από τα μέσα της δεκαετίας του '70 οπότε και προωθήθηκε η χρήση ελαφρύτερων υλικών για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αναλυτικότερα, κατασκευάστηκαν φιάλες που αποτελούνται από ένα λεπτό κέλυφος αλουμινίου ή πλαστικού με εξωτερική επίχριση από συνθετικό πλαστικό και το εξωτερικό τους είναι καλυμμένο με ένα περίβλημα από φάιμπεργκλας. Οι φιάλες αυτές είναι πλέον εμπορικά διαθέσιμες και επιτρέπουν την επίτευξη πιέσεων της τάξεως των 350 bar. Επιπλέον βελτιώσεις στα υλικά και το σχεδιασμό (π.χ. αντικατάσταση του φάιμπεργκλας με ανθρακονήματα) επιτρέπουν την κατασκευή εξελιγμένων φιαλών με δυνατότητα αποθήκευσης σε πιέσεις που φτάνουν τα 690 bar. Αυτές οι δεξαμενές είναι πολύ ελαφριές, μικρές σε όγκο, απολύτως ασφαλείς αλλά βασικό μειονέκτημά τους είναι η υψηλή τιμή κτήσης τους μιας και δεν είναι σε μαζική παραγωγή. [21] Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι η αύξηση της πίεσης αποθήκευσης συνεπάγεται ελάττωση του όγκου που καταλαμβάνουν οι φιάλες, ενώ από την άλλη πλευρά αυξάνεται το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης. [19]

Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, η χρήση συμπιεστή υδρογόνου είναι αναπόφευκτη. Η εισαγωγή

της επιπλέον αυτής συνιστώσας στο σύστημα συνεπάγεται, πέραν της αύξησης του κόστους επένδυσης για την αγορά της συγκεκριμένης μονάδας, και αύξηση του κόστους λειτουργίας.

Τέλος, όσον αφορά στους κανονισμούς ασφαλείας, αυτοί είναι πολύ αυστηροί για τη συγκεκριμένη μέθοδο αποθήκευσης και η ικανοποίηση αυτών πολλές φορές συνεπάγεται κόστος μεγαλύτερο του κόστους αγοράς του εξοπλισμού παραγωγής και αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου. [19]

#### 4.3.2.2 Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή

Η τεχνολογία υγροποίησης του υδρογόνου και αποθήκευσης αυτού στην υγρή του μορφή είναι πολύ ανεπτυγμένη, γεγονός το οποίο οφείλεται στη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα που έχει το υδρογόνο σε αυτή τη μορφή. Η αποθήκευση του υγρού υδρογόνου γίνεται σε κρυογενικές δεξαμενές, οι οποίες στην πλειοψηφία έχουν σφαιρικό ή κυλινδρικό σχήμα με σκοπό τη μείωση της εξωτερικής τους επιφάνειας και συνεπώς του συναλλασσόμενου ποσού θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον. Επιπρόσθετα, στις περισσότερες περιπτώσεις οι δεξαμενές αυτές φέρουν διπλό τοίχωμα με περλίτη να χρησιμοποιείται ως υλικό πληρώσεως του κενού μεταξύ των δύο τοιχωμάτων. [28]



Σχήμα 4.6. Σφαιρική κρυογενική δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου [19]

Οι συνήθεις δεξαμενές αποθήκευσης υγρού υδρογόνου καταλαμβάνουν όγκο 50-70L και έχουν βάρος που κυμαίνεται μεταξύ 90 και 150kg. Όσον αφορά

στον όγκο αποθήκευσης, αυτός ανέρχεται στα 130L με ενεργειακή πυκνότητα 3,8 MJ/L και κατά μάζα περιεκτικότητα σε υδρογόνο 3,9 wt%. [27]

Όσον αφορά στη μέθοδο υγροποίησης του υδρογόνου, η απλούστερη είναι ο κύκλος Linde ή κύκλος εκτόνωσης Joule-Thompson. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το αέριο υδρογόνο συμπιέζεται και ψύχεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας και εν συνεχεία οδηγείται σε μία στραγγαλιστική βαλβίδα όπου υφίσταται ισενθαλπική εκτόνωση με την παραγωγή μίας ποσότητας υγρού. Ακολουθεί διαχωρισμός του υγρού υδρογόνου από το αέριο, το οποίο στο επόμενο στάδιο οδηγείται και πάλι στον συμπιεστή αφού διέλθει από έναν εναλλάκτη θερμότητας. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι κατά τον κύκλο Joule-Thompson αέρια, όπως το άζωτο, με θερμοκρασία αντιστροφής υψηλότερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ψύχονται κατά την εκτόνωσή τους. Ωστόσο, το υδρογόνο σε κανονικές συνθήκες θερμαίνεται κατά τη διέλευσή του από τη στραγγαλιστική βαλβίδα. Συνεπώς, για να επιτευχθεί ψύξη του υδρογόνου κατά την εκτόνωση, απαιτείται ψύξη αυτού σε θερμοκρασία χαμηλότερη της θερμοκρασίας αντιστροφής του (202K). Το υδρογόνο συνήθως ψύχεται με τη βοήθεια υγρού αζώτου (78K) πριν οδηγηθεί στην στραγγαλιστική διάταξη. [29]

Πέραν του πλεονεκτήματος της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου σε υγρή μορφή, η μέθοδος αποθήκευσης υγρού υδρογόνου παρουσιάζει τα παρακάτω σημαντικά μειονεκτήματα: [28]

✓ το βασικότερο πρόβλημα συνοψίζεται στο γεγονός ότι η υγροποίηση του υδρογόνου είναι μία διαδικασία σημαντικά ενεργοβόρα (κατανάλωση περίπου του 30% της κατωτέρου θερμογόνου ικανότητας (LHV)). Ως εκ τούτου απαιτείται η ανάπτυξη νέων μεθόδων που θα αποσκοπούν στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του κόστους της διεργασίας αυτής. [28]

✓ το δεύτερο μειονέκτημα προκύπτει ως συνέπεια του πρώτου και αφορά στην πολυπλοκότητα κατασκευής και το υψηλό κόστος που χαρακτηρίζει τους σταθμούς υγροποίησης του υδρογόνου. [21]

✓ ένα επιπλέον μείζον μειονέκτημα της παρούσας μεθόδου αποθήκευσης αποτελεί η απώλεια ποσότητας υδρογόνου λόγω της εξάτμισης αυτού. Οι παραπάνω απώλειες οφείλονται στην απαίτηση για διατήρηση σταθερής πίεσης και ανέρχονται σε 0,1% του περιεχόμενου υδρογόνου ημερησίως σε δεξαμενές μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, τιμή η οποία μοιάζει αρκετά χαμηλή. Ωστόσο, το μέγεθος των απωλειών εξάτμισης είναι σημαντικό για εφαρμογές σε αποκεντρωμένα συστήματα, διότι εκεί, όπου το υδρογόνο καλύπτει για παράδειγμα τις εποχιακές ανάγκες ενεργειακής αποθήκευσης, οι

συσσωρευμένες απώλειες εξάτμισης μπορούν να μειώσουν τη συνολική ενεργειακή απόδοση απαιτώντας αύξηση της ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου και της χωρητικότητας των δεξαμενών αποθήκευσης. [21]

✓ μικρό χρόνο αποθήκευσης λόγω των αναπτυσσόμενων απωλειών εξάτμισης. [27]

✓ η χρήση μόνωσης, που αποσκοπεί στη διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα (θερμοκρασία μικρότερη των 20K), προκαλεί κινδύνους που σχετίζονται με αυτήν τη σταθερά χαμηλή θερμοκρασία και συγκεκριμένα αύξηση του λόγου επέκτασης (όγκος που καταλαμβάνει μία συγκεκριμένη ποσότητα υδρογόνου σε υγρή μορφή προς τον όγκο που καταλαμβάνει η ίδια ποσότητα σε αέρια μορφή). Πιθανή θέρμανση του υγρού υδρογόνου θα προκαλούσε ανάπτυξη πολύ υψηλών πιέσεων με αποτέλεσμα την καταστροφή της δεξαμενής ή ακόμα και έκρηξη. [21], [30]

Ο συνδυασμός των παραπάνω μειονεκτημάτων αποκλείει τη συγκεκριμένη μέθοδο αποθήκευσης υδρογόνου για εφαρμογές σε αποκεντρωμένα συστήματα. Η αποθήκευση του υδρογόνου σε υγρή μορφή προωθείται μόνο σε περιπτώσεις όπου η επίτευξη μέγιστης αποθηκευτικής πυκνότητας κρίνεται απολύτως απαραίτητη, όπως σε αεροπορικές εφαρμογές. [17], [21]

#### 4.3.2.3 Αποθήκευση υδρογόνου σε στερεή μορφή

Η μόνη εμπορικά διαθέσιμη χημική μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου είναι η αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια χαμηλής θερμοκρασίας απελευθέρωσης υδρογόνων. Πέραν αυτών, υπάρχουν και άλλες πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες αποθήκευσης σε μεταλλικά υδρίδια, όπως η αποθήκευση σε υδρίδια βαναδίου και μαγνησίου. Ωστόσο, αυτές βρίσκονται προς το παρόν σε στάδιο έρευνας και ανάπτυξης με βασικά προβλήματα προς αντιμετώπιση να αποτελούν η επίτευξη των επιδιωκόμενων συνθηκών φόρτισης και αποφόρτισης σε λογικές θερμοκρασίες και πιέσεις, η ασφάλεια και η αποφυγή φαινομένων αποσάθρωσης του υλικού κατά τους συνεχείς κύκλους υδρογόνωσης και αφυδρογόνωσής του.

Όσον αφορά στην αποθήκευση υδρογόνου σε ανθρακικά υλικά, η μέθοδος αυτή ήταν πολλά υποσχόμενη στα τέλη της δεκαετίας του 1990, ωστόσο πρόσφατες έρευνες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι χαρακτηρίζεται από μικρή αποθηκευτική ικανότητα. Επιπρόσθετα, η αποθήκευση σε ανθρακικά υλικά βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και απέχει αρκετά από τη διάθεσή της στην αγορά λόγω του γεγονότος ότι απαιτείται η παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων υδρογόνου, για να αποκτήσει η μέθοδος αυτή πρακτική σημασία.



Επιπλέον επιλογές για την αποθήκευση υδρογόνου αποτελούν η αποθήκευση αυτού σε αμμωνία ή μεθανόλη, καθότι και οι δύο ενώσεις περιλαμβάνουν το υδρογόνο στο μόριό τους. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες μέθοδοι αποθήκευσης αποκλείονται για εφαρμογές σε αποκεντρωμένα συστήματα λόγω των απαιτούμενων σταθμών παραγωγής και αναμόρφωσης των ενώσεων, που χαρακτηρίζονται από απαγορευτικά υψηλή ενεργειακή κατανάλωση, πολυπλοκότητα και κόστος. [21]

Τέλος, κατά την τελευταία δεκαετία έχουν εκπονηθεί πολυάριθμες μελέτες με σκοπό την αποθήκευση υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα, δηλαδή μικροσκοπικών σωλήνων πάχους 2nm, οι οποίοι αποθηκεύουν το υδρογόνο στο εσωτερικό των σωλήνων και σε μικροσκοπικούς πόρους στην επιφάνεια αυτών. Εμφανίζοντας παρόμοιο μηχανισμό δέσμευσης και απελευθέρωσης υδρογόνου με τα μεταλλικά υδρίδια, οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης σημαντικού όγκου υδρογόνου. Εντούτοις, το ποσό αποθήκευσης και ο μηχανισμός αποθήκευσης του υδρογόνου δεν είναι ακόμα καθορισμένοι με σαφήνεια. [31]

#### ✓ Κατηγορίες μεταλλικών υδριδίων

Εκτός από τα καθαρά μέταλλα, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί και σε διάφορα μεταλλικά κράματα, τα οποία αποτελούνται μέχρι και από δύο καθαρά μεταλλικά στοιχεία. Όσον αφορά στα υδρίδια που προκύπτουν από τη ρόφηση υδρογόνου σε καθαρά μέταλλα, αυτά εμπεριέχουν διαμεταλλικές ενώσεις, οι οποίες αποτελούνται από δύο στοιχεία. Το στοιχείο A είναι συνήθως σπάνια ή αλκαλική γαία, ενώ το στοιχείο B είναι συνήθως μέταλλο μεταπτώσεως και στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται το νικέλιο λόγω του γεγονότος ότι δρα ως εξαιρετικός καταλύτης κατά τη διάσπαση του μοριακού υδρογόνου στα άτομα που το αποτελούν. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι σημαντικότερες οικογένειες μεταλλικών υδριδίων καθαρών μεταλλικών στοιχείων: [21], [32]

Διαμεταλλική ένωση	Πρότυπο	Υδρίδιο	Δομή
AB <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	Εξαγωνική
AB <sub>2</sub>	ZrV <sub>2</sub> , ZrMn <sub>2</sub> , TiMn <sub>2</sub>	ZrV <sub>2</sub> H <sub>5.5</sub>	Εξαγωνική ή κυβική
AB <sub>3</sub>	CeNi <sub>3</sub> , YFe <sub>3</sub>	CeNi <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	Εξαγωνική
A <sub>2</sub> B <sub>7</sub>	Y <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub> , Th <sub>2</sub> Fe <sub>7</sub>	Y <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub> H <sub>3</sub>	Εξαγωνική

$A_6B_{23}$	$Y_6Fe_{23}$	$Ho_6Fe_{23}H_{12}$	Κυβική
AB	TiFe	TiFeH <sub>2</sub>	Κυβική
$A_2B$	Mg Ni, Ti <sub>2</sub> Ni	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	Κυβική

Πίνακας 4.1. Σημαντικές οικογένειες μεταλλικών υδριδίων καθαρών μετάλλων. [32]

Αναφορικά με τα μεταλλικά υδρίδια που προκύπτουν από τη ρόφηση του υδρογόνου σε μεταλλικά κράματα, αυτά ονομάζονται υδρίδια μεταλλικών συμπλόκων και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) αυτά που συγκροτούνται από το συνδυασμό υδρογόνου και διαφόρων μετάλλων μεταπτώσεως, β) αυτά που συγκροτούνται από συνδυασμό υδρογόνου και μετάλλων μη μεταπτώσεως. Με τον όρο μέταλλα μεταπτώσεως, γενικά, εννοούμε όλα εκείνα τα μεταλλικά στοιχεία τα οποία βρίσκονται μεταξύ των II και III ομάδων του περιοδικού πίνακα. Αντίθετα, σαν μέταλλα μη μεταπτώσεως, εννοούμε γενικά όλα εκείνα τα μέταλλα τα οποία ανήκουν στις IA, IIA και IIB ομάδες του περιοδικού πίνακα.

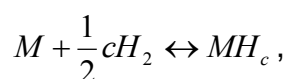
Τυπικά υδρίδια που προκύπτουν από αποθήκευση του υδρογόνου σε μέταλλα μεταπτώσεως είναι τα  $Mg_2NiH_4$ ,  $Mg_2CoH_5$  and  $Mg_2FeH_6$ . Κατά την αποθήκευση του υδρογόνου σε κράματα μετάλλων μεταπτώσεως, τα σύμπλοκα μεταλλικά υδρίδια που προκύπτουν περιγράφονται από τον εξής τύπο:  $M_x(M'H_z)_y$ , όπου  $x$ , και  $y$  παριστάνουν τους ατομικούς αριθμούς με τους οποίους συμμετέχουν τα μέταλλα μεταπτώσεως του  $M$  και  $M'$  αντίστοιχα, ενώ το  $z$  παριστάνει τον ατομικό αριθμό με τον οποίο συμμετέχει το υδρογόνο σ' αυτό. Τα σύμπλοκα αυτά χαρακτηρίζονται από την υψηλή περιεκτικότητά τους σε υδρογόνο, του οποίου όμως η απελευθέρωση είναι δύσκολη λόγω ισχυρών δεσμών υδρογόνου-μετάλλου. Όσον αφορά στα σύμπλοκα που προέκυψαν από αποθήκευση υδρογόνου σε κράματα μετάλλων μη μεταπτώσεως, αυτά περιγράφονται από τον τύπο:  $M(M'H_4)_n$ , όπου  $M$  παριστάνει μέταλλο που ανήκει συνήθως στις ομάδες IA και IIA ( $M=Li, Na, K, Mg$ ) και  $M'$  στοιχείο της ομάδας IIIB ( $M'=B, Al$ ). Τα σύμπλοκα αυτά χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο. [33]

Επιπλέον, και βάσει της θερμοκρασίας απελευθέρωσης υδρογόνων, τα μεταλλικά υδρίδια μπορούν να χωριστούν σε αυτά με μικρή και μεγάλη θερμοκρασία απελευθέρωσης υδρογόνων. Τα υδρίδια μεγάλης θερμοκρασίας ( $>150^\circ C$ ) μπορεί να είναι λιγότερο ακριβά και να συγκρατούν περισσότερο υδρογόνο σε σχέση με τα υδρίδια χαμηλής θερμοκρασίας ( $<150^\circ C$ ), αλλά απαιτούν αξιοσημείωτα ποσά θερμότητας για να απελευθερώσουν το υδρογόνο. Συνεπώς, τα υδρίδια χαμηλής θερμοκρασίας μπορούν να

παραλάβουν ικανοποιητικά ποσά θερμότητας από μια μηχανή, αλλά τα υδρίδια υψηλής θερμοκρασίας απαιτούν μια εξωτερική πηγή θερμότητας. [34]

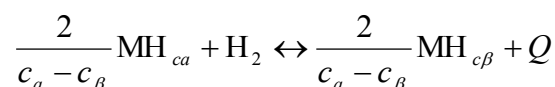
#### ✓ Μηχανισμός απορρόφησης υδρογόνου

Η διαδικασία του σχηματισμού του μεταλλικού υδριδίου έχει ως εξής: αρχικά και σε μακρινή απόσταση από την επιφάνεια του μετάλλου, η δυναμική ενέργεια του ατομικού υδρογόνου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του μοριακού υδρογόνου κατά τη ενέργεια διάσπασης. Πλησιάζοντας προς την επιφάνεια παρατηρείται φυσική προσρόφηση του μοριακού υδρογόνου από το μέταλλο, ελκτική αλληλεπίδραση η οποία οφείλεται στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις Van Der Waals. Σε ακόμα μικρότερες αποστάσεις, το δυναμικό που βλέπει το μοριακό υδρογόνο λόγω της επιφάνειας απειρίζεται, ενώ οι καμπύλες ατομικού και μοριακού τέμνονται σε κάποιο μεταβατικό σημείο. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να ξεπεραστεί ένα ενεργειακό φράγμα προκειμένου να προχωρήσει η διάσπαση του μοριακού υδρογόνου σε ατομικό. Το ενεργειακό αυτό φράγμα εξαρτάται από το πόσο ενεργοποιημένη είναι η επιφάνεια. Όσο μικραίνουν οι αποστάσεις, το μόριο χάνει συνεχώς κινητική ενέργεια ενώ ο δεσμός διασπάται. Το πόσο γρήγορα γίνεται αυτή η διάσπαση ονομάζεται ενεργοποίηση. Αφού το μοριακό υδρογόνο διασπάται στα άτομα που το αποτελούν, αυτά εν συνεχεία εισχωρούν στο πλέγμα του μετάλλου (ή μεταλλικού κράματος) και καταλαμβάνουν ενδοπλεγματικές θέσεις. Συνεπώς, κατά την πρώτη φάση (α-φάση) της απορρόφησης δημιουργείται ένα στερεό διάλυμα παρεμβολής, όπου το υδρογόνο καταλαμβάνει τυχαίες θέσεις στο πλέγμα του μετάλλου. Η α-φάση του σχηματισμού του μεταλλικού υδριδίου περιγράφεται από την ακόλουθη αντίδραση:



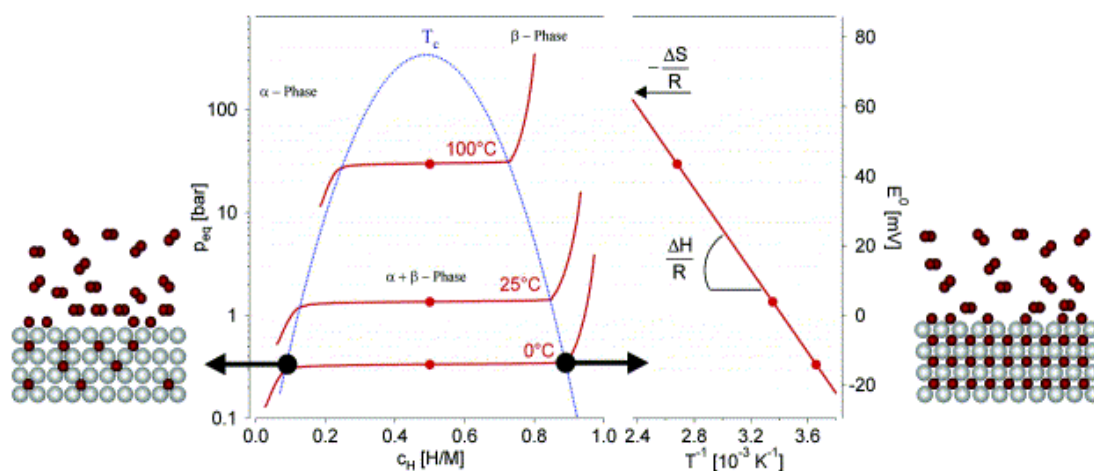
όπου  $c$  η συγκέντρωση του υδρογόνου της α-φάσης, δηλαδή ο λόγος ατόμων υδρογόνου προς τα άτομα μετάλλου.

Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της κρίσιμης θερμοκρασίας  $T_c$ , σχηματίζεται σταδιακά μία νέα φάση (β-φάση) λόγω αστάθειας της α-φάσης σε τέτοιες θερμοκρασίες. Μέχρι τον πλήρη μετασχηματισμό της α-φάσης σε υδρίδιο, οι α- και β-φάσεις συνυπάρχουν, ενώ η αντίδραση που περιγράφει τη διαδικασία αυτή είναι η ακόλουθη:



όπου  $c_a$  η συγκέντρωση του υδρογόνου στην α-φάση και  $c_\beta$  το αντίστοιχο μέγεθος κατά τη β-φάση.

Από την παραπάνω αντίδραση εξάγεται το συμπέρασμα ότι κατά την ρόφηση του υδρογόνου από το μέταλλο (ή το μεταλλικό κράμα) απελευθερώνεται ένα ποσό θερμότητας, το οποίο πρέπει να απομακρυνθεί ούτως ώστε να εξασφαλισθεί η συνέχιση της χημικής αντίδρασης. Από την άλλη πλευρά, το ίδιο ποσό θερμότητας απαιτείται να προσδοθεί κατά την ανάκτηση του αποθηκευμένου υδρογόνου. [29] Στη συνέχεια παρατίθεται απεικόνιση των φάσεων α και β και το αντίστοιχο διάγραμμα ισόθερμης μεταβολής της πίεσης ισορροπίας συναρτήσει της συγκέντρωσης του υδρογόνου:



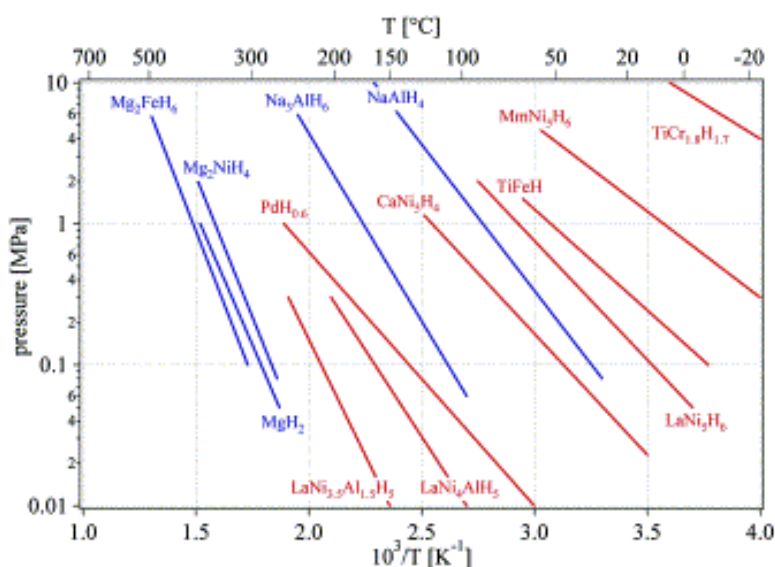
Σχήμα 4.7. Διάγραμμα ισόθερμης μεταβολής της πίεσης στο χώρο της μάζας ενός υδριδίου καθαρού μετάλλου κατά την απορρόφηση υδρογόνου στο εσωτερικό του. [29]

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι στην περιοχή όπου υφίσταται μόνο η θερμοδυναμική φάση α, δηλαδή αριστερά της καμπάνας, η πίεση ισορροπίας  $P_{eq}$  στο εσωτερικό του μεταλλικού υδριδίου μεταβάλλεται εκθετικά συναρτήσει της συγκέντρωσης του υδρογόνου, ενώ κατά τον ίδιο τρόπο μεταβάλλεται όταν έχει σχηματισθεί πλήρως το υδρίδιο (β-φάση). Αντίθετα, στην περιοχή συνύπαρξης και των δύο θερμοδυναμικών φάσεων α και β (εσωτερικό της καμπάνας) παρατηρείται μηδενική μεταβολή της πίεσης  $P_{eq}$ . Η σχέση που περιγράφει την μορφή του παραπάνω διαγράμματος είναι μια εξίσωση τύπου Van 't Hoff:

$$\ln\left(\frac{P_{eq}}{P_{eq}^0}\right) = \frac{\Delta H^0}{RT} - \frac{\Delta S^0}{R},$$

όπου η κανονική μεταβολή της εντροπίας  $\Delta S^0$  σχετίζεται με την μετατροπή του υδρογόνου από μοριακή μορφή σε ατομικό υδρογόνο και είναι αρνητική για όλα τα συστήματα μεταλλικών υδριδίων και προσεγγιστικά ίση με  $\Delta S^0 = -130 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα  $\ln P_{eq} - 1/T$  η παραπάνω σχέση

απεικονίζεται ως μια γραμμή, της οποίας η κλίση δίνει την κανονική διαφορά ενθαλπίας δια την σταθερά R του αερίου. Η ακριβής τιμή της κανονικής μεταβολής της ενθαλπίας  $\Delta H^0$  εξαρτάται από το υδρίδιο. Συγκεκριμένα, υδρίδια με μεγαλύτερη κλίση χαρακτηρίζονται από αρνητικότερη  $\Delta H^0$  και επομένως για την αντιστρεπτή διαδικασία σχηματισμού ή αποσύνθεσης του μεταλλικού υδριδίου υπό κανονική πίεση θα πρέπει να απαχθεί ή να προσδοθεί αντίστοιχα περισσότερη θερμότητα. Αυτό το γεγονός καθορίζει και το μήκος του πλατό πίεσης και συνεπώς την περιοχή της αντιστρεψιμότητας της διεργασίας ρόφησης και εκρόφησης. [29] Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα Van't Hoff επιλεγμένων υδριδίων:



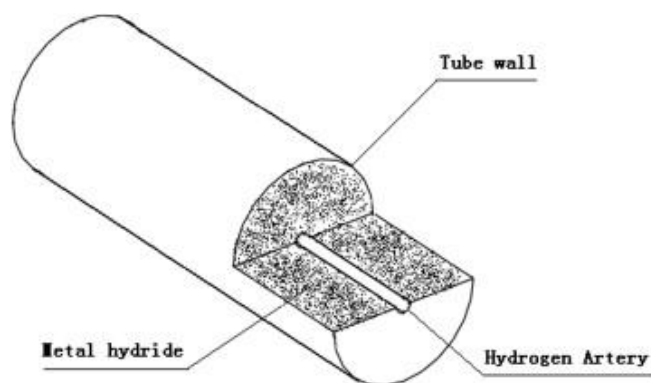
Σχήμα 4.8. Διαγράμματα Van't Hoff επιλεγμένων υδριδίων. [29]

Η πίεση ισορροπίας  $P_{eq}$  του διαγράμματος ισούται θεωρητικά με την εξωτερική πίεση που πρέπει να ασκείται συνεχώς στο υδρογόνο, καθώς αυτό αποθηκεύεται στη μάζα του αντίστοιχου μεταλλικού υδριδίου. Πρακτικά, όμως, η φόρτιση πραγματοποιείται σε πιέσεις 5-10 bar άνω της πίεσης ισορροπίας. Από την άλλη πλευρά, κατά την αποφόρτιση (ανάκτηση αποθηκευμένου υδρογόνου) η πίεση λειτουργίας είναι, ανάλογα και με τις επιδιωκόμενες συνθήκες χημικής κινητικής, κατά 2-6 bar χαμηλότερη της πίεσης ισορροπίας. Αυτό συμβαίνει, γιατί η πυκνότητα του αντίστοιχου μεταλλικού υδριδίου που σχηματίζεται είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή του αντίστοιχου καθαρού μετάλλου του, μιας και στο εσωτερικό του έχει αποθηκευτεί ορισμένη ποσότητα υδρογόνου. Το φαινόμενο των μειωμένων πιέσεων κατά την απομάκρυνση του υδρογόνου από την μάζα ενός μεταλλικού υδριδίου, ονομάζεται φαινόμενο υστέρησης. [27], [29]

✓ Αποθηκευτικές διατάξεις μεταλλικών υδριδίων

Μεγάλος αριθμός διατάξεων μεταλλικών υδριδίων έχει κατασκευασθεί μέχρι σήμερα, ωστόσο οι βασικοί τρόποι σχεδίασης μίας τέτοιας διάταξης μπορούν να διακριθούν σε τρεις με βάση τη γεωμετρία της κλίνης μεταλλικών υδριδίων: α) σωληνοειδής αντιδραστήρας, β) δισκοειδής αντιδραστήρας και γ) δεξαμενή αποθήκευσης. [35]

Ο σωληνοειδής αντιδραστήρας μεταλλικών υδριδίων αποτελείται από μία κεντρική αρτηρία, μέσω της οποίας ρέει το υδρογόνο. Τα μεταλλικά υλικά συμπιέζονται στο δακτυλιοειδές διάστημα μεταξύ της αρτηρίας και του χαλύβδινου συνήθως εξωτερικού τοιχώματος, ενώ η συναλλαγή θερμότητας μεταξύ της κλίνης και της πηγής θερμότητας πραγματοποιείται μέσω της εξωτερικής επιφάνειας του τοιχώματος. Η συγκεκριμένη διάταξη έχει τεθεί σε χρήση από την περίοδο των αρχικών εφαρμογών μεταλλικών υδριδίων σε συστήματα αντλιών θερμότητας και με το πέρασμα των χρόνων έχουν παρατηρηθεί πολλές βελτιώσεις στο σχεδιασμό της. Σε ένα σύστημα ενός αυλού υδρογόνου, η εξωτερική διάμετρος δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 30mm ούτως ώστε να επιτρέπει την ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας στην ακτινική διεύθυνση. Αντίστοιχα, το μήκος του σωλήνα πρέπει να αυξηθεί με σκοπό την αποθήκευση μεγαλύτερης ποσότητας υδριδίων, ενώ γενικά επιδιώκεται ο λόγος ύψους προς διάμετρο να είναι μεγαλύτερος του δέκα. Συχνότερα χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες κυκλικής διατομής, ωστόσο σύμφωνα με τον Veerajiu και την αναφορά [36], οι ελλειπτικού σχήματος διατάξεις είναι πιο συμπαγείς και χαρακτηρίζονται από μικρές υδραυλικές απώλειες. [35]



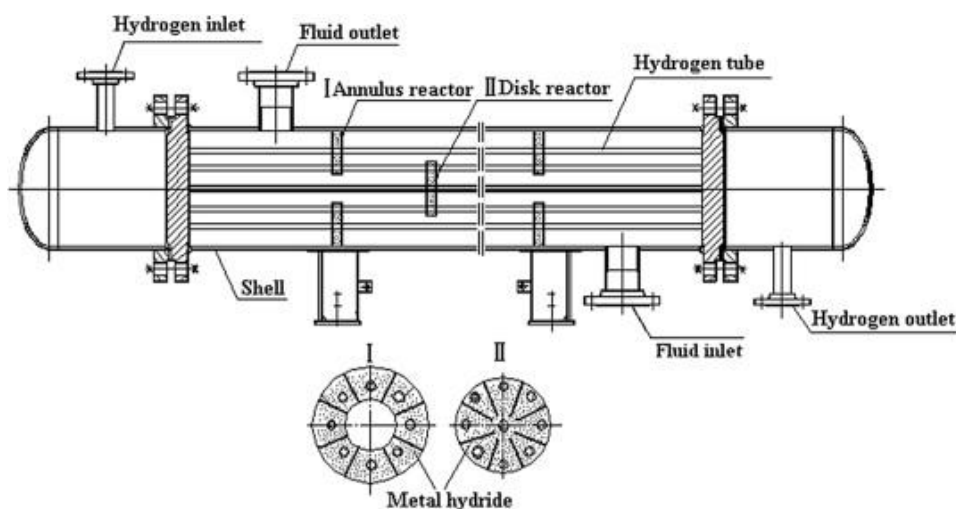
Σχήμα 4.9. Σωληνοειδής διάταξη αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων. [35]

Λόγω της υπάρχουσας τυποποίησης, η κατασκευή και συντήρηση μίας τέτοιας διάταξης είναι απλή, ενώ αυτή χαρακτηρίζεται επίσης και από καλή διαμορφωσιμότητα και δυνατότητα ανεξάρτητης λειτουργίας. Συστήματα αποθήκευσης αποτελούμενα από μία διάταξη προσφέρονται για εφαρμογές

μικρής κλίμακας, ενώ από την άλλη συστοιχίες τέτοιων διατάξεων μπορούν να υιοθετηθούν για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης. [35]

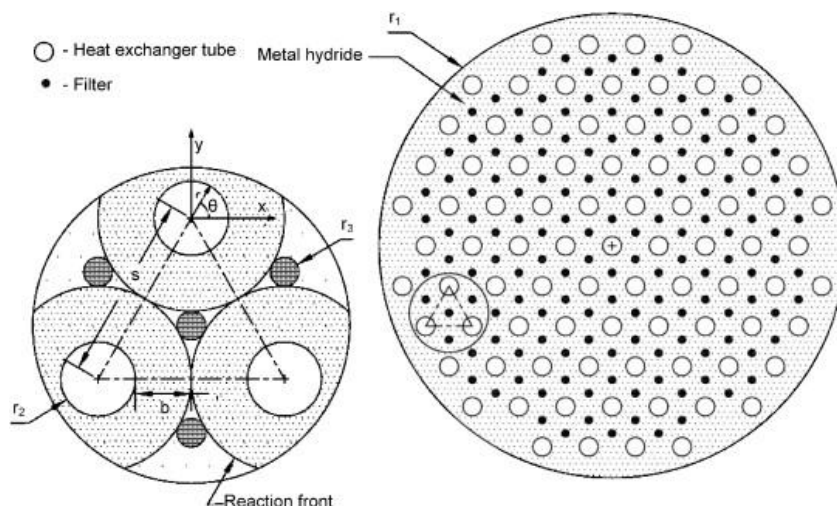
Η δισκοειδής διάταξη αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων αποτελείται από μία επίπεδη κλίνη (δίσκος), της οποίας ο λόγος ύψους προς διάμετρο είναι πολύ μικρότερος της μονάδας. Η ροή του υδρογόνου γίνεται μέσω οριζοντίων αυλών, μέρος των οποίων περνά μέσα από την κλίνη, ενώ το ψυκτικό υγρό ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της παρούσας διάταξης αποτελεί η μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας και η υψηλή ταχύτητα πραγματοποίησης της αντίδρασης. Ωστόσο, η ποσότητα του μεταλλικού υδριδίου που μπορεί να αποθηκευθεί σε ένα δίσκο είναι ελάχιστη, ενώ λόγω της δομής της καθίσταται δύσκολη η αύξηση της χωρητικότητάς της με την τοποθέτηση επιπρόσθετων δίσκων. [35]

Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, εκ των οποίων προέκυψε η πρόταση για κατασκευή μίας δακτυλιοειδούς-δισκοειδούς διάταξης από τον Y.Q. Wang. Στη συγκεκριμένη διάταξη το μεταλλικό υλικό είναι αποθηκευμένο στο εσωτερικό δακτυλιοειδών και δισκοειδών διαμορφώσεων, ενώ το υδρογόνο ρέει στο εσωτερικό σωλήνων που τις διαπερνούν και επιτρέπουν τη μεταφορά μάζας κατά την ακτινική διεύθυνση. Όσον αφορά στη συναλλαγή θερμότητας, αυτή πραγματοποιείται μέσω επαφής του ψυκτικού υγρού με τις εξωτερικές επιφάνειες των δισκοειδών-δακτυλιοειδών μονάδων. Η χωρητικότητα μίας τέτοιας διάταξης κυμαίνεται σε μεγάλο εύρος μέσω μεταβολής του αριθμού των περιεχόμενων μονάδων, ενώ η σωστή διαστασιολόγηση των μονάδων όπως και τα κατάλληλα διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ τους εξασφαλίζουν την επίτευξη υψηλού ρυθμού αντιδράσεων. [35]



Σχήμα 4.10. Δακτυλιοειδής-δισκοειδής διάταξη αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων. [35]

Τέλος, αναφορικά με τη διάταξη της δεξαμενής, αυτή χρησιμοποιεί έναν μεγάλου όγκου κυλινδρικό ή κυβικό θάλαμο ως κλίνη, ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγαλύτερων ποσοτήτων μεταλλικών υδριδίων συγκριτικά με τις προαναφερθείσες διατάξεις. [35] Στο εσωτερικό του θαλάμου είναι ομοιόμορφα διατεταγμένοι στο υλικό αποθήκευσης του υδρογόνου αυλοί και φίλτρα, μέσω των οποίων θα γίνουν οι απαραίτητες αντιδράσεις μεταξύ μεταλλικού υλικού και υδρογόνου. Οι ψυκτικοί αυλοί επιτελούν το ρόλο της απομάκρυνσης της αποδιδόμενης κατά τη διεξαγωγή της αντίδρασης θερμότητας, ενώ τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για την ομοιόμορφη διακίνηση του υδρογόνου στην κλίνη. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διαδικασία ρόφησης του υδρογόνου από το μεταλλικό υλικό πραγματοποιείται γρηγορότερα στην περιοχή γύρω από τους αυλούς ψύξης, το υλικό εκεί θα κορεσθεί νωρίτερα από το υπόλοιπο. Συνεπώς, είναι δυνατόν να απεικονίσουμε μία διεπιφάνεια, γνωστή και ως μέτωπο της αντίδρασης, η οποία διαχωρίζει πλήρως τη περιοχή των πλήρως σχηματισμένων υδριδίων από την περιοχή ακόρεστου μεταλλικού υλικού. Με την πάροδο του χρόνου, το μέτωπο της αντίδρασης κινείται εξωτερικά από την περιφέρεια των ψυκτικών αυλών προς τις ακόρεστες περιοχές του μεταλλικού κράματος. Σε περίπτωση που τα μέτωπα της αντίδρασης συναντηθούν μεταξύ τους κατά την ίδια χρονική στιγμή, τότε στην κλίνη έχει απομείνει το ελάχιστο δυνατό ακόρεστο υλικό, δηλαδή ο σχηματισμός αυτός χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα. [37]



Σχήμα 4.11. Κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων. [37]

Πρόσφατα η τεχνολογία των μικροκαναλιών έχει αποκτήσει εξαιρετική δυναμική όσον αφορά στην αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας σε περιορισμένο χώρο και προτάθηκε η εφαρμογή της σε αποθηκευτικές διατάξεις μεταλλικών υδριδίων από τους Dehouche [38] και Meng [39]. Μέσω



της εξαναγκασμένης ροής διαμέσου των δακτυλιοειδών καναλιών καθίσταται δυνατή η επίτευξη ομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας. Ωστόσο, πέραν της σημαντικής βελτίωσης της διάταξης αναφορικά με τη μεταφορά θερμότητας, η τεχνολογία των μικροκαναλιών συγκεντρώνει το πλεονέκτημα της οδήγησης του ρευστού μέσω τριχοειδών δυνάμεων που επιτρέπουν την παράλειψη εξωτερικών αντλιών.

Παρότι σαφής κατηγοριοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων μεταλλικών υδριδίων δεν υφίσταται, αναφέρθηκαν οι δημοφιλέστερες εξ αυτών. Όσον αφορά στην επιλογή της κατάλληλης διάταξης, η σωληνοειδής έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται σε συστήματα αντλίας θερμότητας και συμπιεστών, η δεξαμενή αποθήκευσης αποτελεί τη δημοφιλέστερη και συνηθέστερη επιλογή, ενώ η δισκοειδής διάταξη έχει πολύ περιορισμένη χρήση. [35]

Συνοψίζοντας, η μέθοδος αποθήκευσης σε μεταλλικά υδρίδια εξασφαλίζει αποθήκευση του υδρογόνου σε τιμές ενεργειακής πυκνότητας ανά μονάδα όγκου ανάλογες με αυτές της μεθόδου αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου. Όσον αφορά στην μέγιστη επιτεύξιμη περιεκτικότητα σε υδρογόνο κατά μάζα, αυτή ανέρχεται στα 0,07 kg H<sub>2</sub> / kg μετάλλου για μεταλλικά υδρίδια υψηλής θερμοκρασίας όπως το MgH<sub>2</sub>. [17] Οι τελευταίες εξελίξεις στον τομέα του σχεδιασμού των αποθηκευτικών διατάξεων σε μεταλλικά υδρίδια επιτρέπουν την ανάπτυξη μονάδων με την ίδια χωρητικότητα σε υδρογόνο, οι οποίες, αν και έχουν το ίδιο βάρος με τις φιάλες αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου σε πίεση 150bar, καταλαμβάνουν κατά προσέγγιση 15 φορές μικρότερο όγκο. Παράλληλα, οι διατάξεις αυτές παρέχουν υδρογόνο υψηλής καθαρότητας ακόμα και όταν φορτισθούν με υδρογόνο χαμηλής καθαρότητας χωρίς κάποιο επιπρόσθετο κόστος. Το στοιχείο αυτό βαίνει προς όφελος των κυψελών καυσίμου, διότι τα μεταλλικά υδρίδια παρέχουν καθαρό υδρογόνο, σταθερής πίεσης και ρυθμού παροχής με αποτέλεσμα την επέκταση του χρόνου ζωής τους. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη μέθοδος αποθήκευσης υπερτερεί στον τομέα της ασφάλειας καθότι η ρόφηση και εκρόφηση του υδρογόνου γίνεται σε συνθήκες που προσεγγίζουν αυτές του περιβάλλοντος. [19]

Από την άλλη πλευρά, όμως, εμφανίζονται κάποιοι σαφείς περιορισμοί αναφορικά με την αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια σε αποκεντρωμένα συστήματα. Αρχικά, το βασικότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ο χαμηλός ρυθμός φόρτισης και αποφόρτισης της αποθηκευτικής διάταξης καθότι σε εφαρμογές αποκεντρωμένων συστημάτων κρίνεται ως απαραίτητο στοιχείο η γρήγορη ρόφηση και εκρόφηση του υδρογόνου. Επιπλέον, ίσως ο σημαντικότερος περιορισμός στη χρήση μεταλλικών υδριδίων είναι η ανάγκη

για διαχείριση της θερμότητας της αντίδρασης και ειδικά σε εφαρμογές εξωτερικού χώρου σε ψυχρές περιοχές. Σε τέτοιες περιοχές, η πίεση κατά την εκρόφηση ελαττώνεται και απαιτείται επιπλέον παροχή θερμότητας κατά την αντίδραση. Ωστόσο, η διαχείριση της θερμότητας της αντίδρασης μπορεί να αποδειχθεί και πλεονέκτημα για ορισμένα συστήματα λόγω του γεγονότος ότι η συμπίεση του υδρογόνου θα είναι επιτεύξιμη χωρίς τη χρήση δαπανηρών και θορυβωδών συμπιεστών. Τέλος, τα μεταλλικά υδρίδια χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος, το οποίο πρέπει να ελαττωθεί σημαντικά ούτως ώστε να είναι η τεχνολογία αυτή οικονομικά βιώσιμη. Προς το παρόν, αλλά και το εγγύς μέλλον σύμφωνα με το μοντέλο εκτίμησης του κόστους από τον Yartys [40], τα μεταλλικά υδρίδια μπορούν να ανταγωνισθούν την αποθήκευση συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου μόνο σε χωρητικότητες που ανέρχονται σε κάποιες δεκάδες Nm<sup>3</sup>. [21]

#### 4.3.2.4. Αξιολόγηση κρίσιμων παραμέτρων και επιλογή της κατάλληλης αποθηκευτικής διάταξης για αποθήκευση H<sub>2</sub> σε αποκεντρωμένα συστήματα

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αποθήκευσης υδρογόνου σε αποκεντρωμένα συστήματα προϋποθέτει αξιολόγησή τους όσον αφορά σε κάποιες κρίσιμες παραμέτρους: [21]

##### ➤ Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης της αποθηκευτικής διάταξης αποτελεί μία σημαντικότερη παράμετρο, διότι επηρεάζει το συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης (ηλεκτρολυτική διάταξη-αποθήκευση-μονάδα χρήσης). Ένα σύστημα αποθήκευσης χαμηλής αποδοτικότητας συνεπάγεται την ανάγκη για αποθηκευτική διάταξη μεγαλύτερου μεγέθους με φυσικό επακόλουθο την αύξηση του κόστους και την ελάττωση της ενεργειακής πυκνότητας του συστήματος. Κατά συνέπεια, πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ελάττωση που προκαλεί στο συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος η κατανάλωση ενέργειας της κάθε διάταξης αποθήκευσης.

Όσον αφορά στην άμεση αποθήκευση του αερίου υδρογόνου σε χαλύβδινες φιάλες κατά την έξοδό του από ηλεκτρολύτη υψηλής πίεσης λειτουργίας, ο βαθμός απόδοσης μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ίσος με 100%. Από την άλλη πλευρά, σε συστήματα μεγαλύτερου μεγέθους και όπου απαιτείται αποθήκευση υπό μορφή πεπιεσμένου αερίου, πιθανώς λόγω περιορισμένου χώρου, απαιτείται η χρήση συμπιεστή όπως προαναφέρθηκε στην αντίστοιχη ενότητα γεγονός το οποίο προκαλεί μείωση του βαθμού απόδοσης. [21] Παρακάτω ακολουθεί πίνακας που περιλαμβάνει την απαιτούμενη ενέργεια συμπίεσης του υδρογόνου ως ποσοστό της κατώτερης

θερμογόνου ικανότητάς του και με 1,3% υπερπίεση στον συμπιεστή για διάφορες τιμές πίεσης: [27]

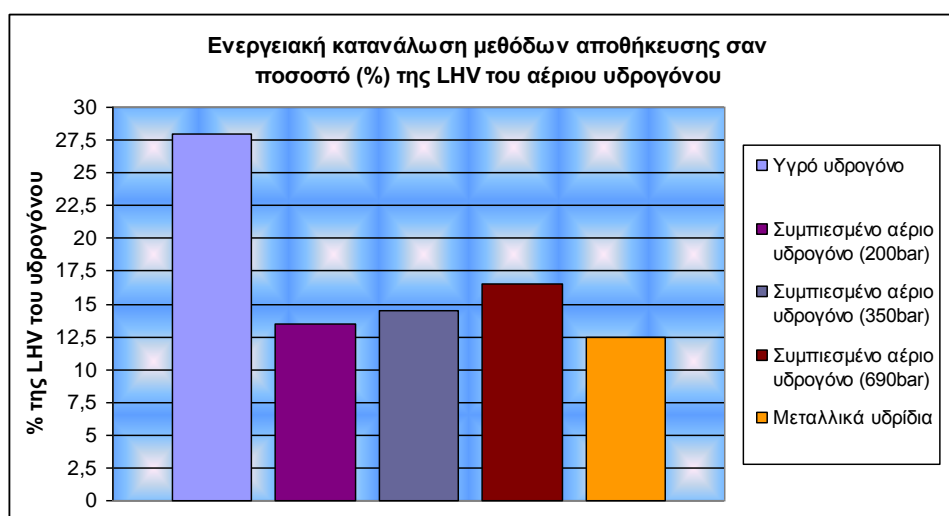
Κανονική πίεση (bar)	Ενέργεια συμπίεσης
250	13%
350	14%
500	16%
700	17%

Πίνακας 4.2. Ενέργεια συμπίεσης υδρογόνου για διάφορες τιμές πίεσεων. [27]

Στην περίπτωση αποθήκευσης υδρογόνου σε υγρή μορφή, η υγροποίηση καταναλώνει περίπου το 1/3 της θερμογόνου ικανότητας του υδρογόνου, ενώ παράλληλα εμφανίζονται σημαντικές απώλειες υδρογόνου λόγω εξάτμισης κατά την αποθήκευση σε κρυογενικές δεξαμενές (0,1% ανά ημέρα για δεξαμενές όγκου 40-68m<sup>3</sup>), μέγεθος που καταλήγει να είναι σημαντικό για αποθήκευση σε αποκεντρωμένα συστήματα όπου το υδρογόνο αποθηκεύεται για μεγάλη χρονική περίοδο.

Τέλος, κατά την αποθήκευση του υδρογόνου σε μεταλλικά υδρίδια υπάρχουν αρκετές απώλειες κατά τη θέρμανση των υδριδίων για την αποβολή του προσροφημένου υδρογόνου. [21]

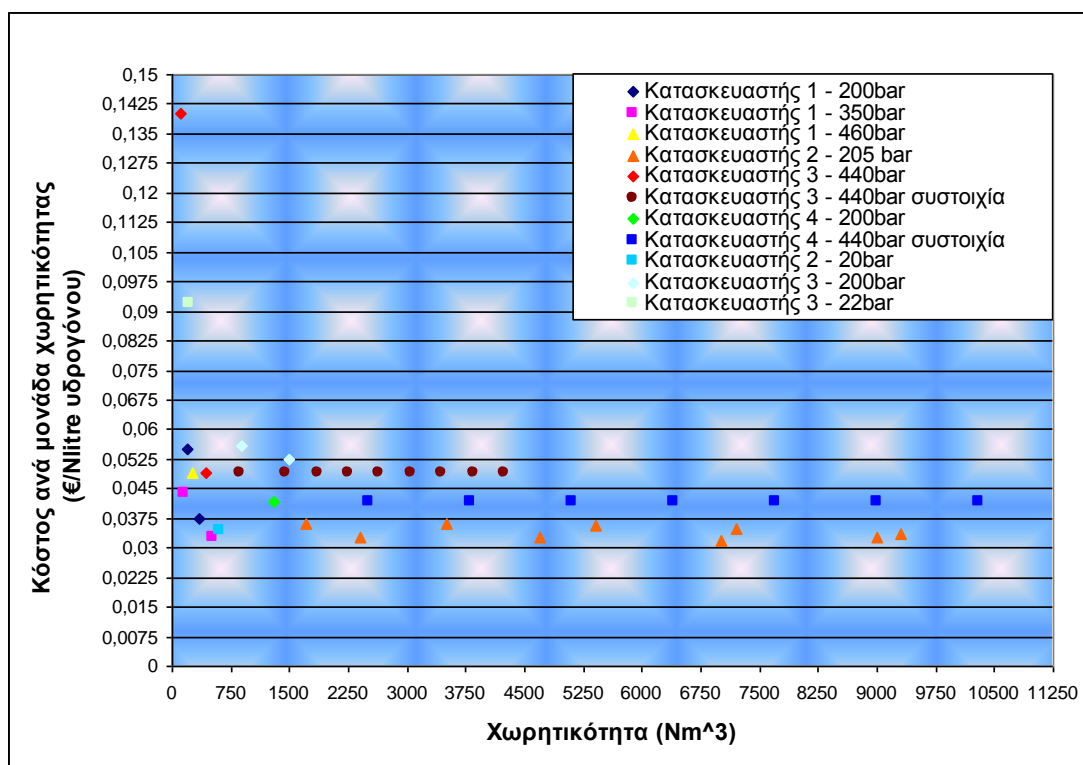
Στη συνέχεια ακολουθεί διάγραμμα που απεικονίζει την ενεργειακή κατανάλωση κάθε μεθόδου αποθήκευσης ως ένα ποσοστό της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας του υδρογόνου: [21]



Σχήμα 4.12. Διάγραμμα ενεργειακής κατανάλωσης μεθόδων αποθήκευσης σαν εκατοστιαίο ποσοστό της LHV του αερίου υδρογόνου. [21]

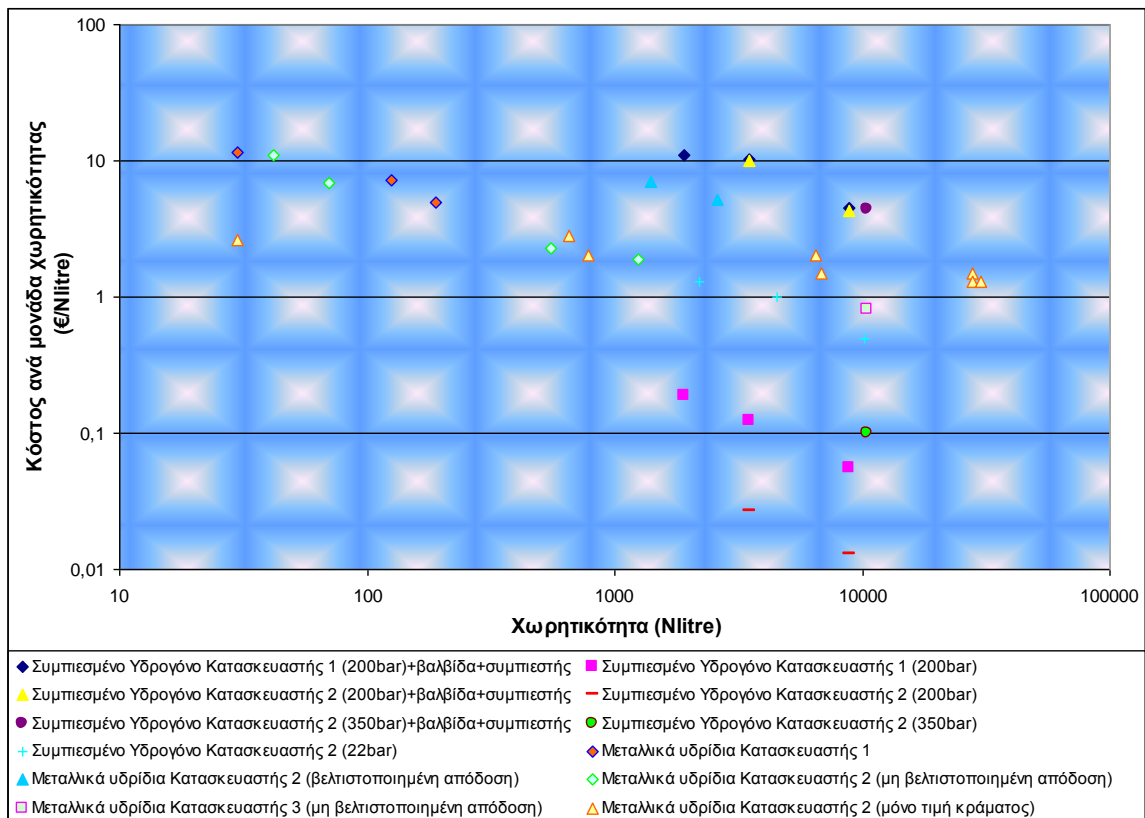
### ➤ Κόστος αποθηκευτικών διατάξεων

Με σκοπό την αξιολόγηση του συγκριτικού κόστους των μεθόδων αποθήκευσης λήφθηκαν στοιχεία από ευρωπαϊκές εταιρείες κατασκευής τέτοιων διατάξεων. Με βάση αυτά τα στοιχεία προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα που απεικονίζει τη σχέση κόστους-χωρητικότητας εμπορικά διαθέσιμων αποθηκευτικών διατάξεων πετρεσμένου υδρογόνου μεσαίου και μεγάλου μεγέθους: [21]



Σχήμα 4.13. Διάγραμμα κόστους-χωρητικότητας εμπορικά διαθέσιμων αποθηκευτικών διατάξεων πετρεσμένου υδρογόνου μεσαίου και μεγάλου μεγέθους. [21]

Όσον αφορά στη μέθοδο αποθήκευσης σε μεταλλικά υδρίδια, αυτά όπως προαναφέρθηκε διατίθενται στην αγορά μέχρι στιγμής σε μικρά μεγέθη (χωρητικότητες που κυμαίνονται περί τα 15-20 Nm<sup>3</sup>). Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται στοιχεία κόστους μονάδων αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων και συγκρίνονται με μονάδες αποθήκευσης πετρεσμένου αερίου χαμηλής και υψηλής πίεσης. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι στον όρο «μονάδα αποθήκευσης» συμπεριλαμβάνεται η συμπίεση, αλλά και η βαλβίδα μείωσης της πίεσης ούτως ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση του κόστους των διατάξεων αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων με τις φιάλες αποθήκευσης πετρεσμένου αερίου υψηλής πίεσης. [21]



Σχήμα 4.14. Διάγραμμα κόστους-χωρητικότητας για μικρές εμπορικά διαθέσιμες μονάδες αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου και μεταλλικών υδριδίων. [21]

Από τα παραπάνω διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το κόστος των αποθηκευτικών διατάξεων χαμηλής πίεσης κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτό των αντίστοιχων διατάξεων υψηλών πιέσεων. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο αυξημένο κόστος υλικών σε συστήματα αποθήκευσης χαμηλής πίεσης, ενώ παράλληλα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι το κόστος των μονάδων υψηλής πίεσης έχει αυξηθεί σημαντικά από την προσθήκη του κόστους του συμπιεστή.

Μέσω γραμμικών παρεμβολών στα συλλεχθέντα από τους κατασκευαστές δεδομένα, το κόστος των φιαλών αποθήκευσης αερίου υδρογόνου χαμηλής (20-30 bar) και υψηλής πίεσης (>200 bar) ανέρχεται στα 38 €/Nm<sup>3</sup> και 45 €/Nm<sup>3</sup> αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, όπως είναι ήδη γνωστό, τα μεταλλικά υδρίδια χαρακτηρίζονται από υψηλότερο κόστος και συγκεκριμένα μονάδες χωρητικότητας κάτω των 10 Nm<sup>3</sup> κοστίζουν από 800 έως και 25000 €/Nm<sup>3</sup>. Το κόστος για μονάδες χωρητικότητας άνω των 10 Nm<sup>3</sup> εκτιμάται στα 1000 €/Nm<sup>3</sup> για συστήματα με βελτιστοποιημένη απόδοση και στα 300 €/Nm<sup>3</sup> για μη βελτιστοποιημένα συστήματα (επίτευξη ψύξης/θέρμανσης με αέρα). [21]

➤ Διαθεσιμότητα συστήματος (χρόνος απόκρισης, συντήρηση)

Σημαντικό επίσης ρόλο στη λειτουργία της εγκατάστασης διαδραματίζει και ο χρόνος απόκρισης των δεξαμενών στις μεταβολές του συστήματος. Έτσι λοιπόν, οι δεξαμενές αερίου υδρογόνου (χαλύβδινες φιάλες) παρουσιάζουν τη δυνατότητα άμεσης φόρτισης και αποφόρτισης. Ωστόσο, η μονάδα συμπίεσης, σε όσα συστήματα η χρήση συμπιεστή κρίνεται απαραίτητη, απαιτεί τακτική συντήρηση με αποτέλεσμα τη μείωση της διαθεσιμότητας της μονάδας αποθήκευσης. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής των φιαλών πεπιεσμένου υδρογόνου ξεπερνά τα 30 χρόνια, διάρκεια η οποία όμως ελαττώνεται σε περίπτωση ύπαρξης συμπιεστή. Τυπική διάρκεια ζωής ενός μηχανικού συμπιεστή υδρογόνου θεωρούνται τα 10 έτη.

Όσον αφορά στα μεταλλικά υδρίδια, αυτά χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης λόγω περιορισμών που τίθενται από τη μεταφορά θερμότητας και την κινητική του υδριδίου. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα φόρτισης και αποφόρτισης της διάταξης εξαρτάται από το σχεδιασμό της και από το είδος του υδριδίου. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής του δοχείου αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων είναι περιορισμένη καθότι μετά από περίπου 2500 ώρες λειτουργίας απαιτείται ανατροφοδότηση των δοχείων αποθήκευσης με θέρμανση τους πάνω από τους 200°C, διαδικασία κατά την οποία η μονάδα τίθεται εκτός διαθεσιμότητας. Η διάρκεια ζωής των δοχείων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την καθαρότητα του αποθηκευόμενου υδρογόνου. Τα μεταλλικά κράματα απορροφούν, πέραν του υδρογόνου, τους ρύπους που εισάγονται στο δοχείο μαζί με αυτό με αποτέλεσμα το υδρογόνο που εκροφάται να χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα. Από την άλλη πλευρά, όμως, η διάρκεια ζωής του δοχείου και η αποθηκευτική του ικανότητα ελαττώνεται καθότι οι ρύποι παραμένουν στο εσωτερικό του και γεμίζουν τα κενά στο μέταλλο τα οποία κατείχε το υδρογόνο. [21]

➤ Ασφάλεια

Η πολυπλοκότητα της κατασκευής καθώς και το επίπεδο ασφάλειας στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει μια μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου δεν θα μπορούσε παρά να είναι σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό και τη λειτουργία της εγκατάστασης.

Κατά την αποθήκευση πεπιεσμένου αερίου υδρογόνου τίθενται πολύ αυστηροί κανονισμοί ασφαλείας, των οποίων η ικανοποίηση πολλές φορές συνεπάγεται κόστος μεγαλύτερο του κόστους αγοράς του εξοπλισμού παραγωγής και αποθήκευσης του παραγόμενου υδρογόνου. Ωστόσο, υπάρχει πλέον η σχετική τεχνολογική εμπειρία για τη διαχείριση του υδρογόνου υπό υψηλή πίεση, καθώς το υδρογόνο σε αυτή τη μορφή

χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές. Ως ασφαλέστερη μέθοδος αποθήκευσης θεωρείται αυτή των μεταλλικών υδριδίων, καθότι η ρόφηση και εκρόφηση του υδρογόνου γίνεται σε συνθήκες κοντά στις περιβαλλοντικές.

Όσον αφορά την πολυπλοκότητα της κατασκευής και την ευκολία ελέγχου αυτής, οι μελέτες των ερευνητών έδειξαν ότι:

- ✓ τα συστήματα αποθήκευσης υψηλής πίεσης υπό αέρια μορφή δεν είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και είναι και πολύ απλά στον έλεγχο και στο χειρισμό τους.

- ✓ τα συστήματα υψηλής πίεσης με αποθήκευση υπό υγρή μορφή είναι αρκετά πολύπλοκα και απαιτούν πολλά και ακριβά συστήματα ελέγχου.

- ✓ οι δεξαμενές υδριδίων απαιτούν επίσης αρκετά πολύπλοκες εγκαταστάσεις οι οποίες απαιτούν και μονάδες θέρμανσης (για την απελευθέρωση του δεσμευμένου υδρογόνου). Έτσι τόσο η κατασκευή όσο και ο έλεγχος τους είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί πολύ προσεκτική σχεδίαση. [21]

#### ➤ Φυσικό μέγεθος

Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι εξέχουσας σημασίας σε περιπτώσεις που ο διαθέσιμος χώρος προς εγκατάσταση της μονάδας είναι περιορισμένος. Οι μονάδες αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου καταλαμβάνουν σημαντικό όγκο, ενώ η κατά μάζα περιεκτικότητα των εμπορικά διαθέσιμων φιαλών σε υδρογόνο δεν ξεπερνά το 2-3%. Αντιθέτως, τα μεταλλικά υδρίδια πλεονεκτούν σε αυτήν την παράμετρο λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας ανά μονάδα όγκου, η οποία είναι σε ορισμένες περιπτώσεις 1,5 έως και 2 φορές μεγαλύτερη του υδροποιημένου υδρογόνου. Ωστόσο, τα μεταλλικά υδρίδια χαρακτηρίζονται από χαμηλή κατά μάζα περιεκτικότητα σε υδρογόνο που δεν ξεπερνά τα 2-2,5%, ποσοστό το οποίο μειώνεται περαιτέρω κατά 30-50% λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα θέρμανσης-ψύξης και το κέλυφος της διάταξης. [21]

#### 4.3.2.5 Υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιασθεί συνοπτικά η αποθήκευση υδρογόνου κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, καθότι η μέθοδος αυτή δεν εφαρμόζεται σε αποκεντρωμένα συστήματα λόγω υψηλού κόστους.

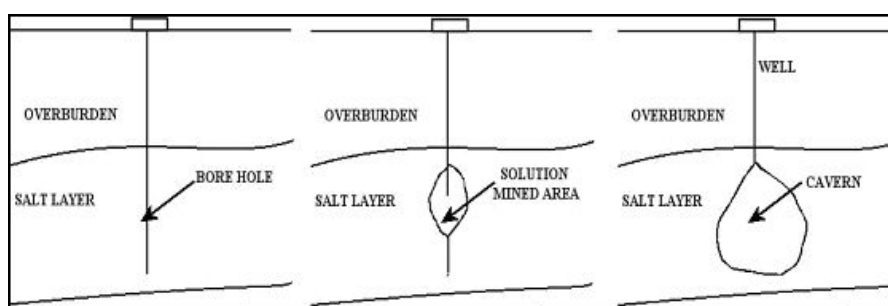
Η υπόγεια αποθήκευση του φυσικού αερίου εφαρμόζεται από το 1916 με αποτέλεσμα να αποτελεί μία ώριμη τεχνολογία, η οποία είναι σε μεγάλο βαθμό άμεσα εφαρμόσιμη και για το υδρογόνο. Αρχικά, η υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου γινόταν σε ταμειυτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου, δηλαδή πορώδεις σχηματισμούς πετρωμάτων με χωρητικότητες που

ανέρχονται μέχρι και στα  $10^9 \text{ Nm}^3$  και πιέσεις που φτάνουν μέχρι τις 40 atm. [41] Ωστόσο, η αποθήκευση υδρογόνου σε παρόμοιους σχηματισμούς χαρακτηρίζεται από κατά προσέγγιση τριπλάσιο κόστος για το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο σε σχέση με την αποθήκευση φυσικού αερίου, γεγονός που οφείλεται στην χαμηλότερη θερμογόνο ικανότητα του αερίου υδρογόνου. [17] Κάθε τέτοιος πορώδης σχηματισμός πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- να εμπεριέχει ένα πορώδες στρώμα, συνήθως άμμο ή αμμώδη βράχο, σε βάθος 150-900m κάτω από τη επιφάνεια του εδάφους
- να εμπεριέχει ένα στρώμα αδιαπέραστων πετρωμάτων πάνω από το πορώδες στρώμα
- να έχει την κατάλληλη γεωλογική δομή που μοιάζει με τρούλο στο σχήμα (αντίκλινο). [41]

Το πορώδες του πρώτου στρώματος πρέπει να είναι ικανοποιητικά υψηλό, ούτως ώστε να παρέχει κατάλληλου μεγέθους κενό χώρο με σκοπό την κατασκευή μίας οικονομικά βιώσιμης αποθηκευτικής διάταξης. Επιπλέον, η διαπερατότητα του στρώματος οφείλει να είναι υψηλή έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητική παροχή όγκου κατά την φόρτιση και αποφόρτιση της δεξαμενής με υδρογόνο. Από την άλλη πλευρά, το δεύτερο στρώμα ενός τέτοιου σχηματισμού οφείλει να είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό αδιαπέραστο και ιδιαίτερα στην περίπτωση που το υδρογόνο αποθηκεύεται σε αέρια μορφή.

Επιπλέον, πέραν της αποθήκευσης σε ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποθηκευτικές μονάδες ήδη υπάρχουσες υπόγειες κοιλότητες. Μία ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί η χρήση κοιλοτήτων του αλατούχου υδροφόρου ορίζοντα, όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Συγκεκριμένα, σε περιοχές όπου ο αλατούχος υδροφόρος ορίζοντας έχει πάχος μεταξύ 60 και 100 μέτρων είναι αμφιλεγόμενο εάν μία κατακόρυφα σκαμμένη κοιλότητα μπορεί να αποθηκεύσει ικανοποιητική ποσότητα υδρογόνου. [41]



Σχήμα 4.15. Απεικόνιση διαδικασίας σχηματισμού μίας οριζόντιας κοιλότητας στον αλατούχο υδροφόρο ορίζοντα με διάλυση του άλατος σε νερό. [41]



Για αυτό το λόγο, σε τέτοιες περιπτώσεις γίνεται οριζόντια διάνοιξη της κοιλότητας μέσω διάλυσης του περιεχόμενου άλατος σε νερό (σχήμα 4.15) ή εναλλακτικά και εάν αυτό είναι δυνατό, πραγματοποιείται διασύνδεση μικρότερων κατακόρυφων κοιλοτήτων. Η χωρητικότητα των συγκεκριμένων κοιλοτήτων μπορεί να φτάσει μέχρι και τα  $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

Τέλος, παρουσιάζεται και η δυνατότητα αποθήκευσης υδρογόνου σε κοιλότητες που δημιουργήθηκαν από εκσκαφή βραχωδών σχηματισμών, κοιλότητες με χωρητικότητα περίπου 10 φορές μικρότερη από τις κοιλότητες άλατος. Συγκεκριμένα, ο Lindblom εκπόνησε το 1985 μία μελέτη σχετικά με την αποθήκευση συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου σε τέτοιου είδους κοιλότητες, οι οποίες αποτελούνταν από παράλληλες σήραγγες που περιείχαν το αέριο και περιβάλλονταν από νερό. [41]

Συνοψίζοντας, κατά την υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου δεν αντιμετωπίζονται τεχνικά προβλήματα πέραν των αναμενόμενων απωλειών του αερίου υδρογόνου που κυμαίνονται μεταξύ 1-3% ετησίως. [17] Ως βέλτιστη επιλογή για την αποθήκευση υδρογόνου θεωρούνται οι κοιλότητες άλατος λόγω της εξαιρετικά χαμηλής διαπερατότητας των αλατούχων πετρωμάτων και της μικρής συγκριτικά με άλλες κοιλότητες αποθήκευσης ποσότητας αερίου υδρογόνου που παραμένει στο εσωτερικό αυτών κατά την πλήρη αποφόρτισή τους. [42] Κάποια παραδείγματα υπόγειας αποθήκευσης υδρογόνου είναι τα εξής:

- ✓ στο Kiel της Γερμανίας αποθηκεύεται αέριο περιεκτικότητας 60-65% σε υδρογόνο σε κοιλότητα όγκου  $32000 \text{ m}^3$  σε πιέσεις μεταξύ 80-160 bar και βάθος 1330m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους από το 1971.
- ✓ στο Beynes της Γαλλίας, η γαλλική εταιρεία φυσικού αερίου Gaz de France αποθήκευε αέριο πλούσιο σε υδρογόνο που προέκυπτε ως παραπροϊόν διεργασιών διυλιστηρίων σε κοιλότητες του υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ 1956 και 1974. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν σημειώθηκαν προβλήματα απωλειών αερίου και προβλήματα ασφαλείας.
- ✓ στο Teeside του Ηνωμένου Βασιλείου, η εταιρεία ICI αποθήκευε για μεγάλο χρονικό διάστημα  $1.000.000 \text{ Nm}^3$  σχεδόν καθαρό αέριο υδρογόνο (3-4% διοξείδιο του άνθρακα) σε τρεις κοιλότητες άλατος βάθους 400m κάτω από το έδαφος.
- ✓ στη Ρωσία αποθηκεύεται καθαρό υδρογόνο σε πίεση 90 bar για χρήση σε αεροναυπηγικές εφαρμογές.
- ✓ στο Lobodice της Τσεχοσλοβακίας αποθηκευόταν σε κοιλότητες του υδροφόρου ορίζοντα αέριο περιεκτικότητας 50% σε υδρογόνο. [17], [41]

### 4.3.3 Μονάδα χρήσης αποθηκευμένου υδρογόνου

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες υπό ανάπτυξη τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της δυνατότητάς τους για επίτευξη υψηλών βαθμών απόδοσης (πλήρες και μερικό φορτίο), χαμηλών εκπομπών, χρήση διαφορετικών καυσίμων και αθόρυβης λειτουργίας. Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών, τόσο σταθερών όσο και κινητών. Στο παρόν στάδιο εξέλιξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι εμπορικά διαθέσιμος ένας σημαντικός αριθμός κυψελών καυσίμου, ενώ έχουν κατασκευασθεί και αρκετοί πειραματικοί σταθμοί με χρήση κυψελών καυσίμου.

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου, αυτές αντιμετωπίζουν σκληρό ανταγωνισμό από τους αεριοστροβίλους νέας γενιάς, οι οποίοι επιτυγχάνουν βαθμούς απόδοσης περίπου της ίδιας τάξεως και σχετικά χαμηλές εκπομπές συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά αυτά με κόστος επένδυσης που κυμαίνεται μεταξύ 600 και 800 €/kW. Λόγω χαμηλότερου κόστους των αεριοστροβίλων για συστήματα μεγαλύτερα των 10 MW, αναμένεται οι κυψέλες καυσίμου να βρουν αρχικά εφαρμογή σε συστήματα με ισχύ που κυμαίνεται στο εύρος των 30 kW - 10 MW.

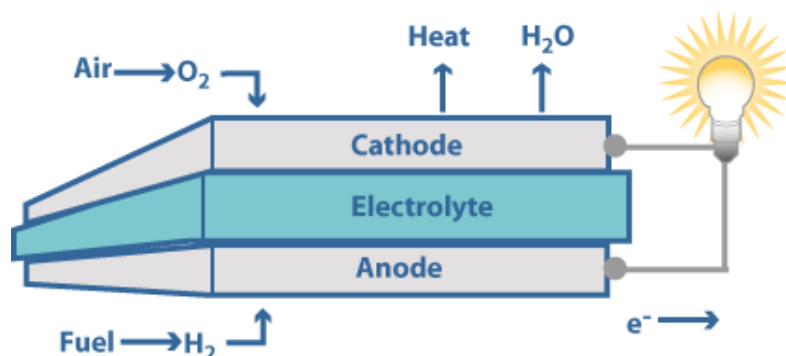
Πέραν, βέβαια, των κυψελών καυσίμου, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε αεριοστροβίλους υδρογόνου και σε μηχανές εσωτερικής καύσης (M.E.K.) με συγκεκριμένες τροποποιήσεις. Οι M.E.K. επιτυγχάνουν σημαντικά χαμηλότερους βαθμούς απόδοσης εν συγκρίσει με τις κυψέλες καυσίμου, χαρακτηρίζονται όμως από χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Συνεπώς, η ευρεία χρήση κυψελών καυσίμου προϋποθέτει σημαντική μείωση του κόστους επένδυσης και εγκατάστασης και αύξηση της διάρκειας ζωής με σκοπό η τεχνολογία αυτή να αποτελέσει μία οικονομικά ανταγωνιστική επιλογή στον τομέα της παραγωγής ισχύος. [21]

#### 4.3.3.1 Συστήματα κυψελών καυσίμου

##### 4.3.3.1.1 Αρχές λειτουργίας και συνιστώσες

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή ηλεκτροχημικής μετατροπής της χημικής ενέργειας του καυσίμου και του οξειδωτικού σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο πιο κοινός τύπος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιεί τη χημική ενέργεια του υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, νερού και θερμότητας. [43] Συγκεκριμένα, άτομα υδρογόνου διαχωρίζονται σε ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια στο ηλεκτρόδιο της ανόδου με τη βοήθεια καταλύτη ( $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ ) και ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει μόνο στα ιόντα τη διέλευση διαμέσου αυτού προς το ηλεκτρόδιο της καθόδου. Από τη άλλη πλευρά, τα ηλεκτρόνια

περνούν στο ηλεκτρόδιο της καθόδου μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος με αποτέλεσμα η ροή των ηλεκτρονίων να δημιουργεί συνεχές ρεύμα. Στο ηλεκτρόδιο της καθόδου γίνεται ένωση του οξυγόνου, των ιόντων υδρογόνου και των ηλεκτρονίων με τη βοήθεια καταλύτη με αποτέλεσμα την παραγωγή νερού και θερμότητας ( $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ ). [43]



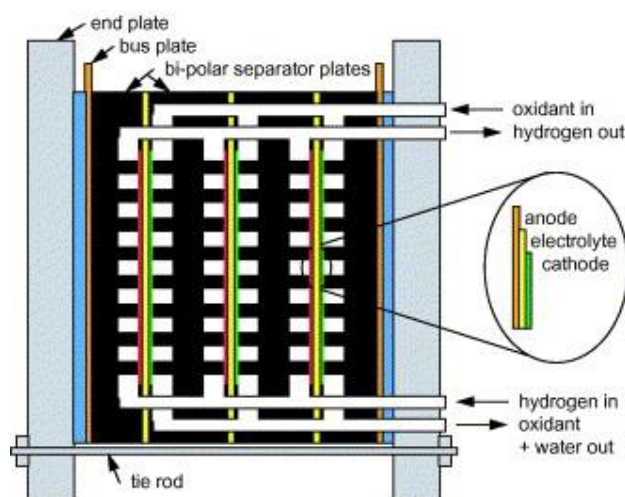
Σχήμα 4.16. Απεικόνιση συνιστωσών και λειτουργίας κυψέλης καυσίμου. [43]

Όσον αφορά στο σχεδιασμό ενός συστήματος κυψέλης καυσίμου, αυτός είναι σύνθετος και διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο και την εφαρμογή. Εντούτοις, τα περισσότερα συστήματα κυψελών καυσίμου αποτελούνται από τέσσερις κύριες συνιστώσες: συστοιχία κυψελών καυσίμου, επεξεργαστής καυσίμου, μετατροπέας ρεύματος, σύστημα ανάκτησης θερμότητας. Τα περισσότερα συστήματα περιλαμβάνουν επιπλέον συνιστώσες και υποσυστήματα που αφορούν στον έλεγχο της υγρασίας, της θερμοκρασίας, της πίεσης των αερίων και του παραγόμενου ύδατος. [42]

Η συστοιχία κυψελών καυσίμου αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος, καθώς εκεί παράγεται ηλεκτρική ενέργεια υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος ως αποτέλεσμα των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα. Μία μεμονωμένη κυψέλη καυσίμου συγκεντρώνει τη δυνατότητα παραγωγής περίπου 0,7 Volt, δηλαδή ηλεκτρικής ενέργειας που επαρκεί μόνο για εφαρμογές μικρής κλίμακας. Κατά συνέπεια, οι μεμονωμένες κυψέλες συνδέονται σε σειρά ή με παράλληλη σύνδεση με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής τάσης και παραγόμενης ισχύος. Μία τυπική συστοιχία κυψελών αποτελείται από περισσότερες των πενήντα κυψέλες καυσίμου και ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με το σχεδιασμό της συστοιχίας. Όσον αφορά στην παραγόμενη ισχύ, αυτή εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων και πιο συγκεκριμένα από τον τύπο της κυψέλης, το μέγεθος, τη θερμοκρασία λειτουργίας και την πίεση τροφοδοσίας των αερίων στην κυψέλη. [42], [44]

Οι βασικές συνιστώσες μίας συστοιχίας κυψελών καυσίμου είναι τα εξής: τα ηλεκτρόδια, ο ηλεκτρολύτης και επιπλέον συνιστώσες (διαχωριστικές

πλάκες και συλλέκτες ρεύματος) που απαιτούνται για τις ηλεκτρικές συνδέσεις, τη μόνωση και τη ροή του καυσίμου και του οξειδωτικού. Οι συλλέκτες ρεύματος άγουν ηλεκτρόνια από το ηλεκτρόδιο της ανόδου στις διαχωριστικές πλάκες, ενώ οι τελευταίες συνδέουν τις κυψέλες μεταξύ τους σε συστοιχία και διαχωρίζουν τη ροή οξειδωτικού της προηγούμενης κυψέλης από τη ροή του καυσίμου στην επόμενη. Συχνά, οι δύο συλλέκτες ρεύματος και η διαχωριστική πλάκα συνδυάζονται αποτελώντας μία μονάδα, που λέγεται διπολική πλάκα. [44]



Σχήμα 4.17. Συστοιχία κυψελών καυσίμου. [17]

Όσον αφορά στον επεξεργαστή καυσίμου, αυτός μετατρέπει το καύσιμο σε μορφή χρησιμοποιήσιμη από την κυψέλη. Σε περίπτωση που το σύστημα χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υδρογόνο (όπως στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία), δεν απαιτείται η χρήση επεξεργαστή και η χρήση του περιορίζεται μόνο αν είναι επιθυμητό το φιλτράρισμα ακαθαρσιών που περιλαμβάνονται στο αέριο υδρογόνο. Εάν, όμως, το σύστημα τροφοδοτείται με συμβατικά καύσιμα πλούσια σε υδρογόνο, τότε απαιτείται η χρήση αναμορφωτή για τη μετατροπή των υδρογονανθράκων σε ένα αέριο μίγμα ενώσεων υδρογόνου και άνθρακα. Το μίγμα αυτό αποστέλλεται στη συνέχεια σε έναν άλλον αντιδραστήρα για την αφαίρεση των ακαθαρσιών, προτού καταλήξει στη συστοιχία των κυψελών καυσίμου. Αυτή η διεργασία αποτρέπει την ένωση των περιλαμβανόμενων στο αέριο καύσιμο ακαθαρσιών με τους καταλύτες των κυψελών καυσίμου, γεγονός το οποίο θα οδηγούσε σε μείωση της αποδοτικότητας και της διάρκειας ζωής των κυψελών. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι σε κυψέλες με υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας όπως οι MCFC και SOFC, η αναμόρφωση του καυσίμου είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό των κυψελών. Τόσο η εσωτερική όσο και η εξωτερική αναμόρφωση του καυσίμου απελευθερώνουν ποσότητες διοξειδίου

του άνθρακα, οι οποίες ωστόσο είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των μηχανών εσωτερικής καύσης βενζινοκίνητων οχημάτων. [42]

Για τη μετατροπή της ισχύος στα συστήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται αντιστροφείς συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα, διότι ως έξοδος κάθε κυψέλης προκύπτει συνεχές ρεύμα ενώ τα φορτία καταναλώνουν εναλλασσόμενο. Σκοπός του συστήματος μετατροπής της ισχύος είναι η κατάλληλη ρύθμιση των χαρακτηριστικών του παραγόμενου ρεύματος, ώστε να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία των διαφόρων καταναλώσεων. Τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή του αντιστροφέα είναι τα εξής: ενεργειακή απόδοση, αξιοπιστία, κόστος, αρμονικές παραμορφώσεις και η συμβατότητα με τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου. Η χρήση του συστήματος μετατροπής ισχύος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κυψελών καυσίμου, η οποία ωστόσο είναι της τάξεως του 2-6%. [42]

Τέλος, όπως είναι γνωστό, τα συστήματα κυψελών καυσίμου δεν χρησιμοποιούνται πρώτιστα για την παραγωγή θερμότητας. Εντούτοις, δεδομένου ότι παράγονται σημαντικές ποσότητες θερμότητας από κάποια συστήματα και ειδικά από αυτά που παρουσιάζουν υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, η θερμότητα αυτή μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού ή θερμού νερού είτε να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω αεριοστροβίλου ή άλλης τεχνολογίας. Η χρήση της εκλυόμενης κατά τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου θερμότητας συντελεί στην αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος. [42]

#### 4.3.3.1.2 Θερμοδυναμική ανάλυση κυψέλης καυσίμου

Η θεωρητική τάση ανά κελί ( $E^0$ , Volt) για την κυψέλη καυσίμου δίδεται από τη διαίρεση της ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs  $\Delta G^0$  σε θερμοκρασία 25°C και ατμοσφαιρική πίεση προς τη ροή του φορτίου των δύο ηλεκτρονίων ( $n_e$ ) που περνούν από το εξωτερικό κύκλωμα και τη σταθερά F του Faraday:

$$E^0 = \frac{\Delta G^0}{n_e \cdot F}$$

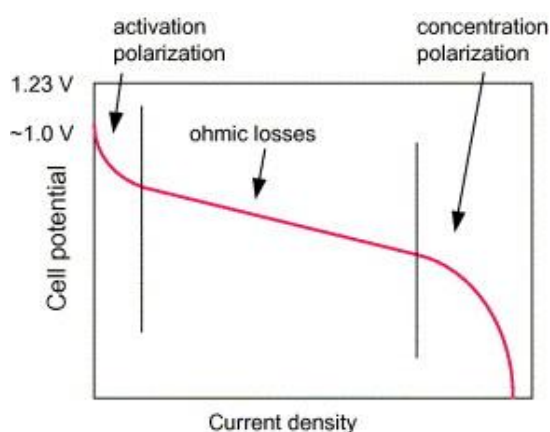
Η θεωρητική τάση στις παραπάνω συνθήκες ισούται με 1,229 Volt, ωστόσο μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και την πίεση και συγκεκριμένα, μειώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες (1,0 Volt στους 1000K κατά προσέγγιση) και αυξάνεται σε υψηλότερες πιέσεις και συγκεντρώσεις αντιδρώντων.

Η πραγματική τάση (V) μίας κυψέλης καυσίμου είναι μικρότερη λόγω απωλειών ενεργοποίησης ( $V_{act}$ ), ωμικών απωλειών ( $V_{ohmic}$ ) και απωλειών συγκέντρωσης ( $V_{conc}$ ). Ενώ οι ωμικές απώλειες είναι ανάλογες του ρεύματος, η σχέση μεταξύ απωλειών ενεργοποίησης και πυκνότητας ρεύματος

εκφράζεται με μία λογαριθμική συνάρτηση με αποτέλεσμα οι απώλειες αυτές να εμφανίζονται ιδιαίτερα σε χαμηλές τιμές της πυκνότητας ρεύματος. Τέλος, οι απώλειες συγκέντρωσης αποτελούν μία εκθετική συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος και κατά συνέπεια εμφανίζονται σε υψηλές τιμές της πυκνότητας. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη όλες τις απώλειες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, η πραγματική της τάση δίδεται από τη σχέση:

$$V = E^0 - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc}$$

με συνήθεις τιμές στο εύρος 0,6-0,8 Volt. Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη επιτυγχάνουν τις μέγιστες δυνατές τιμές πυκνότητας ρεύματος που κυμαίνονται μεταξύ 1-2 mA/cm<sup>2</sup> σε τάση 0,6 Volt με τροφοδοσία πεπιεσμένου αέρα και υδρογόνου. [17], [45]



Σχήμα 4.18. Τυπική καμπύλη πόλωσης κυψέλης καυσίμου. [17]

Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου είναι συνάρτηση της πραγματικής τάσης. Ως θεωρητικός βαθμός απόδοσης ορίζεται το μέγεθος:

$$n_{theoretical} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H}$$

όπου  $\Delta H$  η ανώτερη ή κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του υδρογόνου. Ορίζοντας το θεωρητικό βαθμό απόδοσης με βάση την ανώτερη θερμογόνο ικανότητα του υδρογόνου, αυτός προκύπτει κατά προσέγγιση ίσος με 98%, ενώ εάν χρησιμοποιηθεί η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα λαμβάνουμε μία τιμή κατά προσέγγιση ίση με 83%. Ωστόσο, από τη στιγμή που η πραγματική τάση είναι μικρότερη της θεωρητικής, ο πραγματικός βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος του θεωρητικού και προκύπτει ως γινόμενο επιμέρους βαθμών απόδοσης. Συγκεκριμένα, προκύπτει ως το γινόμενο των: α) θερμικού βαθμού

απόδοσης  $n_{Th} = \frac{\Delta G_r}{\Delta H_{fuel}}$ , όπου  $\Delta G_r = \Delta G^0 + RT \ln Q$  με  $Q = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$  και οι

συντελεστές της τελευταίας σχέσης προκύπτουν από τη εξίσωση της χημικής αντίδρασης  $aA + bB \rightarrow cC + dD$  που συντελείται στην κυψέλη καυσίμου, β) βαθμού απόδοσης τάσης  $n_V = \frac{V}{E^0}$ , γ) βαθμού απόδοσης Faraday  $n_F = \frac{I}{nFm}$ , δηλαδή του λόγου του πραγματικού ρεύματος που ρέει στο κύκλωμα της κυψέλης προς αυτό που αντιστοιχεί στο ρυθμό κατανάλωσης των αντιδρώντων (με  $m$  [moles/s] συμβολίζεται ο ρυθμός κατανάλωσης των αντιδρώντων), δ) βαθμού απόδοσης καυσίμου  $\eta_U$  που αντιπροσωπεύει το λόγο της ποσότητας του πραγματικά καταναλισκόμενου καυσίμου προς το παρεχόμενο καύσιμο στην κυψέλη καυσίμου. [17], [45]

#### 4.3.3.1.3 Τύποι κυψελών καυσίμου

Το συνηθέστερο κριτήριο με βάση το οποίο γίνεται η κατηγοριοποίηση των κυψελών καυσίμου είναι το υλικό του ηλεκτρολύτη. Ο χρησιμοποιούμενος ηλεκτρολύτης καθορίζει το είδος των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν μέρος, το απαιτούμενο καύσιμο και άλλους παράγοντες, χαρακτηριστικά τα οποία με τη σειρά τους καθορίζουν τις εφαρμογές για τις οποίες κάθε τύπος κυψέλης είναι καταλληλότερος. Με βάση αυτό το κριτήριο διαχωρισμού, διακρίνονται έξι τύποι κυψελών καυσίμου καθένας από τους οποίους βρίσκεται σε διαφορετικό στάδιο ανάπτυξης:

1. κυψέλες πολυμερικού ηλεκτρολύτη (PEMFC)
2. κυψέλες αλκαλικού ηλεκτρολύτη (AFC)
3. κυψέλες φωσφορικού οξέος (PAFC)
4. κυψέλες τηγμένων καρβιδίων (MCFC)
5. κυψέλες ηλεκτρολύτη στερεών οξειδίων (SOFC)
6. κυψέλες μεθανόλης (DMFC).

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται κάποια βασικά κατασκευαστικά και λειτουργικά στοιχεία των πέντε πρώτων τύπων κυψελών καυσίμου, καθώς οι κυψέλες μεθανόλης αποτελούν συγκριτικά μία νέα τεχνολογία, για την οποία η έρευνα υπολείπεται κατά 3-4 χρόνια των υπολοίπων τεχνολογιών. [46], [47]

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ηλεκτρολύτης	Στερεή πολυμερική μεμβράνη	Υδροξείδιο του καλίου	Πυκνό διάλυμα φωσφορικού οξέος	Τηγμένα μεταλλικά καρβίδια	Κεραμικά υλικά στερεών οξειδίων

Καταλύτης	Pt / Ru	Pt / Pd	Pt	Ni / NiO	Δεν απαιτείται
Οξειδωτικό	O <sub>2</sub> / αέρας	O <sub>2</sub> / αέρας	O <sub>2</sub> / αέρας	CO <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> / αέρας	O <sub>2</sub> / αέρας
Καύσιμο	H <sub>2</sub> / αναμορφωμένο καύσιμο	H <sub>2</sub> / αναμορφωμένο καύσιμο	H <sub>2</sub> / αναμορφωμένο καύσιμο	H <sub>2</sub> / CO / αναμορφωμένο καύσιμο	H <sub>2</sub> / CO <sub>2</sub> / CH <sub>4</sub> / αναμορφωμένο καύσιμο
Αγώγιμο ιόν	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	80-100	100-250	150-220	600-700	600-1000
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (% HHV) (Συμπαγωγικός)	40-55 (70-80)	50-70 (>80)	35-45 (>85)	45-47 (>80)	35-43 (<90)
Τυπική ισχύς (kW)	1-450	10-100	50 kW – 1 MW	<1 kW - 1 MW	<1 kW - 3 MW
Στάδιο ανάπτυξης	Εμπορικά διαθέσιμες (παραγωγή πρωτοτύπων)	Εμπορικά διαθέσιμες (ώριμη τεχνολογία)	Εμπορικά διαθέσιμες (ώριμη τεχνολογία)	Εμπορικά διαθέσιμες (παραγωγή πρωτοτύπων)	Εμπορικά διαθέσιμες (παραγωγή πρωτοτύπων)
Μέση διάρκεια ζωής (h)	18000-25000	1200-18000	N/A	20000	15000-20000
Κόστος επένδυσης (€/kW)	3100-4700	N/A	2000-3500	2700-4200	3000

Πίνακας 4.3. Συγκριτικά στοιχεία πέντε τύπων κυψελών καυσίμου. [42],[46]

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερούς και αλκαλικού ηλεκτρολύτη ισχύος μερικών εκατοντάδων kW κρίνονται κατάλληλες για εφαρμογές σε αυτόνομα συστήματα όπως το εξεταζόμενο υβριδικό σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου λόγω του χαμηλού χρόνου απόκρισης και του γεγονότος ότι καταναλώνουν οξυγόνο υψηλής καθαρότητας. Πέραν αυτών τύπων κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται και οι κυψέλες τηγμένων καρβιδίων και στερεών οξειδίων οι οποίες, ωστόσο, δεν θα μελετηθούν περαιτέρω στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας λόγω της χρησιμοποίησης φυσικού αερίου ή άλλων υδρογονανθράκων ως καύσιμο. [21]



### Κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου PEM χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη μία πολυμερή μεμβράνη στερεής μορφής, η οποία επιτρέπει τη διέλευση των ιόντων υδρογόνου από την άνοδο στην κάθοδο. Το υλικό κατασκευής της μεμβράνης είναι το Nafion™, το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρεία DuPont. Όσον αφορά στα ηλεκτρόδια, αυτά κατασκευάζονται από πορώδη άνθρακα και περιέχουν καταλύτη από λευκόχρυσο ή ρουθίνιο. Ως είσοδος στις κυψέλες αυτού του τύπου παρέχεται υδρογόνο και οξυγόνο (ή ατμοσφαιρικός αέρας), αέρια τα οποία πρέπει να υγρανθούν ούτως ώστε να λειτουργήσει ο ηλεκτρολύτης, ενώ σε περίπτωση συμπίεσης του αέρα πριν την τροφοδοσία επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης της κυψέλης.

Οι κυψέλες πολυμερούς ηλεκτρολύτη χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος και πλεονεκτούν λόγω του μικρού βάρους και όγκου τους έναντι των υπόλοιπων τύπων κυψελών καυσίμου. Οι κυψέλες PEM λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα σε θερμοκρασία που κυμαίνεται περί τους 80°C λόγω των περιορισμών που αίρονται από τις θερμικές ιδιότητες της μεμβράνης. Η λειτουργία τους σε χαμηλή θερμοκρασία τους επιτρέπει την επίτευξη μικρών χρόνων απόκρισης (λόγω μικρότερου χρόνου προθέρμανσης) και προκαλεί λιγότερη φθορά στις συνιστώσες του συστήματος με αποτέλεσμα την επέκταση του χρόνου ζωής τους. Εντούτοις, αυτή η τεχνολογία απαιτεί τη χρήση καταλύτη από ευγενή μέταλλα (συνήθως από λευκόχρυσο) για τη διάσπαση του μοριακού υδρογόνου σε ηλεκτρόνια και ιόντα υδρογόνου με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους του συστήματος. Ο καταλύτης λευκόχρυσου είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε δηλητηρίαση από μονοξειδίο του άνθρακα, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση διάταξης για τη μείωση του περιεχόμενου στο αέριο καύσιμο μονοξειδίου σε περίπτωση που το υδρογόνο προέρχεται από αναμόρφωση καυσίμου. Η προσθήκη μίας τέτοιας διάταξης προσθέτει στο συνολικό κόστος του συστήματος, ωστόσο δεν αφορά στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Τέλος, όσον αφορά στη διάρκεια ζωής και το κόστος τους, αυτές πρέπει να εξελιχθούν περαιτέρω ούτως ώστε να φτάσουν τις 40.000 ώρες λειτουργίας πριν αντικατασταθούν και το κόστος τους να μειωθεί σημαντικά φθάνοντας στα \$400-750 για διάθεση στην αγορά και τα \$1000 για αρχικές εφαρμογές.

Πλήθος επιχειρήσεων συμμετέχουν στην κατασκευή κυψελών καυσίμου PEM με την Ballard να θεωρείται ο ηγέτης στον τομέα, αν και επιχειρήσεις όπως η DeNora στην Ιταλία έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής των κυψελών PEM σε συστήματα παραγωγής ισχύος μικρής κλίμακας όπου βρίσκουν ευρεία

εφαρμογή οι PAFC και όπου η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση χώρων ή νερού χρήσης. [21], [47], [48], [49]

### Κυψέλες καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη (AFC)

Αποτελούν την παλαιότερη τεχνολογία κυψελών καυσίμου και χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) σε νερό και πλήθος μετάλλων ως καταλύτη στην άνοδο και την κάθοδο. Οι υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες αλκαλικού ηλεκτρολύτη λειτουργούν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 100°C και 250°C, ενώ AFC πιο σύγχρονου σχεδιασμού μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και κατά προσέγγιση μεταξύ 23°C και 70°C.

Αν και πολλά συστήματα κυψελών καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη λειτούργησαν ιδιαίτερα καλά σε πιλοτικές εφαρμογές κατά τις δεκαετίες του 1960 και 1970, προβλήματα όπως το κόστος, η αξιοπιστία, η ευκολία χρήσης και η ασφάλεια δεν έβρισκαν τόσο εύκολα λύση. Όταν έγιναν προσπάθειες ώστε να λυθούν τα προβλήματα αυτά, διαπιστώθηκε ότι κατά τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο οι κυψέλες καυσίμου δεν μπορούσαν να ανταγωνιστούν με τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ισχύος με αποτέλεσμα η έρευνα σταδιακά να ελαττωθεί σημαντικά. Επιπλέον, η επιτυχημένη είσοδος των κυψελών PEM τα τελευταία χρόνια στην αγορά έχει προκαλέσει περαιτέρω ελάττωση του ενδιαφέροντος για τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου και τώρα πολύ λίγες επιχειρήσεις ή ερευνητικές ομάδες εργάζονται στον τομέα αυτό.

Χρησιμοποιούνται συχνά σε απομονωμένα συστήματα, ενώ αρχικά χρησιμοποιούνταν σε διαστημικές εφαρμογές με βαθμούς απόδοσης περί το 60%. Η υψηλή αποδοτικότητα των κυψελών αλκαλικού ηλεκτρολύτη οφείλεται στο ρυθμό με τον οποίο λαμβάνουν χώρα οι χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου. Επίσης, η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι η υπέρταση κατά την ενεργοποίηση της καθόδου είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη κατά τη χρήση ηλεκτρολύτη οξέος. Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα αυτού του τύπου κυψελών καυσίμου είναι η ευαισθησία που παρουσιάζουν σε δηλητηρίαση από διοξείδιο του άνθρακα με επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής της κυψέλης και ως εκ τούτου την αύξηση του κόστους. Στην πραγματικότητα, ακόμη και μικρή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα μπορεί να έχει επιπτώσεις στη λειτουργία της κυψέλης, που καθιστά απαραίτητο τον καθαρισμό του υδρογόνου και του οξυγόνου με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση του κόστους. Όσον αφορά στη διάρκεια ζωής τους, αυτές παρουσιάζουν σταθερή λειτουργία από 1.200-18.000 ώρες ανάλογα με την εφαρμογή, μέγεθος το οποίο πρέπει να αυξηθεί τουλάχιστον στις 40.000 ώρες για να είναι η τεχνολογία οικονομικά βιώσιμη σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Αυτό το

διάστημα δεν έχει επιτευχθεί ακόμα λόγω προβλημάτων διάρκειας ζωής των υλικών και το θέμα αυτό αποτελεί το σημαντικότερο εμπόδιο στην εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας αυτής.

Εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας για παραγωγή ισχύος σε αυτόνομα συστήματα με χρήση νερού που έχει προέλθει από ηλεκτρολυτική διάταξη τροφοδοτούμενη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δίνει τη δυνατότητα παράκαμψης κάποιων σημαντικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο τύπος των κυψελών αυτών. Αυτό συμβαίνει καθότι η παραγωγή του υδρογόνου και του οξυγόνου γίνεται στην τοποθεσία κατανάλωσής τους και σε συνδυασμό με το πλήθος πλεονεκτημάτων που χαρακτηρίζουν οι κυψέλες αλκαλικού ηλεκτρολύτη, υπάρχει πιθανότητα αυτές να έλθουν και πάλι στο προσκήνιο. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους σε σχέση με τις κυψέλες PEM είναι το χαμηλό τους κόστος, καθώς σύμφωνα με κατασκευαστές τους το κόστος των υλικών μίας συστοιχίας δεν ξεπερνά τα 200 €/kW. [21], [47], [48], [49]

#### Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος θεωρούνται ως η πρώτη γενιά των σύγχρονων κυψελών καυσίμου. Περιλαμβάνεται στην κατηγορία των πιο ώριμων τεχνολογιών και ήταν η πρώτη που διατέθηκε στην αγορά σε ευρεία κλίμακα. Χρησιμοποιούν πυκνό διάλυμα φωσφορικού οξέος ως ηλεκτρολύτη και πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα που περιέχουν καταλύτη λευκόχρυσου. Λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 150-220°C και παράγουν θερμότητα ικανή για χρήση σε συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας.

Σε περίπτωση συμπαραγωγής οι κυψέλες φωσφορικού οξέος παρουσιάζουν βαθμούς απόδοσης που κυμαίνονται στο 85%, ενώ ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης υπολογισμένος με βάση την LHV του υδρογόνου κυμαίνεται μεταξύ 35%-45%. Κατά συνέπεια, είναι ελαφρώς αποδοτικότερες από τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με καύση και οι οποίες χαρακτηρίζονται από βαθμούς απόδοσης μεταξύ 33%-35%. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι δεν παρουσιάζουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης, οι κυψέλες αυτές χρησιμοποιούνται σε πλήθος πιλοτικών εφαρμογών, διότι είναι πολύ ανεκτικές στις περιλαμβανόμενες στα αναμορφωμένα ορυκτά καύσιμα ακαθαρσίες και πιο συγκεκριμένα στο διοξείδιο του άνθρακα. Συνεχίζοντας την αναφορά των μειονεκτημάτων του συγκεκριμένου τύπου κυψελών, οι κυψέλες αυτές παράγουν λιγότερη ισχύ σε σχέση με κυψέλες ίδιους βάρους και όγκου. Κατά συνέπεια, η παραγωγή της επιθυμητής ισχύος συνεπάγεται χρησιμοποίηση ιδιαίτερα μεγάλων και βαρέων κυψελών. Τέλος, οι κυψέλες φωσφορικού οξέος παρουσιάζουν

υψηλό κόστος καθώς απαιτούν τη χρήση καταλύτη λευκόχρυσου όπως και οι κυψέλες PEM με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους του συστήματος.

Η Onsi, τμήμα της International Fuel Cells (IFC), έχει πωλήσει πάνω από 100 τεμάχια των συστημάτων της PC25 ισχύος 200 kW σε μια τιμή σημαντικά υψηλότερη από αυτή των ανταγωνιστικών της τεχνολογιών. Ωστόσο, καταβάλλονται προσπάθειες με σκοπό να μειώσει την τιμή σε περίπου \$1,500/kW από το τωρινό επίπεδο των \$3,000/kW κατά τη διάρκεια των επόμενων χρόνων.

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος δεν θεωρούνται ως ελκυστική επιλογή για χρήση σε αυτόνομα συστήματα παραγωγής ισχύος που τροφοδοτούνται κυρίως από ανανεωμένες πηγές ενέργειας, επειδή χρησιμοποιούν υδρογονάνθρακες ως καύσιμο (όχι απαραίτητως), οι οποίοι όμως δεν είναι διαθέσιμοι στην τοποθεσία εγκατάστασης του συστήματος. Επιπλέον, παρουσιάζουν μεγάλους χρόνους απόκρισης, το οποίο αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για τέτοιες εφαρμογές. [21], [47], [48], [49]

#### 4.3.3.2 Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μια τυπική μηχανή εσωτερικής καύσης με κάποιες μικρές τροποποιήσεις, οι οποίες όμως έχουν ως αποτέλεσμα την ελάττωση του βαθμού απόδοσης που αυτή επιτυγχάνει. Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των συμβατικών Μ.Ε.Κ. και των Μ.Ε.Κ. υδρογόνου είναι η υψηλότερη αναφλεξιμότητα του υδρογόνου στον αέρα. Κατά συνέπεια, απαιτείται λιγότερη ενέργεια για την ανάφλεξη του μίγματος καυσίμου-αέρα, το οποίο αξίζει να σημειωθεί ότι καίγεται σε μεγαλύτερο εύρος συγκεντρώσεων και ότι ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα-καυσίμου είναι κατά προσέγγιση ίσος με 34,3. Εν συγκρίσει, λοιπόν, με το μίγμα αέρα-καυσίμου μίας συμβατικής μηχανής, το αντίστοιχο ισοδύναμο μίγμα σε μία μηχανή υδρογόνου παρουσιάζει χαμηλότερη θερμογόνο ικανότητα. Συνεπώς, ο βαθμός πλήρωσης (ογκομετρικός βαθμός απόδοσης) της μηχανής ελαττώνεται σε περίπτωση λειτουργίας της με καύσιμο υδρογόνο με απόρροια την παραγωγή μικρότερης ισχύος και ροπής κατά 20-40%. Υπάρχουν διάφορες τροποποιήσεις που μπορούν να υιοθετηθούν, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους, προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση μίας Μ.Ε.Κ. υδρογόνου. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν:

- χρήση υπερπληρωτή ή στροβιλοσυμπιεστή
- εφαρμογή άμεσου ψεκασμού (ψεκασμός στο εσωτερικό των κυλίνδρων)
- ανάμιξη αερίου υδρογόνου με τον απορροφώμενο αέρα.

Με τον άμεσο ψεκασμό υδρογόνου στο εσωτερικό του κυλίνδρου, η μέγιστη ισχύς μπορεί να είναι μέχρι και 17% υψηλότερη από την τροποποιηθείσα συμβατική μηχανή. [50]

Όσον αφορά στην χαμηλή τιμή της ελάχιστης ενέργειας ανάφλεξης του υδρογόνου, αυτή οδηγεί σε δυσκολίες στην παρεμπόδιση φαινομένων προανάφλεξης σε υψηλής θερμοκρασίας περιοχές του θαλάμου καύσης. Η προανάφλεξη προκαλεί μείωση της παραγόμενης ισχύος και ροπής. Συνεπώς, κατά την τροποποίηση μιας υπάρχουσας συμβατικής μηχανής για τη μετάβασή της σε λειτουργία με υδρογόνο οφείλουν να ληφθούν κάποια μέτρα προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισης προανάφλεξης:

- βελτιωμένη ψύξη θαλάμου καύσης
- επίτευξη κατάλληλου χρονισμού με σκοπό τη μείωση των παγιδευμένων καταλοίπων καύσης στο θάλαμο καύσης
- επίτευξη χαμηλών θερμοκρασιών ψεκασμού.

Αν και η χρήση του υδρογόνου σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης εκμηδενίζει ουσιαστικά τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, CO και HC, παραμένει το πρόβλημα των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Ο σχηματισμός αυτών οφείλεται στην εξάρτηση από τη θερμοκρασία καύσης και ως εκ τούτου από το λόγο αέρος-καυσίμου. Μέθοδοι που μπορούν να υιοθετηθούν προκειμένου να κρατηθούν οι εκπομπές NO<sub>x</sub> μέσα στα όρια των κανονισμών είναι οι εξής:

- λειτουργία με όσο το δυνατόν φτωχότερο μίγμα (λόγος ισοδυναμίας αέρα καύσης μεγαλύτερος του 1,8)
- επανακυκλοφορία καυσαερίων
- μείωση της θερμοκρασίας ψεκασμού του υδρογόνου
- βελτιστοποίηση του συστήματος ψύξης της μηχανής
- βελτιστοποίηση χρονισμού ψεκασμού σε περίπτωση συστήματος μηχανής άμεσου ψεκασμού
- χρησιμοποίηση συστήματος επεξεργασίας των καυσαερίων
- απαραίτητη κρίνεται η χρήση καταλυτών αναγωγής οξειδίων του αζώτου τύπου LNT σε περίπτωση λειτουργίας με φτωχό μίγμα σε υψηλά φορτία
- χρήση τριοδικού καταλύτη σε περίπτωση επίτευξης στοιχειομετρικής καύσης. [50]

Η Vandenberg Hydrogen Systems εισήγαγε στην αγορά τις μηχανές εσωτερικής καύσης με καύσιμο το υδρογόνο, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην αγορά με ισχύ που κυμαίνεται μεταξύ 30-130 kW. Τα συστήματα H<sub>2</sub>CoGen είναι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, που αποδεικνύονται ως πιο αξιόπιστες και οικονομικές σε σχέση με τις κυψέλες

καυσίμου. Οι συγκεκριμένες μονάδες χαρακτηρίζονται από ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 35%, ενώ ο συμπαραγωγικός βαθμός απόδοσης ξεπερνά το 90%. Για λειτουργία της μηχανής σε μερικό φορτίο, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσής της μειώνεται σημαντικά κάτω από το μέγιστο 35%, γεγονός από το οποίο καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι Μ.Ε.Κ. είναι πιο κατάλληλες για χρήση σε εφαρμογές όπου το φορτίο βάσης είναι κατά προσέγγιση σταθερό, ενώ απαιτείται μεγάλο ποσό θερμότητας για την κάλυψη θερμικών αναγκών. [21]

#### 4.3.3.3 Αεριοστρόβιλοι υδρογόνου

Το υδρογόνο, πέραν της χρήσης του σε κυψέλες καυσίμου και μηχανές εσωτερικής καύσης, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο και σε αεριοστροβίλους. Σημαντικότερο πλεονέκτημα κατά τη χρήση υδρογόνου αποτελεί το γεγονός ότι συνεπάγεται πολύ καθαρή καύση με αποτέλεσμα την αποφυγή επικαθίσεων και φαινομένων διάβρωσης στα πτερύγια του στροβίλου, φαινόμενα τα οποία εμφανίζονται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων. Κατά συνέπεια, επιτρέπεται η εφαρμογή πολύ υψηλότερων θερμοκρασιών εισόδου στον στρόβιλο σε σχέση με τις αντίστοιχες κατά τη λειτουργία της μηχανής με καύση ορυκτών καυσίμων με αποτέλεσμα την επίτευξη μεγαλύτερων βαθμών απόδοσης. [21]

#### 4.3.3.4. Αξιολόγηση κρίσιμων παραμέτρων και επιλογή της κατάλληλης μονάδας χρήσης H<sub>2</sub> σε αποκεντρωμένα συστήματα

Η επιλογή της κατάλληλης μονάδας χρήσης υδρογόνου σε αποκεντρωμένα συστήματα προϋποθέτει αξιολόγησή τους όσον αφορά σε κάποιες κρίσιμες παραμέτρους: [21]

##### ➤ Βαθμός απόδοσης

Η αποδοτικότητα είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε αυτόνομα συστήματα με βάση το υδρογόνο. Οι κυψέλες καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη έχουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 50-70%, ενώ αυτός των κυψελών PEM βρίσκεται μεταξύ 40-55%. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών PEM περιορίζει το ποσό θερμότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Η τεχνολογία των κυψελών πρέπει να αναπτυχθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτραπεί η επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας και η κατασκευή αποτελεσματικότερων συστημάτων ανάκτησης θερμότητας με σκοπό την επίτευξη συμπαραγωγικού βαθμού απόδοσης που θα υπερβαίνει

το 80%. Όσον αφορά στις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος, αυτές παρουσιάζουν χαμηλότερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται από 35-45%. Τέλος, οι μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν συμπαραγωγικό βαθμό απόδοσης που ξεπερνά το 90%, ωστόσο υστερούν σημαντικά ως προς τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης συγκριτικά με αυτόν των κυψελών καυσίμου με τιμές μεταξύ 25-35%. [21], [49]

➤ Κόστος μονάδων χρήσης υδρογόνου

Το υψηλό κόστος των κυψελών καυσίμου θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα για την εισαγωγή αυτής της τεχνολογίας σε εφαρμογές παραγωγής ισχύος. Αυτήν την περίοδο, δεν υπάρχει μαζική παραγωγή κυψελών καυσίμου σε μεγάλη κλίμακα με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η κατασκευή οικονομικών μονάδων. Οι κατασκευαστές επιδιώκουν να παράγουν κυψέλες καυσίμου σε ανταγωνιστικές τιμές, δηλαδή σκοπεύουν στη μείωση του κόστους ούτως ώστε να φθάσει στα \$400-750/kW για διάθεση στην αγορά και τα \$1.000-1.500 ανά εγκατεστημένο kW για αρχικές εφαρμογές. Τυπικές τιμές των σημερινών κυψελών καυσίμου έχουν παρατεθεί στον συγκεντρωτικό πίνακα των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου. Ωστόσο, στο πραγματικό κόστος του κύκλου ζωής μίας κυψέλης καυσίμου πρέπει να συμπεριληφθεί και το κόστος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, της παραγόμενης θερμότητας, το κόστος συντήρησης και η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής της κυψέλης. [21], [49]

Το κόστος των μηχανών εσωτερικής καύσης υδρογόνου είναι συγκριτικά χαμηλό σε σχέση με αυτό των κυψελών καυσίμου, αλλά ακόμα αρκετά υψηλό κυμαινόμενο σε εύρος μεταξύ 1000-3000 €/kW ανάλογα με το μέγεθος. Επιπλέον, η χρήση Μ.Ε.Κ. υδρογόνου σε αυτόνομα συστήματα παραγωγής ισχύος προκαλεί την ανάγκη για εγκατάσταση μεγαλύτερων μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου, διότι οι μηχανές αυτές χαρακτηρίζονται από μικρότερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις κυψέλες. Η εγκατάσταση, ωστόσο, μεγαλύτερων μονάδων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους των μονάδων αυτών, που αποτελούν τους πιο καθοριστικούς παράγοντες όσον αφορά στο κόστος του συστήματος. [21]

➤ Διαθεσιμότητα συστήματος

Ο χρόνος εκκίνησης των κυψελών καυσίμου είναι σχετικά υψηλός. Συγκεκριμένα, πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι μία κυψέλη PEM ισχύος 500W χαρακτηρίζεται από χρόνο εκκίνησης που ανέρχεται μέχρι και στα 20 λεπτά. Αφετέρου, οι μηχανές εσωτερικής καύσης ως μία πιο ώριμη τεχνολογία καταδεικνύουν πιο αποδεκτούς χρόνους εκκίνησης. Η πιο κοινή λύση με

σκοπό να υπερνικηθεί το πρόβλημα της διαθεσιμότητας του συστήματος είναι η χρήση μπαταριών ούτως ώστε να καλυφθεί το φορτίο μέχρι οι κυψέλες καυσίμου να φθάσουν στη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους. [21]

➤ Διάρκεια ζωής

Οι σύντομης χρονικής διάρκειας εγγυήσεις που δίνονται από τους κατασκευαστές των κυψελών καυσίμου αποτελούν από τα κύρια προβλήματα σε συνδυασμό με το κόστος που πρέπει να αντιμετωπιστούν στη διαδρομή που πρέπει να καλυφθεί μέχρι την εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας. Οι κυψέλες καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις κυψέλες PEM λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής της πολυμερούς μεμβράνης. Αυτήν την περίοδο, οι κατασκευαστές κυψελών καυσίμου παρέχουν εγγυήσεις διάρκειας ζωής που δεν υπερβαίνουν τις 10.000 ώρες λειτουργίας, ενώ ο στόχος προς επίτευξη για σταθερές εφαρμογές είναι οι 40.000 ώρες λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, οι κατασκευαστές μηχανών εσωτερικής καύσης παρέχουν εγγυήσεις πολύ μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας. [21]

➤ Ασφάλεια

Οι κυψέλες καυσίμου και οι μηχανές εσωτερικής καύσης θεωρούνται ασφαλείς υπό τον όρο ότι κατασκευάζονται σύμφωνα με τους διεθνείς κώδικες και πρότυπα. Για τις κυψέλες καυσίμου απαιτείται η θέσπιση ενιαίων προδιαγραφών ασφαλείας, γεγονός το οποίο καθυστερεί την εισαγωγή των τεχνολογιών υδρογόνου στην αγορά. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου, αντιπροσωπεύοντας μία πιο ώριμη τεχνολογία, αποτελούν μία ασφαλέστερη λύση για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. [21]

➤ Φυσικό μέγεθος

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν συμπαγείς συσκευές και καταλαμβάνουν σχετικά μικρό χώρο, το οποίο είναι ένα πλεονέκτημα σε εφαρμογές όπου ο χώρος που καταλαμβάνεται από τη μονάδα παραγωγής ισχύος αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Για παράδειγμα, η δανέζικη εταιρεία IRD κατασκευάζει μία κυψέλη καυσίμου πολυμερούς μεμβράνης ισχύος 2,5 kW εμβαδού βάσης 0,6 x 0,6m<sup>2</sup>. [21]

#### 4.4 Εφαρμογές-Υπάρχοντες υβριδικοί σταθμοί αποθήκευσης υδρογόνου

Πλήθος πιλοτικών υβριδικών πάρκων ανανεώσιμων πηγών παραγωγής ενέργειας-αποθήκευσης υδρογόνου έχουν κατασκευασθεί ή είναι



υπό κατασκευή ανά τον κόσμο. Στη συνέχεια, θα αναφερθούν τα βασικότερα εξ αυτών και οι συνιστώσες που τα αποτελούν.

### Πάρκο Utsira

Η Norsk Hydro σε συνεργασία με την Enercon ανέπτυξε ένα υβριδικό πάρκο αιολικής παραγωγής-αποθήκευσης υδρογόνου ως πιλοτικό έργο στο νησί Utsira της Νορβηγίας, στο οποίο υπάρχει η φιλοδοξία να ηλεκτροδοτείται αυτόνομα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το αυτόνομο αυτό σύστημα στοχεύει στην κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής κατανάλωσης και του φορτίου αιχμής 10 πελατών με την απαίτηση η ποιότητα ισχύος που επιτυγχάνεται, να είναι συγκρίσιμη με αυτήν που παρέχεται στην παρούσα φάση στο νησί από την ηπειρωτική χώρα μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου.

Σύμφωνα με τους παραπάνω περιορισμούς, αποφασίστηκε η επιλογή των εξής συνιστωσών για την κατασκευή του συστήματος: ανεμογεννήτρια ισχύος 600 kW, μπαταρία χωρητικότητας 50 kWh, σφόνδυλος χωρητικότητας 5 kWh και μέγιστης ισχύος 200 kW, σύγχρονη γεννήτρια ισχύος 100 kVA, μονάδα ηλεκτρόλυσης παροχής 10 Nm<sup>3</sup>/h και ισχύος 48 kW, μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου όγκου 12m<sup>3</sup> σε πίεση 200 bar (2.400Nm<sup>3</sup>), κυψέλη καυσίμου ισχύος 10 kW και M.E.K. υδρογόνου ισχύος 55 kW. [22]

### Stralsund

Το πανεπιστήμιο του Stralsund ίδρυσε τη δεκαετία του 1990 ένα εργαστήριο ενεργειακών συστημάτων, το οποίο περιλαμβάνει μεγάλο εύρος συστημάτων ενεργειακής μετατροπής. Τμήμα του εργαστηρίου αποτελεί και το σύστημα ανεμογεννήτριας-ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου. Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι ο προσδιορισμός των κρίσιμων παραμέτρων για την παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης και της μεταβαλλόμενης χρονικά αιολικής ενέργειας. Το σύστημα αυτό δεν λειτουργεί και ως αυτόνομο σύστημα παραγωγής ισχύος με καύσιμο υδρογόνο, αλλά εντούτοις αποτελεί ένα από τα ελάχιστα συστήματα που χρησιμοποιηθούν την αιολική ενέργεια για την παραγωγή υδρογόνου.

Οι συνιστώσες που το αποτελούν είναι οι εξής: ανεμογεννήτρια 100 kW, αλκαλική ηλεκτρολυτική μονάδα διπολικής διάταξης ισχύος 20 kW και μέγιστης πίεσεως 25 bar (ELWATEC GmbH), ως αποθηκευτική μονάδα χρησιμοποιεί χαλύβδινη φιάλη 8m<sup>3</sup> με πίεση 25 bar (200Nm<sup>3</sup>) και κυψέλη καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη ισχύος 400 W. Η ανεμογεννήτρια έχει ονομαστική ισχύ 100 kW, ωστόσο ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, η ασύγχρονη γεννήτρια δύο ταχυτήτων (1.000rpm και 1.500rpm) μπορεί να παράγει αντιστοίχως 20 kW και 100 kW. Η ονομαστική ισχύς επιτυγχάνεται σε

ταχύτητα ανέμου 12m/s και η απόδοση της ηλεκτρολυτικής μονάδας ανέρχεται στο 80% υπολογισμένο με βάση την ανώτερη θερμογόνο ικανότητα. [21], [22]

## RES2H2

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας και υδρογόνου σε βιομηχανική κλίμακα είναι ο στόχος του χρηματοδοτημένου από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή προγράμματος RES2H2. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει την κατασκευή πιλοτικού σταθμού σε δύο τοποθεσίες και συγκεκριμένα, στα Κανάρια νησιά της Ισπανίας και την Αττική. Το πρώτο πάρκο στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της παραγόμενης αιολικής ενέργειας παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο, παράγοντας πόσιμο νερό μέσω εγκαταστάσεων αντίστροφης ώσμωσης και υδρογόνο μέσω μίας μονάδας ηλεκτρόλυσης, το οποίο θα αποθηκεύεται και εν συνεχεία θα χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου. Το ελληνικό πάρκο μελετά τη δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου μέσω αιολικής ενέργειας σε περίπτωση που αυτή δεν είναι δυνατόν να παραληφθεί από τις γραμμές μεταφοράς και επιπλέον εξετάζει την απόδοση των τεχνολογιών παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου σε συνθήκες μεταβλητής ισχύος.

Το ελληνικό πάρκο αποτελείται από τις εξής συνιστώσες: ανεμογεννήτρια 500 kW, αλκαλική ηλεκτρολυτική μονάδα ισχύος 25 kW και μέγιστης πίεσης 20 bar (Casale Chemicals), συμπιεστή υδρογόνου με πιέσεις εισόδου-εξόδου 14-220 bar, 6 δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων συνολικού όγκου 40Nm<sup>3</sup> και έναν σταθμό πλήρωσης-εμφιάλωσης υδρογόνου, όπου το υδρογόνο πληρώνει φιάλες συνολικού όγκου 700 λίτρων σε πίεση 220 bar. Μετά την έξοδο από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, το παραγόμενο υδρογόνο θα υποβάλλεται σε καθαρισμό προτού εισαχθεί σε μία ενδιάμεση δεξαμενή αποθήκευσης, η οποία διευκολύνει τη λειτουργία του συμπιεστή. Εν συνεχεία, μέρος του παραχθέντος υδρογόνου αποθηκεύεται στις δεξαμενές μεταλλικών υδριδίων, ενώ το υπόλοιπο συμπιέζεται και οδηγείται στο σταθμό πλήρωσης. [22]

## FIRST project

Η εταιρεία INTA κατασκεύασε το 1989 ένα υβριδικό πάρκο ηλιακής παραγωγής ενέργειας-υδρογόνου και το οποίο αρχικά αποτελείτο από δύο κύριους στόχους: πρώτον, την μελέτη της δυνατότητας αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας υπό τη μορφή υδρογόνου και δεύτερον, τη δυνατότητα της χρήση συστημάτων που αποτελούνταν από φωτοβολταϊκά, μονάδες ηλεκτρόλυσης και αποθήκευσης υδρογόνου και κυψέλες καυσίμου για εφαρμογή σε επανδρωμένες διαστημικές αποστολές. Από το 1994 και έπειτα,

οι υπεύθυνοι του προγράμματος περιορίστηκαν στη μελέτη του πρώτου στόχου όπως και στη δυνατότητα της χρήσης του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών. Το πάρκο αποτελείται από τις εξής συνιστώσες: 144 φωτοβολταϊκά πάνελ BP 260S συνολικής ισχύος 8,5 kW, αλκαλική ηλεκτρολυτική μονάδα ισχύος 5,2 kW και πίεσης λειτουργίας 6 bar (Metkon S.A.), διβάθμιο συμπιεστή υδρογόνου με πίεση εξόδου τα 200 bar, 3 μονάδες αποθήκευσης: δεξαμενή μεταλλικών υδριδίων συνολικού όγκου  $24\text{Nm}^3$ , φιάλες συνολικού όγκου  $6\text{Nm}^3$  και πίεσης 6 bar και φιάλες συνολικού όγκου  $8,8\text{Nm}^3$  και πίεσης 200 bar και τέλος, τρεις κυψέλες καυσίμου: μία φωσφορικού οξέος ισχύος 10 kW και δύο πολυμερούς μεμβράνης ισχύος 2,5 και 5 kW. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης έχει τη δυνατότητα επιλογής του αριθμού των λειτουργούντων ηλεκτρολυτικών κελιών ανάλογα με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος. Συγκεκριμένα, γίνεται επιλογή μεταξύ 24, 25 ή 26 κελιών ανάλογα με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η οποία λαμβάνει τιμές στα εύρη  $720\text{-}1000\text{ W/m}^2$ ,  $500\text{-}720\text{ W/m}^2$  και  $200\text{-}500\text{ W/m}^2$  αντιστοίχως. Αρχικά, το παραγόμενο υδρογόνο οδηγείται σε μία ενδιάμεση δεξαμενή αποθήκευσης όγκου  $1\text{ m}^3$  νερού και στη συνέχεια οδηγείται σε κάποια από τις μονάδες αποθήκευσης. [21], [22]

### Πάρκο ENEA

Το παρόν αυτόνομο σύστημα παραγωγής υδρογόνου με μονάδα ηλεκτρόλυσης τροφοδοτούμενης από ανεμογεννήτριες χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και κατασκευάστηκε στην Ιταλία μεταξύ 1994 και 1997. Στόχος του συστήματος αποτελούσε η μελέτη της δυνατότητας ενσωμάτωσης της τεχνολογίας αιολικής ενέργειας με μονάδες ηλεκτρόλυσης. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αυτό επιδίωξε να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία μία ανεμογεννήτριας με σκοπό την επίτευξη όσο το δυνατόν ομαλότερης ισχύος εξόδου και να εξετάσει την ανοχή μίας μονάδας ηλεκτρόλυσης σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ισχύος εισόδου με την κατασκευή ενός αυτόνομου συστήματος μικρής κλίμακας ( $<10\text{ kW}$ ). Το σύστημα αυτό αποτελείται από τις εξής συνιστώσες: ανεμογεννήτρια Riva Calzoni M7S ισχύος 5,2 kW, αλκαλική ηλεκτρολυτική μονάδα ισχύος 2,25 kW και πίεσεως 20 bar (von Hörner System GmbH), μπαταρία ισχύος 330Ah, ενώ τα φορτία απόρριψης είναι 0,5 και 2 kW. [21], [22]

### SAPHYS

Το μικρής κλίμακας αυτόνομο σύστημα παραγωγής υδρογόνου με μονάδα ηλεκτρόλυσης τροφοδοτούμενης από φωτοβολταϊκά (Stand Alone

Photovoltaic Hydrogen Energy System - SAPHYS) αποτελεί κοινό εγχείρημα των ENEA (Ιταλία), IFE (Νορβηγία) και KFA (Γερμανία) χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (1994 - 1997). Το σύστημα αυτό αποσκοπούσε στην εξέταση και δοκιμή του παραγόμενου μέσω ανανεώσιμων πηγών υδρογόνου ως μακροπρόθεσμο μέσο αποθήκευσης και την μετατροπή της αποθηκευμένης ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω μίας κυψέλης καυσίμου.

Οι επιμέρους συνιστώσες που απαρτίζουν το σύστημα είναι οι εξής: 180 μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πάνελ συνολικής ισχύος 5,4 kW (Arcosolar, Helios και Itasolar), αλκαλική ηλεκτρολυτική μονάδα ισχύος 5 kW και μέγιστης πίεσης 20 bar (Metkon S.A.), χαλύβδινες φιάλες αποθήκευσης υδρογόνου χωρητικότητας 300 Nm<sup>3</sup> και πίεσης 20 bar, μπαταρία χωρητικότητας 51 kWh με σκοπό την επίτευξη σταθερής τάσης και ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου πολυμερούς μεμβράνης ισχύος 3 kW (Ballard Power Generator Systems).

Μερικά ελαττώματα στο βοηθητικό εξοπλισμό προκάλεσαν σύντομης χρονικής διάρκειας διακοπές λειτουργίας στην εγκατάσταση. Πέραν των βοηθητικών συστημάτων, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η κυψέλη πολυμερούς ηλεκτρολύτη αποτελεί κατάλληλη επιλογή για συστήματα μικρής κλίμακας. Εντούτοις, η κυψέλη παρουσίασε διακοπές λειτουργίας για μεγάλες περιόδους και μειωμένη αντοχή σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να αποφασισθεί η συντήρησή της τουλάχιστον μία φορά πριν τη χειμερινή περίοδο. Όσον αφορά στη μονάδα ηλεκτρόλυσης, αποδείχθηκε ότι η τεχνολογία αλκαλικού ηλεκτρολύτη ήταν αρκετά ώριμη για χρήση σε ηλιακές εφαρμογές. Ωστόσο, υπογραμμίστηκε η ανάγκη για πιο μακροπρόθεσμη δοκιμή με σκοπό την εξέταση πιθανής επιδείνωσης της παραγωγής υδρογόνου κατά την παροχή της μεταβλητής ηλιακής ενέργειας. [21], [22]

### Πάρκο SWB

Αποτελεί ένα από τα πρώτα και μεγαλύτερα προγράμματα του είδους του. Ξεκίνησε το 1986 και ολοκληρώθηκε το 1999 στο Neunburg vorm Wald της Γερμανίας με έναν προϋπολογισμό της τάξεως των 59 εκατομμυρίων γερμανικών μάρκων. Στόχος του προγράμματος Solar-Wasserstoff-Bayern ήταν η εξέταση, σε βιομηχανική κλίμακα, σημαντικών τεχνολογιών του κύκλου υδρογόνου χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ισχύ που παρήχθη μέσω ηλιακής ενέργειας.

Το σύστημα αποτελείται από τις εξής συνιστώσες: φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύος 370 kW, δύο μονάδες αλκαλικού ηλεκτρολύτη χαμηλής πίεσης ισχύος 110 και 100kW και συνολικής παραγωγής υδρογόνου 47 Nm<sup>3</sup>/h, μία μονάδα αλκαλικού ηλεκτρολύτη υψηλής πίεσης (32 bar), ισχύος 100 kW και

παραγωγής  $20 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , συμπιεστές υδρογόνου και οξυγόνου με πίεση εξόδου 30 bar, αποθηκευτικές διατάξεις υδρογόνου και οξυγόνου χωρητικότητας 5.000 και  $500 \text{ Nm}^3$  αντίστοιχα, δύο καταλυτικοί καυστήρες φυσικού αερίου-υδρογόνου ισχύος  $20 \text{ kW}_{\text{th}}$  ο καθένας, καταλυτικός θερμαντήρας ισχύος  $10 \text{ kW}_{\text{th}}$ , καυστήρας υδρογόνου ισχύος  $32,2 \text{ kW}_{\text{th}}$  και ψύκτης ισχύος  $16,6 \text{ kW}_{\text{th}}$ , μία κυψέλη αλκαλικού ηλεκτρολύτη ισχύος 6,5 kW, μία πολυμερούς μεμβράνης ισχύος 10 kW και δύο φωσφορικού οξέος ισχύος  $79,3 \text{ kW}_e$  και  $42,2 \text{ kW}_{\text{th}}$ . Από τη λειτουργία του συστήματος εξάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

- τα συστήματα υδρογόνου για τη μετατροπή ενέργειας παράγονται κατά τη συγκεκριμένη περίοδο μόνο ως πρωτότυπα.
- η ένταξη των επιμέρους συνιστωσών σε μία ενιαία εγκατάσταση αποτελεί εγχείρημα συχνά δυσκολότερο από ό,τι συνήθως θεωρείται. Για παράδειγμα, το μέγεθος και η πολυπλοκότητα των περιφερειακών συστημάτων συχνά υποτιμώνται.
- κρίθηκε ότι η κατασκευή σημαντικών υποσυστημάτων της εγκατάστασης που έχουν ως σκοπό την παραγωγή και χρήση του αερίου υδρογόνου πρέπει να γίνει σε εξωτερικούς χώρους εν αντιθέσει με την εσωτερική διαμόρφωση που επιλέχθηκε στην περίπτωση του SWB. [22]

### PHOEBUS

Το πρόγραμμα PHOEBUS αποσκοπούσε στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ηλιακή ενέργεια στη βιβλιοθήκη του ερευνητικού κέντρου στο Jülich της Γερμανίας.

Το σύστημα αποτελείτο από τις εξής συνιστώσες: φωτοβολταϊκά πάνελ ισχύος 43 kW, 110 μπαταρίες συνολικής χωρητικότητας 300 kWh με σκοπό την επίτευξη σταθερής τάσης, δύο μονάδες ηλεκτρόλυσης ισχύος 26 kW (7 bar) και 5 kW (120 bar), συμπιεστή με πίεση εξόδου 120 bar, φιάλες αποθήκευσης υδρογόνου χωρητικότητας  $3000 \text{ Nm}^3$  σε πίεση 120 bar, φιάλες αποθήκευσης οξυγόνου χωρητικότητας  $1400 \text{ Nm}^3$  σε πίεση 70 bar και ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη ισχύος 6,5 kW. Η σταθερότητα και η ελεγχιμότητα της άμεσης σύζευξης της γεννήτριας των φωτοβολταϊκών με την μπαταρία, τον ηλεκτρολύτη και την κυψέλη καυσίμου ερευνήθηκαν λεπτομερώς και η επίτευξή της αποδείχθηκε μέσω προσομοίωσης. Ως συμπέρασμα της παραπάνω διαδικασίας προέκυψε ότι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί κατά αυτόν τον τρόπο από 54% σε 65%, ενώ παράλληλα θα οδηγήσει και σε αξιολογη μείωση των δαπανών κατασκευής λόγω παράλειψης των μετατροπών. [22]

### PURE project

Το μικρής κλίμακας αυτόνομο σύστημα παραγωγής υδρογόνου με μονάδα ηλεκτρόλυσης τροφοδοτούμενης από ανεμογεννήτριες αποτελεί ένα κοινό πρόγραμμα των UNST (κοινότητα των νήσων Σέτλαντ), siGEN, και AccaGen S.A. υπό τη στήριξη της E.E. και ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2005. Το πρόγραμμα στοχεύει να καταδείξει τη δυνατότητα συνδυασμού της αιολικής ενέργειας με την τεχνολογία υδρογόνου με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας απομονωμένης τοποθεσίας. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα PURE συλλήφθηκε για να εξετάσει και να καταδείξει την ασφαλή και αποδοτική μακροπρόθεσμη αποθήκευση και χρήση του παραγόμενου υδρογόνου με την μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου.

Οι επιμέρους συνιστώσες του συστήματος είναι οι εξής: δύο ανεμογεννήτριες ισχύος 15 kW η καθεμία (Proven Ltd), μία ηλεκτρολυτική μονάδα ισχύος 15 kW με πίεση λειτουργίας τα 55 bar (AccaGen S.A.), φιάλες αποθήκευσης υδρογόνου συνολικού όγκου 44 Nm<sup>3</sup> και κυψέλη καυσίμου πολυμερούς μεμβράνης ισχύος 5 kW.

Η μονάδα της ηλεκτρόλυσης αποτελείται από μια μονάδα της AccaGen με προηγμένα κελιά που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται από την AccaGen S.A. ειδικά για εφαρμογές αιολικής ενέργειας με δυνατότητα λειτουργίας σε πιέσεις μέχρι και 55 bar. Πέραν της υψηλής απόδοσης και της καλής δυναμικής συμπεριφοράς σε διακοπτόμενη λειτουργία, ιδιαίτερα σημαντική απαίτηση για την ηλεκτρολυτική μονάδα σε τέτοιες εφαρμογές αποτελεί η δυνατότητα λειτουργίας του ηλεκτρολύτη σε ένα ευρύ φάσμα τάσεων και καθαρότητας αερίου. [22]

### HARI project

Σκοπός του προγράμματος αυτού είναι η δοκιμή και απόκτηση εμπειριών σχετικά με το συνδυασμό συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά ακόμα πιο σημαντικό στόχο αποτελεί η ανάπτυξη μοντέλων λογισμικού που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό μελλοντικών παρόμοιων συστημάτων σε μια σειρά εφαρμογών. Η εγκατάσταση του πιλοτικού αυτού έργου έγινε το 2001 στη West Beacon Farm του Leicestershire της Αγγλίας και πρόκειται για ένα σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου που ενσωματώθηκε εκ των υστέρων σε ένα ήδη υπάρχον πάρκο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (υδροηλεκτρική, αιολική, ηλιακή).

Πριν την ενσωμάτωση του συστήματος αποθήκευσης, ήταν εγκατεστημένες δύο ανεμογεννήτριες Carter ισχύος 25 kW, φωτοβολταϊκά ισχύος 13 kWp και ένα μικρο-υδροηλεκτρικό έργο αποτελούμενο από δύο

υδροτροβίλους συνολικής ισχύος 3,2 kW. Επιπλέον, υπήρχε μία αντλία θερμότητας ισχύος 10 kW<sub>th</sub> με σκοπό την κεντρική θέρμανση των εγκαταστάσεων της περιοχής, σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας ισχύος 15 kW<sub>el</sub> και 38 kW<sub>th</sub> ηλιακά-θερμικά συστήματα για τη θέρμανση χώρων και νερού χρήσης. Προφανώς, η παραγωγή ενέργειας από το σύνολο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δύσκολα συμβάδιζε με το προφίλ της ζήτησης με αποτέλεσμα να είναι αναγκαίος ένας μηχανισμός που θα επιφέρει ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Ως τέτοιος μηχανισμός θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα αποθήκευσης του υδρογόνου, ενώ πριν αυτό ενσωματωθεί στο πάρκο η συγκεκριμένη λειτουργία επιτελείτο από το συνδυασμό μπαταρίας μολύβδου οξέος χωρητικότητας 120 kWh και του δικτύου, που χρησιμοποιείτο ως αποθηκευτική διάταξη με απεριόριστη αποθηκευτική ικανότητα. Το σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και χρήσης υδρογόνου αποτελείται από τις εξής συνιστώσες: έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη ισχύος 36 kW, πίεσης 25 bar και κατανάλωσης 3,9 kWh/Nm<sup>3</sup> (Stuart Energy Europe πρώην Vandenborre Hydrogen Systems), έναν συμπιεστή υδρογόνου λόγου πίεσης 1:8, μέγιστης παροχής 11 Nm<sup>3</sup>/h σε πίεση 25 bar και μέγιστης πίεσης εξόδου 137 bar, 48 φιάλες πεπιεσμένου υδρογόνου χωρητικότητας 2856 Nm<sup>3</sup> σε πίεση 137 bar και δύο κυψέλες καυσίμου ισχύος 2 kW και 5 kW. Η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια 3,8 MWh μετά την μετατροπή του στις κυψέλες καυσίμου επιτρέποντας την κάλυψη αναγκών για τρεις εβδομάδες χωρίς παραγωγή ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που η παροχή μέσω του συμπιεστή υδρογόνου κυμαίνεται μεταξύ 2 και 8 Nm<sup>3</sup>/h, τότε κρίνεται απαραίτητη η χρήση μίας ενδιάμεσης δεξαμενής αποθήκευσης όγκου 37,85 λίτρων μεταξύ ηλεκτρολύτη και συμπιεστή. [51]



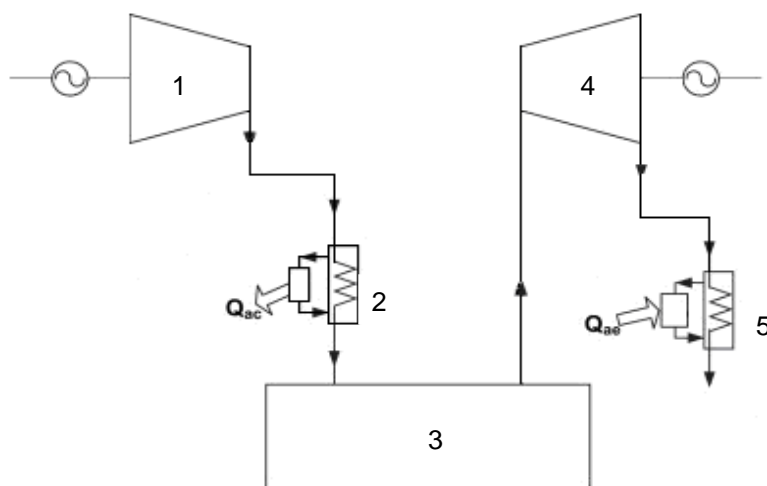


## 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΕΡΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ IPSE-pro

Στην παρούσα ενότητα θα εξετασθούν οι διάφοροι τύποι υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα ενεργειακά και εξεργειακά με σκοπό την προβολή και αντιπαράθεση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του καθενός από αυτά. Αρχικά θα μελετηθούν συστήματα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδό του από την αποθηκευτική διάταξη, ενώ στη συνέχεια θα γίνει μελέτη των συστημάτων όπου χρησιμοποιείται ανακομιστής καυσαερίων εξόδου από το στρόβιλο της εγκατάστασης με σκοπό την προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα.

### 5.1 Μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση αέρα

Καταρχήν, θα εξετασθεί το μονοβάθμιο σύστημα micro-CAES χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν την είσοδο αυτού στο στρόβιλο προς αποτόνωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει εναλλάκτη θερμότητας προς ψύξη του συμπιεσμένου αέρα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος πριν οδηγηθεί στην αποθηκευτική διάταξη, ενώ ο εναλλάκτης που βρίσκεται στην έξοδο του στρόβιλου αποσκοπεί στην εκμετάλλευση της χαμηλής θερμοκρασίας εξόδου του εκτονωμένου αέρα για κάλυψη ψυκτικών αναγκών. Στη συνέχεια παρατίθεται απεικόνιση της συγκεκριμένης διάταξης με τις επιμέρους συνιστώσες της:

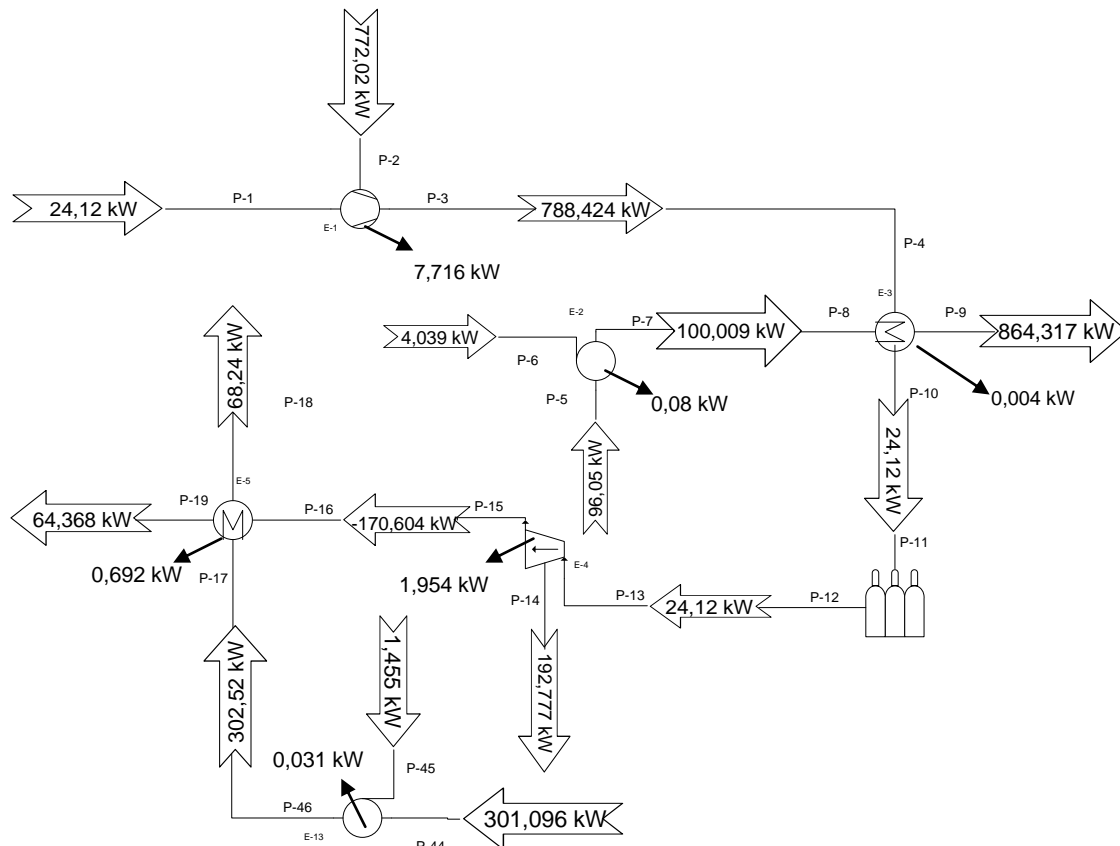


Σχήμα 5.1. Μονοβάθμιο σύστημα micro-CAES χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη. (1) συμπιεστής, (2), (5) εναλλάκτης θερμότητας, (3) φιάλες αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα, (4) στρόβιλος.

Το παραπάνω σύστημα προσομοιώθηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα IPSE-pro ως εξής:

- παροχή μάζας αέρα στο συμπιεστή ίση με 1,2 kg/s
- είσοδος του αέρα στο συμπιεστή υπό πίεση ίση με 1,013 bar και θερμοκρασία 20°C και συμπίεση αυτού στα 40 bar
- μηχανικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κινητήρα ίσοι με  $\eta_{m,M}=0,99$  και  $\eta_{el,M}=0,98$  αντίστοιχα
- ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή  $\eta_{is,C}=0,85$  και μηχανικός βαθμός απόδοσης ίσος με  $\eta_{m,C}=0,99$
- ψύξη του αέρα εξόδου σε θερμοκρασία 20°C με χρήση υδρόψυκτου εναλλάκτη θερμότητας και απώλειες πίεσης στο ρεύμα του αέρα και του νερού ίσες με 0,5 bar και 0,2 bar αντίστοιχα. Η παροχή μάζας του νερού ανέρχεται στα 2,3 kg/s και συμπιέζεται από τα 3 bar στα 15 bar μέσω αντλίας
- απώλεια πίεσης στην διάταξη αποθήκευσης ίση με 0,2 bar

Στη συνέχεια παρατίθεται απεικόνιση της ροής ενέργειας του συγκεκριμένου συστήματος όπως αυτή προέκυψε από την εκτέλεση του προγράμματος:



Σχήμα 5.2. Απεικόνιση ροής ενέργειας μονοβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι η προσομοίωση στο IPSEpro έγινε μέχρι τη διάταξη αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα λόγω αδυναμίας του προγράμματος προς υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του αέρα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των  $-30^{\circ}\text{C}$ . Σε δοκιμές που έγιναν με σκοπό την προσομοίωση του συνόλου του συστήματος στο IPSEpro διαπιστώθηκε ότι για θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου ίση με  $20^{\circ}\text{C}$  η ελάχιστη επιτεύξιμη πίεση εξόδου ήταν τα 23 bar, ενώ η επίτευξη πίεσης περιβάλλοντος απαιτούσε τη χρήση υπεράριθμης ποσότητας στροβίλων σε καθέναν εκ των οποίων παρατηρείτο μείωση της πίεσης κατά 0,2-0,5 bar. Ως εκ τούτου οι σχετικοί υπολογισμοί διεξήχθησαν με τη βοήθεια του Excel και του προγράμματος RefProp8 με τη χρήση των εξής σχέσεων:

- θερμοκρασία εξόδου στροβίλου:

$$T_{\text{τεξ}} = T_{\text{τεισ}} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \pi_{\text{T}}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \cdot n_{\text{is,T}} \right],$$

από την οποία με εισόδους το λόγο πίεσης ίσο με  $\pi_{\text{T}}=32,39$ , τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στροβίλου ίσο με  $n_{\text{is,T}}=0,87$  και τη θερμοκρασία εισόδου ίση με  $20^{\circ}\text{C}$  υπολογίσθηκε η θερμοκρασία εξόδου. Τέλος, με βάση αυτήν τη θερμοκρασία (132,52K) και την πίεση περιβάλλοντος λήφθηκαν από το πρόγραμμα RefProp8 οι αντίστοιχες θερμοδυναμικές ιδιότητες του αέρα.

- ενεργειακός ισολογισμός εναλλάκτη θερμότητας:

$$\dot{m}_{\text{air}} c_{p_{\text{air}}} (T_{\text{out}_{\text{air}}} - T_{\text{in}_{\text{air}}}) = \dot{m}_{\text{w}} c_{p_{\text{w}}} (T_{\text{in}_{\text{w}}} - T_{\text{out}_{\text{w}}}),$$

όπου η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού τέθηκε ίση με  $90^{\circ}\text{C}$  και  $20^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα και η παροχή μάζας του νερού ίση με 0,8 kg/s. Το νερό συμπιέστηκε από τα 3 bar στα 15 bar και θερμοκρασία  $90^{\circ}\text{C}$  με την προσθήκη έργου ίσου με 1,455 kW μέσω αντλίας νερού. Με βάση τον ενεργειακό ισολογισμό υπολογίσθηκε η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη ίση με 326,62K και από το RefProp8 προέκυψαν οι λοιπές θερμοδυναμικές ιδιότητες.

Άξιο αναφοράς είναι ότι το ρεύμα του αέρα εξόδου από το στρόβιλο χαρακτηρίζεται από αρνητική τιμή ισχύος, καθότι ο αέρας εξάγεται από αυτόν με θερμοκρασία και ενθαλπία υπό του μηδενός με δεδομένο ότι οι ενθαλπίες είναι ανηγμένες στους  $0^{\circ}\text{C}$ . Επίσης παρατηρείται ότι ένα ιδιαίτερα μεγάλο ποσό ενέργειας διατίθεται μέσω του εναλλάκτη θερμότητας με σκοπό την κάλυψη ψυκτικών αναγκών, ποσό το οποίο ξεπερνά και τη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Το σύστημα αυτό, όπως περιγράφηκε και παραπάνω, παρουσιάζει τη δυνατότητα χρήσης της εκλυόμενης κατά τη συμπίεση θερμότητας για την ικανοποίηση θερμικών αναγκών και εκμετάλλευσης της χαμηλής

θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το στρόβιλο με σκοπό την κάλυψη ψυκτικών αναγκών. Ως εκ τούτου πέραν του βαθμού απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης, θα εξετασθεί η θερμική και ψυκτική απόδοση της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται τα εξής μεγέθη:

- βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας:

$$n_{αποθ.} = \frac{P_T}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2}} = \frac{192,777kW}{(772,024 + 4,039 + 1,455)kW} = 0,2479 = 24,79\%$$

όπου  $P_C$  η ισχύς που παρέχεται στον συμπιεστή του συστήματος,  $P_T$  η ισχύς που λαμβάνεται από το στρόβιλο και  $P_P$  η ισχύς που παρέχεται σε κάθε αντλία του συστήματος για τη συμπίεση του νερού εισόδου στους εναλλάκτες θερμότητας.

- βαθμός εκμετάλλευσης της εκλυόμενης θερμότητας από τη συμπίεση:

$$\begin{aligned} n_{θερμ.} &= \frac{Q_C}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2}} = \frac{\dot{m}_w(h_{out} - h_{in})}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2}} = \\ &= \frac{2,3 \cdot (375,79 - 43,482)kW}{(772,024 + 4,039 + 1,455)kW} = 0,983 = 98,3\% \end{aligned}$$

όπου  $Q_C$  η συναλλασσόμενη θερμότητα στον εναλλάκτη,  $h_{in}$  και  $h_{out}$  η ενθαλπίες εισόδου και εξόδου του ρεύματος του νερού από τον εναλλάκτη θερμότητας.

- ψυκτική απόδοση:

$$\begin{aligned} n_{ψ} &= \frac{Q_T}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2}} = \frac{\dot{m}_w(h_{in} - h_{out})}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2}} = \\ &= \frac{0,8 \cdot (378,15 - 85,304)kW}{(772,024 + 4,039 + 1,455)kW} = 0,3015 = 30,15\% \end{aligned}$$

όπου  $Q_T$  η συναλλασσόμενη θερμότητα στον ευρισκόμενο στην έξοδο του στρόβιλου εναλλάκτη,  $h_{in}$  και  $h_{out}$  οι ενθαλπίες εισόδου και εξόδου του ρεύματος του νερού από τον εναλλάκτη θερμότητας.

Στο παράρτημα της παρούσας εργασίας παρατίθεται το αντίστοιχο φύλλο του προγράμματος IPSEpro, στο οποίο προσομοιώθηκε το συγκεκριμένο σύστημα αποθήκευσης.

Όσον αφορά στην εξεργειακή ανάλυση του συστήματος, η συνολική εξέργεια  $E$  αποτελείται από τις εξής τέσσερις συνιστώσες: τη φυσική  $E^{PH}$ , την κινητική  $E^{KN}$ , τη δυναμική  $E^{PT}$  και τη χημική εξέργεια  $E^{CH}$ . Στο παρόν σύστημα, όπως και κάθε σύστημα που βρίσκεται σε ηρεμία ως προς το περιβάλλον, η κινητική και η δυναμική συνιστώσα είναι μηδενικές και κατά συνέπεια η συνολική εξέργεια του συστήματος αποτελείται από τη φυσική και τη χημική συνιστώσα. Αξίζει, ωστόσο, στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι ο όρος χημική

εξέργεια δεν αναφέρεται στη διεξαγωγή κάποιας χημικής αντίδρασης, αλλά στην απόσταση μεταξύ της χημικής σύστασης του συστήματος από την αντίστοιχη του περιβάλλοντος.

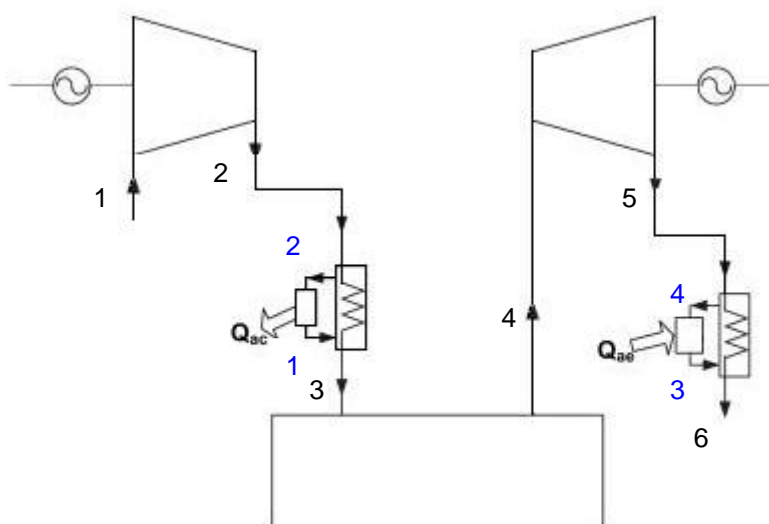
Η φυσική εξέργεια στο ρεύμα του αέρα όπως και στο ρεύμα του νερού υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{E}^{PH} = \dot{m} \cdot [h - h_o - T_o \cdot (s - s_o)],$$

όπου με το δείκτη ο συμβολίζεται η κατάσταση αναφοράς (πίεση  $p_o=1\text{atm}$  και θερμοκρασία  $T_o=298,15\text{K}$ ). Από την άλλη πλευρά, η χημική εξέργεια του αέρα λαμβάνεται ίση με το μηδέν καθότι η χημική του σύσταση συμπίπτει με αυτήν του περιβάλλοντος, ενώ αυτή του νερού δίδεται από τη σχέση:

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \frac{e^{-CH}}{MB},$$

όπου  $e_w^{-CH} = 45 \text{ kJ/kmol}$  η γραμμομοριακή χημική εξέργεια (kJ/kmol) σε κατάσταση αναφοράς σύμφωνα με το μοντέλο I όπως αυτό ορίζεται στην αναφορά [52] ή  $e_w^{-CH} = 900 \text{ kJ/kmol}$  σύμφωνα με το μοντέλο II και  $MB_w = 18,015 \text{ kg/kmol}$  το μοριακό βάρος της ένωσης. Η τιμή της γραμμομοριακής χημικής εξέργειας για τα δύο μοντέλα λήφθηκε από πίνακα στο παράρτημα της αναφοράς [52]. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις και με βάση την αρίθμηση του σχήματος που ακολουθεί παρατίθενται πίνακες με τις τιμές της εξέργειας για κάθε ρεύμα όπως αυτές υπολογίσθηκαν για την περίπτωση παροχής μάζας αέρα ίσης με  $1,2 \text{ kg/s}$  για τα δύο μοντέλα:



Σχήμα 5.3. Μονοβάθμιο σύστημα micro-CAES χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη με αρίθμηση των ρευμάτων αέρα και νερού.

Μοντέλο I

Μέσο	Κατάσταση	Φυσική εξέργεια $E^{PH}$ (kW)	Χημική εξέργεια $E^{CH}$ (kW)	Συνολική εξέργεια $E$ (kW)
Αέρας	1	0,05	0	0,05
Αέρας	2	724,318	0	724,318
Αέρας	3	376,291	0	376,291
Αέρας	4	375,755	0	375,755
Αέρας	5	111,979	0	111,979
Αέρας	6	1,872	0	1,872
Νερό	1	7,064	5,745	12,809
Νερό	2	62,172	5,745	67,917
Νερό	3	21,976	1,998	23,974
Νερό	4	1,322	1,998	3,320
Νερό	P1	4,358	5,745	10,103
Νερό	P2	20,951	1,998	22,949

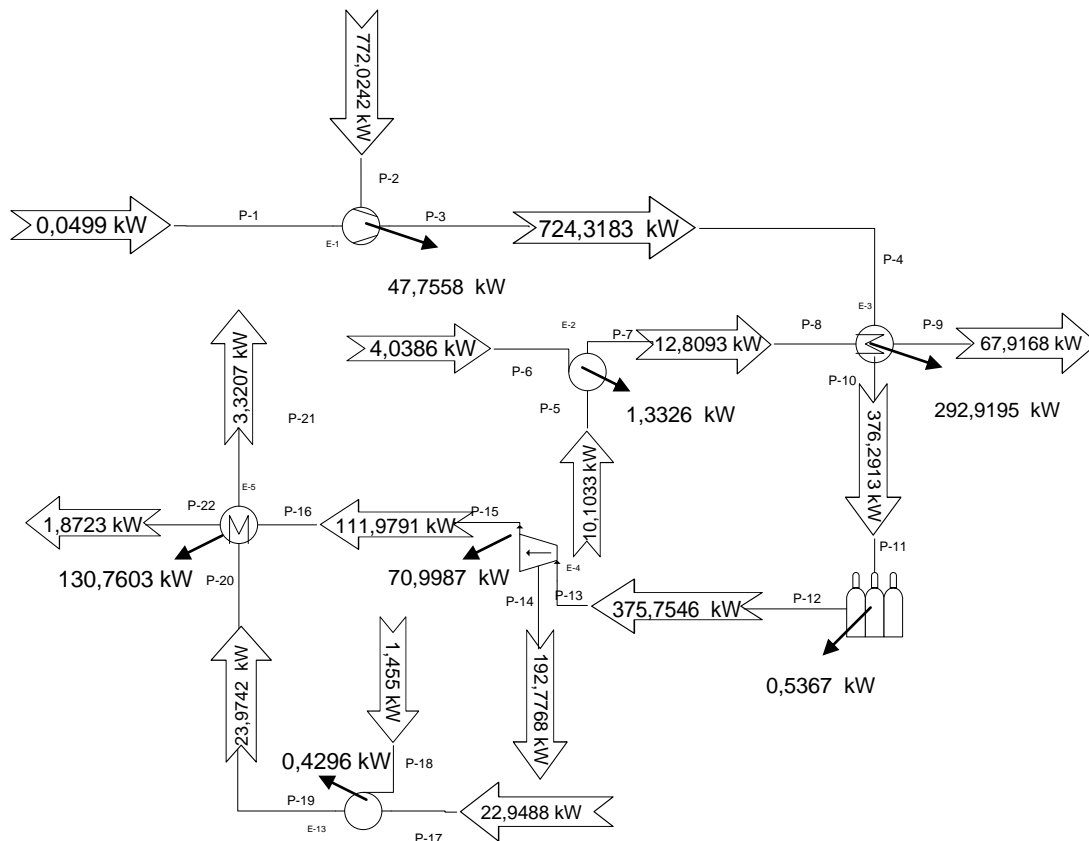
Στον παραπάνω πίνακα ως καταστάσεις P1 και P2 του νερού χαρακτηρίστηκαν οι καταστάσεις εισόδου του νερού σε καθεμία από τις αντλίες που το συμπιέζουν πριν την είσοδο αυτού στους εναλλάκτες.

Μοντέλο II

Μέσο	Κατάσταση	Φυσική εξέργεια $E^{PH}$ (kW)	Χημική εξέργεια $E^{CH}$ (kW)	Συνολική εξέργεια $E$ (kW)
Αέρας	1	0,05	0	0,05
Αέρας	2	724,318	0	724,318
Αέρας	3	376,291	0	376,291
Αέρας	4	375,755	0	375,755
Αέρας	5	111,979	0	111,979

Αέρας	6	1,872	0	1,872
Νερό	1	7,064	114,904	121,968
Νερό	2	62,172	114,904	177,076
Νερό	3	21,976	39,967	61,943
Νερό	4	1,322	39,967	41,289
Νερό	P1	4,358	114,904	119,262
Νερό	P2	20,951	39,967	60,918

Στη συνέχεια παρατίθεται απεικόνιση της ροής εξέργειας του συγκεκριμένου συστήματος όπως προέκυψε από τις τιμές της εξέργειας για το μοντέλο I:



Σχήμα 5.4. Απεικόνιση ροής εξέργειας μονοβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση.

Εν συνεχεία ακολουθούν οι υπολογισμοί της καταστροφής εξέργειας σε καθεμία από τις συνιστώσες του συστήματος αποθήκευσης. Για κάθε συνιστώσα χρησιμοποιήθηκε ισολογισμός εξέργειας και συγκεκριμένα:

$$\dot{E}_D = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \cdot Q_j - W_{cv} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e,$$

όπου  $\dot{E}_D$  η καταστροφή εξέργειας,  $\dot{E}_i = \sum_i \dot{m}_i e_i$  και  $\dot{E}_e = \sum_e \dot{m}_e e_e$  οι όροι του ρυθμού μεταφοράς της εξέργειας προς και από τον όγκο ελέγχου αντίστοιχα,  $W_{cv}$  ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας μέσω έργου και  $\sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \cdot Q_j$  ο ρυθμός μεταφοράς της εξέργειας λόγω μεταφοράς θερμότητας. Ο τελευταίος όρος στην περίπτωση που εξετάζεται θα θεωρηθεί μηδενικός, λαμβάνοντας τον όγκο ελέγχου κάθε συνιστώσας κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να περιλαμβάνει κάθε συνιστώσα και παράλληλα να βρίσκεται σε απόσταση τέτοια που η μεταφορά θερμότητας να λαμβάνει χώρα στους 25°C.

Βάσει, λοιπόν του ισολογισμού εξέργειας λαμβάνεται η καταστροφή εξέργειας σε κάθε συνιστώσα του συστήματος:

- Συμπιεστής:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = -\frac{\dot{m}_{air}(h_1 - h_2)}{n_m} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = 45,7558kW$
- 1<sup>η</sup> αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{P1w} - \dot{E}_{1w} = 1,3326kW$
- 1<sup>ος</sup> εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_2 + \dot{E}_{1w} - \dot{E}_3 - \dot{E}_{2w} = 292,9195kW$
- Αποθηκευτική διάταξη:  $\dot{E}_D = \dot{E}_3 - \dot{E}_4 = 0,5367kW$
- Στρόβιλος:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_4 - \dot{E}_5 = -\dot{m}_{air}(h_5 - h_4) \cdot n_m + \dot{E}_4 - \dot{E}_5 = 70,9987kW$
- 2<sup>η</sup> αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{P2w} - \dot{E}_{3w} = 0,4296kW$
- 2<sup>ος</sup> εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_5 + \dot{E}_{3w} - \dot{E}_6 - \dot{E}_{4w} = 130,7603kW$

Αθροίζοντας την καταστροφή της εξέργειας σε κάθε συνιστώσα προκύπτει συνολική καταστροφή στο σύστημα ίση 544,7331 kW και η οποία καταμερίζεται ως εξής:

Συμπιεστής	1 <sup>η</sup> αντλία	1 <sup>ος</sup> εναλλάκτης	Αποθηκευτική διάταξη	Στρόβιλος	2 <sup>η</sup> αντλία	2 <sup>ος</sup> εναλλάκτης
8,77%	0,24%	53,77%	0,1%	13,03%	0,08%	24,01%

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, το μεγαλύτερο ποσοστό καταστροφής της εξέργειας του συστήματος αντιστοιχεί στον πρώτο εναλλάκτη, ποσοστό μάλιστα που ξεπερνά το 50% της συνολικής καταστροφής. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθότι το ρεύμα του αέρα από την ενθαλπία των 657,02



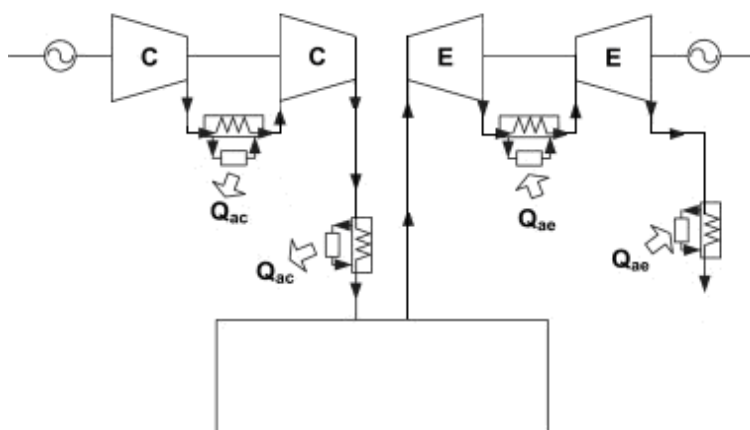
kJ/kg κατέρχεται μετά την έξοδό του από τον εναλλάκτη σε θερμοκρασία 20°C και ενθαλπία 20,1 kJ/kg, δηλαδή αποτελεί ρεύμα χαμηλής ποιότητας ενέργειας.

Τέλος, θα υπολογισθεί ο συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος με σκοπό την αποτίμηση αυτού από την εξεργειακή πλευρά ως εξής:

$$n_{\Pi_{CAES}} = \frac{\dot{m}_{air}(h_4 - h_5) \cdot n_m + (\dot{E}_{2w} - \dot{E}_{1w}) + (\dot{E}_{3w} - \dot{E}_{4w})}{\left( \frac{\dot{m}_{w1}(h_{1w} - h_{p1w})}{n_m} + \frac{\dot{m}_{w2}(h_{3w} - h_{p2w})}{n_m} + \frac{\dot{m}_{air}(h_2 - h_1)}{n_m} \right)} = 0,3454 = 34,54\%$$

## 5.2 Διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση αέρα

Εν συνεχεία, θα μελετηθεί το διβάθμιο σύστημα micro-CAES χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν την είσοδο αυτού στο στρόβιλο υψηλής πίεσης, το οποίο και απεικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 5.5. Διβάθμιο σύστημα micro-CAES χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη.

Στο σύστημα αυτό επιτελείται συμπίεση του αέρα με ενδιάμεση ψύξη, ενώ γίνεται χρήση εναλλάκτη θερμότητας μετά την έξοδο του αέρα από τον συμπιεστή υψηλής πίεσης με σκοπό την ψύξη αυτού στη θερμοκρασία περιβάλλοντος πριν οδηγηθεί στην αποθηκευτική διάταξη. Η εκλυόμενη θερμότητα κατά τις διεργασίες συμπίεσης μπορεί, κατά συνέπεια να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη θερμικών αναγκών. Αντίστοιχα, η εκτόνωση του συμπιεσμένου αέρα γίνεται στους στρόβιλους υψηλής και χαμηλής πίεσης με ενδιάμεση αναθέρμανση μέσω εναλλάκτη θερμότητας, η οποία αποσκοπεί

στην αύξηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Παράλληλα με την αναθέρμανση του ρεύματος αέρα, επιτυγχάνεται κάλυψη ψυκτικών αναγκών μέσω της ψύξης του νερού του εναλλάκτη, ενώ ο εναλλάκτης που βρίσκεται στην έξοδο του στροβίλου χαμηλής πίεσης αποσκοπεί επίσης στην εκμετάλλευση της χαμηλής θερμοκρασίας εξόδου του εκτονωμένου αέρα για κάλυψη ψυκτικών αναγκών.

Το παραπάνω σύστημα προσομοιώθηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα IPSE-pro ως εξής:

- παροχή μάζας αέρα στο συμπιεστή ίση με 1,2 kg/s
- είσοδος του αέρα στο συμπιεστή υπό πίεση ίση με 1,013 bar και θερμοκρασία 20°C και συμπίεση αυτού στο συμπιεστή χαμηλής πίεσης στα 6,3 bar και στο συμπιεστή υψηλής πίεσης στα 40 bar
- μηχανικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κινητήρων ίσοι με  $\eta_{m,M}=0,99$  και  $\eta_{el,M}=0,98$  αντίστοιχα
- ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστών  $\eta_{is,C}=0,85$  και μηχανικός βαθμός απόδοσης ίσος με  $\eta_{m,C}=0,99$
- ενδιάμεση ψύξη του αέρα σε υδρόψυκτο εναλλάκτη με απώλειες πίεσης στο ρεύμα του αέρα και του νερού ίσες με 0,2 bar και θερμοκρασία εισόδου του νερού τους 10°C. Η παροχή μάζας του νερού ανέρχεται στα 0,8 kg/s και συμπιέζεται από τα 3 bar στα 15 bar μέσω αντλίας
- ψύξη του αέρα εξόδου από το συμπιεστή υψηλής πίεσης σε θερμοκρασία 20°C με χρήση υδρόψυκτου εναλλάκτη θερμότητας και απώλειες πίεσης στο ρεύμα του αέρα και του νερού ίσες με 0,5 bar και 0,2 bar αντίστοιχα. Η παροχή μάζας του νερού ανέρχεται στα 2 kg/s και συμπιέζεται από τα 3 bar στα 15 bar μέσω αντλίας
- απώλεια πίεσης στην διάταξη αποθήκευσης ίση με 0,2 bar

Η προσομοίωση του διβάθμιου συστήματος χωρίς προθέρμανση έγινε στο IPSEpro μέχρι τη διάταξη αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα, όπως και στην περίπτωση του μονοβάθμιου συστήματος, λόγω αδυναμίας του προγράμματος προς υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του αέρα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των -30°C. Μέσω των δοκιμών που έγιναν στο αντίστοιχο φύλλο του ISPEpro με σκοπό την προσομοίωση του συνόλου του συστήματος στο πρόγραμμα διαπιστώθηκε ότι για θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου υψηλής πίεσης ίση με 20°C, η ελάχιστη επιτεύξιμη πίεση εξόδου ήταν τα 22 bar ( $\eta_{is,T}=0,87$ ), ενώ απαιτείτο αναθέρμανση του ρεύματος του

αέρα από τους  $-19,368^{\circ}\text{C}$  στους  $73,635^{\circ}\text{C}$  ούτως ώστε ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης να εμφανίσει την ελάχιστη δυνατή πίεση εξόδου (7 bar).

Ως εκ τούτου, για να επιτύχουμε τις επιθυμητές τιμές της πίεσης και θερμοκρασίας, οι σχετικοί υπολογισμοί διεξήχθησαν με τη βοήθεια του Excel και του προγράμματος RefProp8 με τη χρήση των εξής σχέσεων:

- θερμοκρασία εξόδου στροβίλων:

$$T_{tεξ} = T_{tεισ} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \pi_T^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \cdot n_{is,T} \right],$$

από την οποία για το στρόβιλο υψηλής πίεσης με εισόδους το λόγο πίεσης ίσο με  $\pi_T=5,639$  ( $p_{εξ}=6,969\text{bar}$ ), ισεντροπικό βαθμό απόδοσης ίσο με  $n_{is,T}=0,87$  και θερμοκρασία εισόδου ίση με  $20^{\circ}\text{C}$  υπολογίσθηκε η θερμοκρασία εξόδου ίση με  $193,69\text{K}$ . Με βάση αυτήν τη θερμοκρασία και την πίεση εξόδου λήφθηκαν από το πρόγραμμα RefProp8 οι αντίστοιχες θερμοδυναμικές ιδιότητες του αέρα.

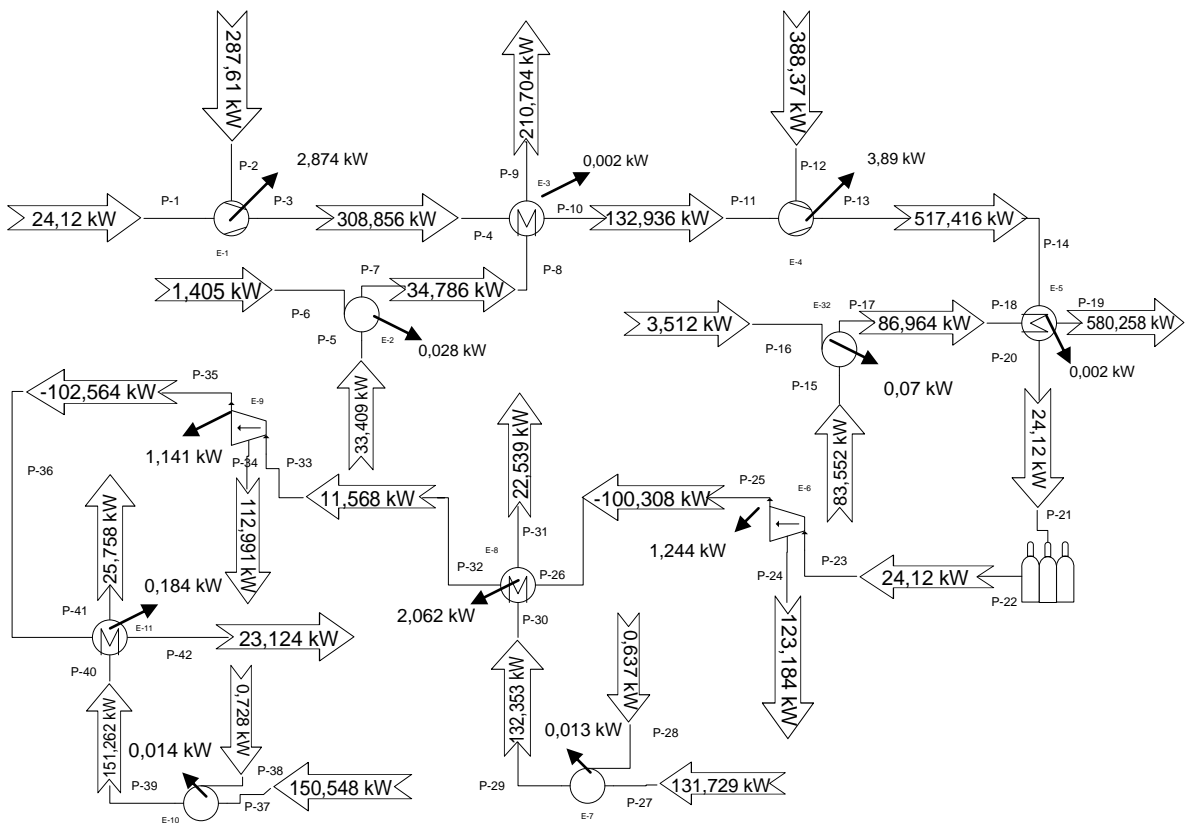
- ενεργειακός ισολογισμός εναλλάκτη θερμότητας:

$$\dot{m}_{air} c_{p_{air}} (T_{out_{air}} - T_{in_{air}}) = \dot{m}_w c_w (T_{in_w} - T_{out_w}),$$

όπου η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού τέθηκε ίση με  $90^{\circ}\text{C}$  και  $15^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα και η παροχή μάζας του νερού ίση με  $0,35 \text{ kg/s}$ . Το νερό συμπιέστηκε από τα 3 bar στα 15 bar και θερμοκρασία  $90^{\circ}\text{C}$  με την προσθήκη έργου ίσου με  $0,637 \text{ kW}$  μέσω αντλίας νερού. Με βάση τη σχέση αυτή υπολογίσθηκε η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη ίση με  $284,68\text{K}$  και από το RefProp8 προέκυψαν οι λοιπές θερμοδυναμικές ιδιότητες.

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμών ακολουθήθηκε και για το στρόβιλο χαμηλής πίεσης, αλλά και τον εναλλάκτη στην έξοδο του στροβίλου. Συγκεκριμένα, με θερμοκρασία εισόδου τα  $284,68\text{K}$ , λόγο πίεσης ίσο με  $\pi_T=5,74$  και  $n_{is,T}=0,87$  υπολογίσθηκε η θερμοκρασία εξόδου ίση με  $187,3 \text{ K}$  και μέσω αυτής βρέθηκαν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του αέρα. Εν συνεχεία, με θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού ίσες με  $90^{\circ}\text{C}$  και  $15^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα και παροχή μάζας αυτού ίση με  $0,4 \text{ kg/s}$ , από τον ενεργειακό ισολογισμό προέκυψε η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη ίση με  $291,28\text{K}$ . Το νερό συμπιέστηκε από τα 3 bar στα 15 bar και θερμοκρασία  $90^{\circ}\text{C}$  με την προσθήκη έργου ίσου με  $0,728 \text{ kW}$  μέσω αντλίας νερού.

Στη συνέχεια παρατίθεται απεικόνιση της ροής ενέργειας του συγκεκριμένου συστήματος όπως αυτή προέκυψε από την εκτέλεση του προγράμματος:



Σχήμα 5.6. Απεικόνιση ροής ενέργειας διβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής της ενέργειας, τα ρεύματα του αέρα εξόδου από τους στροβίλους χαρακτηρίζονται από αρνητική τιμή ισχύος, καθότι ο αέρας εξάγεται από αυτούς με θερμοκρασία και ενθαλπία υπό του μηδενός με δεδομένο ότι οι ενθαλπίες είναι ανηγμένες στους 0°C. Τέλος, παρατηρείται σημαντική αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και επισημαίνεται και πάλι το μεγάλο ποσό ενέργειας που διατίθεται μέσω του εναλλάκτη θερμότητας με σκοπό την κάλυψη ψυκτικών αναγκών.

Τέλος, παρατίθεται ο υπολογισμός των βαθμών απόδοσης του συστήματος, όπως αυτοί αναφέρθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται τα εξής μεγέθη:

- βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας:

$$n_{\alpha.ποθ.} = \frac{P_T}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2} + P_{P_3} + P_{P_4}} = \frac{(123,184 + 112,991)kW}{(287,612 + 388,364 + 1,405 + 3,512 + 0,637 + 0,728)kW} = 0,3462 = 34,62\%$$

όπου  $P_C$  η συνολική ισχύς που παρέχεται στους συμπιεστές του συστήματος,  $P_T$  η συνολική ισχύς που λαμβάνεται από τους στρόβιλους και  $P_P$  η ισχύς κάθε αντλίας που συμπιέζει το νερό. Όπως ήταν αναμενόμενο, η ενδιάμεση ψύξη του αέρα μεταξύ των δύο συμπιεστών και η αναθέρμανσή του κατά την έξοδο του από το στρόβιλο υψηλής πίεσης και πριν την είσοδο αυτού στο στρόβιλο χαμηλής συνετέλεσε στην αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κατά 9,83%.

- βαθμός εκμετάλλευσης της εκλυόμενης θερμότητας από τη συμπίεση:

$$n_{\theta_{εξμ.}} = \frac{Q_{C_1} + Q_{C_2}}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2} + P_{P_3} + P_{P_4}} = \frac{[\dot{m}_w(h_{out} - h_{in})]_1 + [\dot{m}_w(h_{out} - h_{in})]_2}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2} + P_{P_3} + P_{P_4}} =$$

$$= \frac{0,8 \cdot (263,38 - 43,482) + 2 \cdot (290,13 - 43,482) kW}{(287,612 + 388,364 + 1,405 + 3,512 + 0,637 + 0,728) kW} = 0,9809 = 98,09\%$$

όπου  $Q_{C_1}$  και  $Q_{C_2}$  η συναλλασσόμενη θερμότητα στον εναλλάκτη μεταξύ των συμπιεστών και αυτόν που ψύχει το ρεύμα του αέρα πριν την είσοδο στην αποθηκευτική διάταξη.

- ψυκτική απόδοση:

$$n_{\psi} = \frac{Q_{T_1} + Q_{T_2}}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2} + P_{P_3} + P_{P_4}} = \frac{[\dot{m}_w(h_{in} - h_{out})]_1 + [\dot{m}_w(h_{in} - h_{out})]_2}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2} + P_{P_3} + P_{P_4}} =$$

$$= \frac{0,35 \cdot (378,15 - 64,396) + 0,4 \cdot (378,15 - 64,396) kW}{(287,612 + 388,364 + 1,405 + 3,512 + 0,637 + 0,728) kW} = 0,3449 = 34,49\%$$

όπου  $Q_{T_1}$  και  $Q_{T_2}$  η συναλλασσόμενη θερμότητα στον αναθερμαντήρα και τον ευρισκόμενο στην έξοδο του στρόβιλου χαμηλής πίεσης εναλλάκτη αντίστοιχα. Συνεπώς, πέραν της αύξησης του βαθμού απόδοσης αποθήκευσης παρατηρείται και βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος αναφορικά με την εκμετάλλευση της θερμότητας προς κάλυψη των ψυκτικών αναγκών κατά 4,34%.

Στο παράρτημα της παρούσας εργασίας παρατίθεται το αντίστοιχο φύλλο του προγράμματος IPSEpro, στο οποίο προσομοιώθηκε το συγκεκριμένο σύστημα αποθήκευσης.

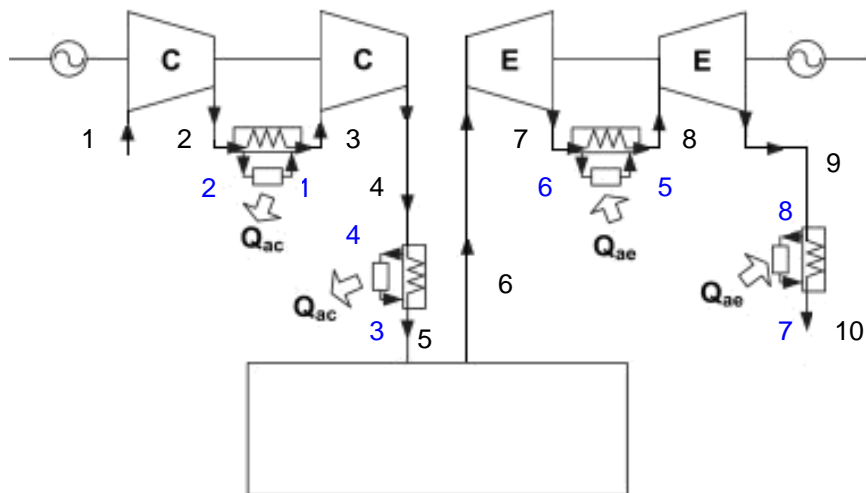
Όσον αφορά στην εξεργειακή ανάλυση του διβάθμιου συστήματος χωρίς προθέρμανση αέρα, η συνολική εξέργεια αποτελείται από τη φυσική και τη χημική συνιστώσα. Η φυσική εξέργεια στο ρεύμα του αέρα όπως και στο ρεύμα του νερού υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από τη σχέση:

$$\dot{E}^{PH} = \dot{m} \cdot [h - h_o - T_o \cdot (s - s_o)],$$

όπου  $p_o=1\text{atm}$  και  $T_o=298,15\text{K}$ . Από την άλλη πλευρά, η χημική εξέργεια του αέρα λαμβάνεται ίση με το μηδέν καθώς η χημική του σύσταση συμπίπτει με αυτήν του περιβάλλοντος, ενώ αυτή του νερού δίδεται από τη σχέση:

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \frac{e^{-CH}}{MB},$$

όπου η τιμή της γραμμομοριακής χημικής εξέργειας λαμβάνεται για τα μοντέλα I και II από πίνακα στο παράρτημα της αναφοράς [52]. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις και με βάση την αρίθμηση του σχήματος που ακολουθεί παρατίθεται πίνακας με τις τιμές της εξέργειας για κάθε ρεύμα όπως αυτές υπολογίσθηκαν για την περίπτωση παροχής μάζας αέρα ίσης με  $1,2 \text{ kg/s}$  για τα δύο μοντέλα:



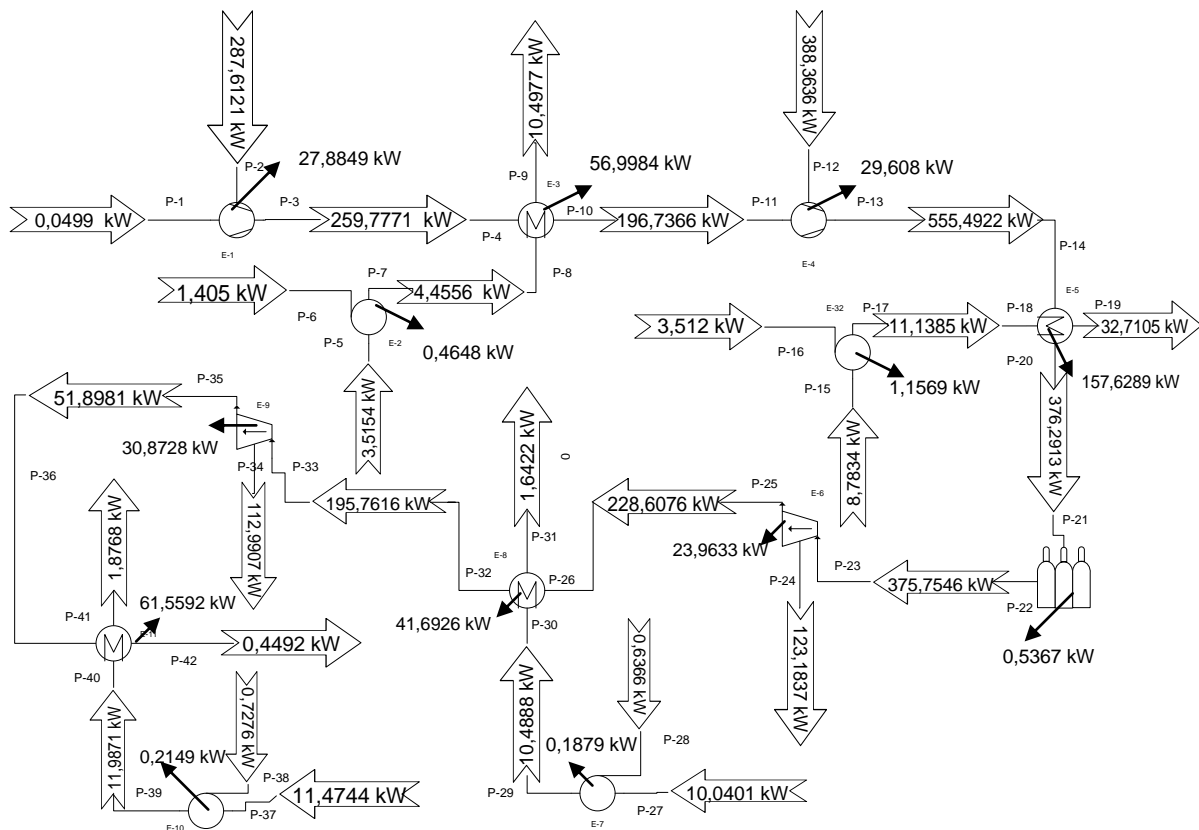
Σχήμα 5.7. Διβάθμιο σύστημα micro-CAES χωρίς προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη με αρίθμηση των ρευμάτων αέρα και νερού.

Μοντέλο I (II)

Μέσο	Κατάσταση	Φυσική εξέργεια $E^{PH}$ (kW)	Χημική εξέργεια $E^{CH}$ (kW)	Συνολική εξέργεια $E$ (kW)
Αέρας	1	0,05	0	0,05
Αέρας	2	259,777	0	259,777
Αέρας	3	196,737	0	196,737
Αέρας	4	555,492	0	555,492

Αέρας	5	376,291	0	376,291
Αέρας	6	375,755	0	375,755
Αέρας	7	228,608	0	228,608
Αέρας	8	195,762	0	195,762
Αέρας	9	51,898	0	51,898
Αέρας	10	0,449	0	0,449
Νερό	1	2,457	1,998 (39,967)	4,455 (42,424)
Νερό	2	8,499	1,998 (39,967)	10,497 (48,466)
Νερό	3	6,143	4,996 (99,916)	11,139 (106,059)
Νερό	4	27,715	4,996 (99,917)	32,711 (127,632)
Νερό	5	9,615	0,874 (17,485)	10,489 (27,09)
Νερό	6	0,768	0,874 (17,485)	1,642 (18,253)
Νερό	7	10,988	0,999 (19,983)	11,987 (30,971)
Νερό	8	0,878	0,999 (19,983)	1,877 (20,861)
Νερό	P1	1,517	1,998 (39,967)	3,515 (41,484)
Νερό	P2	3,788	4,996 (99,9167)	8,784 (103,705)
Νερό	P3	9,166	0,874 (17,485)	10,04 (26,651)
Νερό	P4	10,475	0,999 (19,983)	11,474 (30,458)

Στον παραπάνω πίνακα ως καταστάσεις P1 έως και P4 του νερού χαρακτηρίστηκαν οι καταστάσεις εισόδου του νερού σε καθεμία από τις αντλίες πριν την είσοδο αυτού στους εναλλάκτες. Επίσης σε παρένθεση περιλαμβάνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν για τη χημική και συνολική εξέργεια των ρευμάτων με βάση το μοντέλο II. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η ροή της εξέργειας του συγκεκριμένου συστήματος όπως προέκυψε από τις τιμές της εξέργειας για το μοντέλο I:



Σχήμα 5.8. Απεικόνιση ροής εξέργειας διβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι υπολογισμοί της καταστροφής εξέργειας σε καθεμία από τις συνιστώσες του συστήματος αποθήκευσης. Για κάθε συνιστώσα χρησιμοποιήθηκε ισολογισμός εξέργειας:

$$\dot{E}_D = \sum_j \left( 1 - \frac{T_o}{T_j} \right) \cdot Q_j - W_{cv} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e$$

όπου, όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του πρώτου συστήματος, ο όρος της μεταφοράς εξέργειας λόγω μετάδοσης θερμότητας θεωρείται μηδενικός, λαμβάνοντας τον όγκο ελέγχου κάθε συνιστώσας κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να περιλαμβάνει κάθε συνιστώσα και παράλληλα να βρίσκεται σε απόσταση τέτοια που η μεταφορά θερμότητας να λαμβάνει χώρα στους 25°C.



Βάσει, λοιπόν του ισολογισμού εξέργειας λαμβάνεται η καταστροφή εξέργειας σε κάθε συνιστώσα του συστήματος:

- συμπιεστής ΧΠ:

$$\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = -\frac{\dot{m}_{air}(h_1 - h_2)}{n_m} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = 27,8849kW$$

- 1<sup>η</sup> αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{P1w} - \dot{E}_{1w} = 0,4648kW$
- 1<sup>ος</sup> εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_2 + \dot{E}_{1w} - \dot{E}_3 - \dot{E}_{2w} = 56,9984kW$
- συμπιεστής ΥΠ:

$$\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_3 - \dot{E}_4 = -\frac{\dot{m}_{air}(h_3 - h_4)}{n_m} + \dot{E}_3 - \dot{E}_4 = 29,608kW$$

- 2<sup>η</sup> αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{P2w} - \dot{E}_{3w} = 1,1569kW$
- 2<sup>ος</sup> εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_4 + \dot{E}_{3w} - \dot{E}_5 - \dot{E}_{4w} = 157,6289kW$
- αποθηκευτική διάταξη:  $\dot{E}_D = \dot{E}_5 - \dot{E}_6 = 0,5367kW$

- στρόβιλος ΥΠ:

$$\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_6 - \dot{E}_7 = -\dot{m}_{air}(h_7 - h_6) \cdot n_m + \dot{E}_6 - \dot{E}_7 = 23,9633kW$$

- 3<sup>η</sup> αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{P3w} - \dot{E}_{5w} = 0,1879kW$
- 3<sup>ος</sup> εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_7 + \dot{E}_{5w} - \dot{E}_8 - \dot{E}_{6w} = 41,6926kW$

- στρόβιλος ΧΠ:

$$\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_8 - \dot{E}_9 = -\dot{m}_{air}(h_9 - h_8) \cdot n_m + \dot{E}_8 - \dot{E}_9 = 30,8728kW$$

- 4<sup>η</sup> αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{P4w} - \dot{E}_{7w} = 0,2149kW$
- 4<sup>ος</sup> εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_9 + \dot{E}_{7w} - \dot{E}_{10} - \dot{E}_{8w} = 61,5592kW$

Αθροίζοντας την καταστροφή της εξέργειας σε κάθε συνιστώσα προκύπτει συνολική καταστροφή στο σύστημα ίση με 432,7693 kW, δηλαδή το σύστημα αυτό καταστρέφει κατά προσέγγιση 111,96 kW λιγότερα εν συγκρίσει με το προηγούμενο σύστημα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αισθητά μικρότερη καταστροφή εξέργειας στους δύο εναλλάκτες που ψύχουν το ρεύμα του αέρα πριν την αποθηκευτική διάταξη, αλλά και στη μείωση του ρυθμού καταστροφής της εξέργειας στους στρόβιλους και τους εναλλάκτες που ακολουθούν μετά την αποθηκευτική διάταξη του συμπιεσμένου αέρα. Η καταστροφή της εξέργειας στο σύστημα αυτό καταμερίζεται συγκεκριμένα ως εξής:

Συμπιεστής ΧΠ	1 <sup>η</sup> αντλία	1 <sup>ος</sup> εναλλάκτης	Συμπιεστής ΥΠ	2 <sup>η</sup> αντλία	2 <sup>ος</sup> εναλλάκτης	Αποθηκευτική διάταξη
6,443%	0,107%	13,171%	6,842%	0,267%	36,423%	0,124%

Στρόβιλος ΥΠ	3 <sup>η</sup> αντλία	3 <sup>ος</sup> εναλλάκτης	Στρόβιλος ΧΠ	4 <sup>η</sup> αντλία	4 <sup>ος</sup> εναλλάκτης
5,537%	0,043%	9,634%	7,134%	0,05%	14,225%

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, το μεγαλύτερο ποσοστό καταστροφής της εξέργειας του συστήματος αντιστοιχεί στο δεύτερο εναλλάκτη, ποσοστό μάλιστα που ανέρχεται περίπου στο 1/3 της συνολικής καταστροφής. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθότι το ρεύμα του αέρα από την ενθαλπία των 431,18 kJ/kg κατέρχεται μετά την έξοδο του από τον εναλλάκτη σε θερμοκρασία 20°C και ενθαλπία 20,1 kJ/kg.

Τέλος, θα υπολογισθεί ο συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος με σκοπό την αποτίμηση αυτού από την εξεργειακή πλευρά ως εξής:

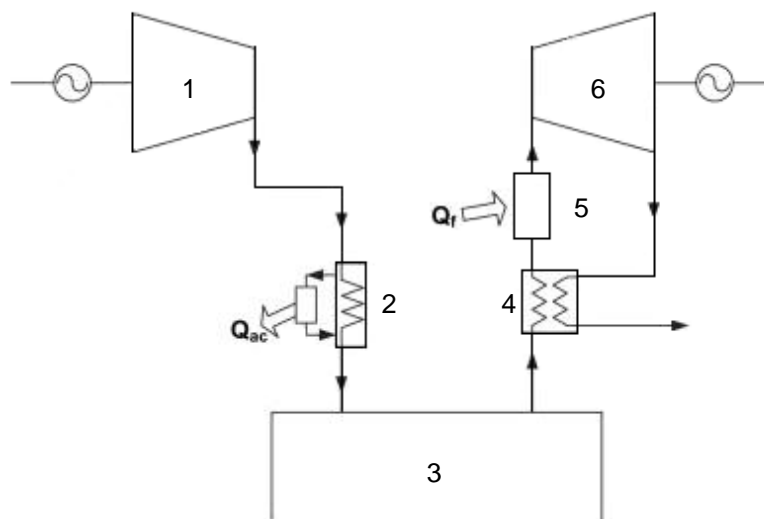
$$n_{\Pi_{CAES}} = \frac{\dot{m}_{air}(h_6 - h_7) \cdot n_m + \dot{m}_{air}(h_8 - h_9) \cdot n_m}{\left( \sum_{i=1}^4 P_{pump_i} + \frac{\dot{m}_{air}(h_2 - h_1)}{n_m} + \frac{\dot{m}_{air}(h_4 - h_3)}{n_m} \right)} + \frac{(\dot{E}_{2w} - \dot{E}_{1w}) + (\dot{E}_{4w} - \dot{E}_{3w}) + (\dot{E}_{5w} - \dot{E}_{6w}) + (\dot{E}_{7w} - \dot{E}_{8w})}{\left( \sum_{i=1}^4 P_{pump_i} + \frac{\dot{m}_{air}(h_2 - h_1)}{n_m} + \frac{\dot{m}_{air}(h_4 - h_3)}{n_m} \right)} = 0,4144 = 41,44\%$$

Συνεπώς, το σύστημα συμπίεσης του αέρα με ενδιάμεση ψύξη πέραν του υψηλότερου ενεργειακού βαθμού απόδοσής του, παρουσιάζει εξεργειακό βαθμό απόδοσης κατά 6,905% μεγαλύτερο σε σχέση με το μονοβάθμιο σύστημα.

### 5.3 Μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση αέρα

Όσον αφορά στο μονοβάθμιο σύστημα micro-CAES με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν την είσοδό του στο στρόβιλο προς αποτόνωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα αυτό συμπιέζει τον αέρα μέχρι την πίεση αποθήκευσης και στη συνέχεια ακολουθεί ψύξη αυτού μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην έξοδο της αποθηκευτικής διάταξης ευρίσκεται ανακομιστής θερμότητας των καυσαερίων του στρόβιλου με σκοπό τη θέρμανση του ψυχρού συμπιεσμένου αέρα πριν την είσοδό του στο θάλαμο καύσης, όπου θα προστεθεί επιπλέον ποσό θερμότητας στο ρεύμα του αέρα. Το σύστημα αυτό συγκριτικά με το σύστημα χωρίς προθέρμανση χαρακτηρίζεται από υψηλότερη αποδοτικότητα αποθήκευσης ενέργειας, ωστόσο απαιτείται καύση συμπληρωματικού καυσίμου και δεν υπάρχει η

δυνατότητα προς χρήση του αέρα για κάλυψη ψυκτικών αναγκών. Στη συνέχεια παρατίθεται απεικόνιση της συγκεκριμένης διάταξης με τις επιμέρους συνιστώσες της:



Σχήμα 5.9. Μονοβάθμιο σύστημα micro-CAES με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη. (1) συμπιεστής, (2) εναλλάκτης θερμότητας, (3) φιάλες αποθήκευσης, (4) ανακομιστής, (5) θάλαμος καύσης, (6) στρόβιλος.

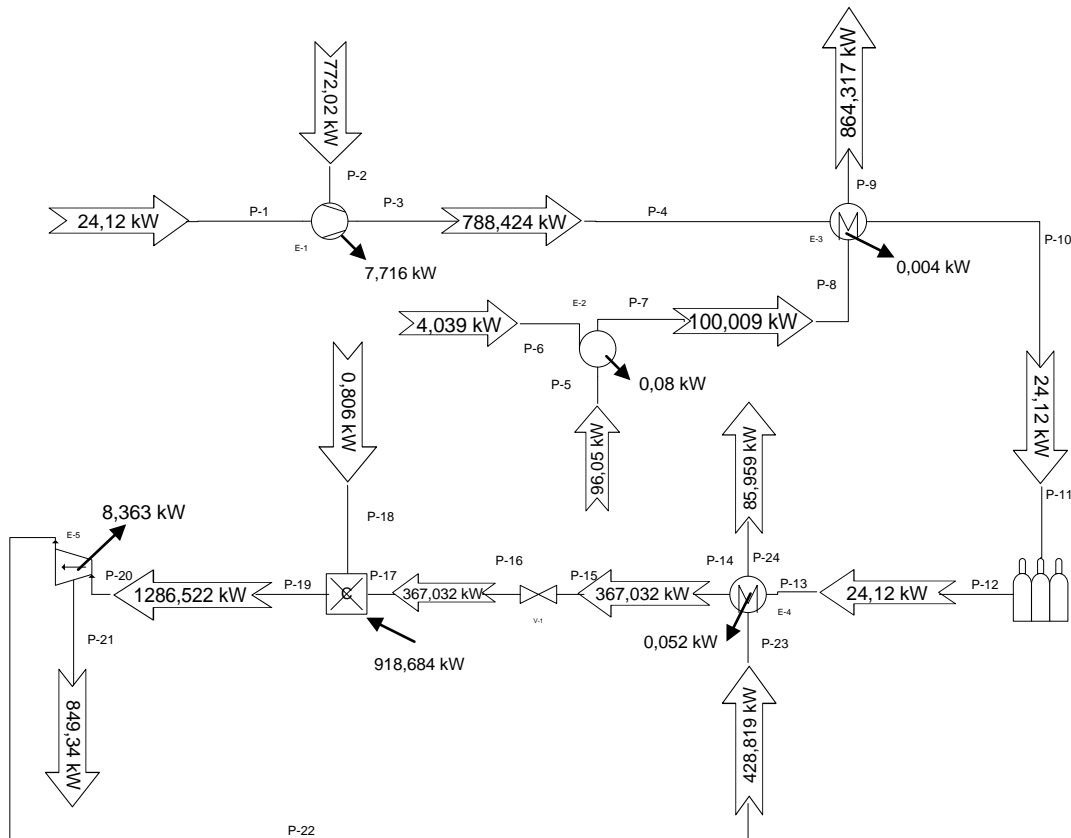
Το παραπάνω σύστημα προσομοιώθηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα IPSE-pro ως εξής:

- παροχή μάζας αέρα στο συμπιεστή ίση με 1,2 kg/s
- είσοδος του αέρα στο συμπιεστή υπό πίεση ίση με 1,013 bar και θερμοκρασία 20°C και συμπίεση αυτού στα 40 bar
- μηχανικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κινητήρα ίσοι με  $\eta_{m,M}=0,99$  και  $\eta_{el,M}=0,98$  αντίστοιχα
- ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή  $\eta_{is,C}=0,85$  και μηχανικός βαθμός απόδοσης ίσος με  $\eta_{m,C}=0,99$  ψύξη του αέρα εξόδου σε θερμοκρασία 20°C με χρήση υδρόψυκτου εναλλάκτη θερμότητας με απώλειες πίεσης στο ρεύμα του αέρα και του νερού ίσες με 0,5 bar και 0,2 bar αντίστοιχα. Η θερμοκρασία εισόδου του νερού ανέρχεται στους 10°C και η παροχή μάζας του στα 2,3 kg/s, ενώ το έργο που προσδίδεται για τη συμπίεση του νερού από τα 3 bar στα 15 bar ανέρχεται στα 4,039kW.
- απώλεια πίεσης στην διάταξη αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα ίση με 0,2 bar
- ανακομιστής καυσαερίων του στρόβιλου με απώλειες πίεσης στο ρεύμα του συμπιεσμένου αέρα και των καυσαερίων ίσες με 0,5 bar και

0,2 bar αντίστοιχα και θερμοκρασία εξόδου του αέρα ίση με 300°C. Όσον αφορά στο ρεύμα των καυσαερίων, αυτό εισέρχεται σε πίεση 1,213 bar και 333,6°C και εξέρχεται στους 68,232°C.

- στραγγαλιστική βαλβίδα με σκοπό την πτώση της πίεσης στα 36,5 bar, καθότι το πρόγραμμα δεν επιτρέπει ψεκασμό φυσικού αερίου της δοθείσης σύνθεσης σε πιέσεις άνω των 36,5 bar και απαιτεί ο ψεκασμός του καυσίμου να γίνεται σε πιέσεις μεγαλύτερες ή ίσες με αυτή του κυρίως ρεύματος
- θάλαμος καύσης με λόγο ισοδυναμίας  $\lambda=3,8$ , κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου ίση με 47898 kJ/kg και  $\Delta p=0,1$  bar
- είσοδος των καυσαερίων στο στρόβιλο με θερμοκρασία 1211,35 K και εκτόνωση αυτού στα 1,213 bar
- ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου ίσος με  $\eta_{is,T}=0,87$  και μηχανικός βαθμός απόδοσης ίσος με  $\eta_{m,T}=0,99$
- μηχανικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας ίσοι με  $\eta_{m,M}=0,99$  και  $\eta_{el,M}=0,98$  αντίστοιχα

Στη συνέχεια παρατίθεται απεικόνιση της ροής ενέργειας του συστήματος όπως αυτή προέκυψε από την εκτέλεση του προγράμματος:



Σχήμα 5.10. Απεικόνιση ροής ενέργειας μονοβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με προθέρμανση.

Η προσομοίωση του συστήματος αυτού έγινε στο IPSEpro για το σύνολο του συστήματος καθότι η προθέρμανση του αέρα μέσω της ανάκτησης θερμότητας και καύσης συμπληρωματικού καυσίμου απέτρεψε την παρουσίαση προβλημάτων αντίστοιχων με αυτά που εμφανίσθηκαν στα συστήματα χωρίς προθέρμανση.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής της ενέργειας, παρέχονται από το στρόβιλο 656,563 kW επιπλέον εν συγκρίσει με το μονοβάθμιο σύστημα χωρίς προθέρμανση προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη γεννήτρια, ωστόσο πλέον τα 234,28 kW που χρησιμοποιούνταν για την κάλυψη ψυκτικών αναγκών δεν είναι πλέον διαθέσιμα στο σύστημα αυτό. Η κατακόρυφη αύξηση της ισχύος που λαμβάνεται από το στρόβιλο οφείλεται στην καύση 0,01918 kg/s καυσίμου με κατώτερη θερμογόνο ικανότητα ίση με 47898 kJ/kg, που αντιστοιχεί σε προσθήκη 918,684 kW στο σύστημα.

Τέλος, παρατίθεται ο υπολογισμός των βαθμών απόδοσης αποθήκευσης και εκμετάλλευσης της θερμότητας συμπίεσης, ενώ εδώ δεν ορίζεται ψυκτική απόδοση του συστήματος. Παράλληλα, αν και ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα διαφέρει από αυτόν ενός αεριοστροβίλου (ή άλλων συμβατικών μηχανών), για λόγους σύγκρισης, θα ορισθεί και θα υπολογισθεί ο θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, έχουμε:

- βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας:

$$n_{αποθ.} = \frac{P_T - Q \cdot n_p}{P_C + P_R} = \frac{(849,34 - 47898 \cdot 0,01918 \cdot 0,4)kW}{(772,024 + 4,039)kW} = 0,6209 = 62,09\%$$

όπου  $P_C$  η ισχύς που παρέχεται στο συμπιεστή του συστήματος,  $P_T$  η ισχύς που λαμβάνεται από το στρόβιλο,  $P_R$  η ισχύς της αντλίας νερού,  $Q$  η κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου και  $n_p$  ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός συμβατικού σταθμού παραγωγής ενέργειας, ο οποίος λαμβάνεται προσεγγιστικά ίσος με 0,40. Συγκεκριμένα, στην παραπάνω σχέση, η ποσότητα  $Q \cdot n_p$  παριστά την ηλεκτρική ενέργεια που θα παραγόταν σε περίπτωση που η εν λόγω ποσότητα καυσίμου χρησιμοποιείτο για την παραγωγή ενέργειας σε συμβατικό σταθμό. Όπως ήταν αναμενόμενο, η προθέρμανση και η προσθήκη καυσίμου στο ρεύμα του αέρα οδήγησε στην αύξηση της ισχύος του στροβίλου, ενώ παράλληλα η απαιτούμενη ισχύς από το συμπιεστή παρέμεινε σταθερή με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης της αποθήκευσης κατά 37,29%.

- βαθμός εκμετάλλευσης της εκλυόμενης θερμότητας από τη συμπίεση:

$$n_{θερμ.} = \frac{Q_C}{P_C + P_R} = \frac{\dot{m}_w(h_{out} - h_{in})}{P_C + P_R} = \frac{2,3 \cdot (375,79 - 43,482)kW}{(772,024 + 4,039)kW} = 0,9848 = 98,48\%$$

δηλαδή ο βαθμός απόδοσης είναι ελαφρά μεγαλύτερος σε σχέση με το μονοβάθμιο σύστημα χωρίς προθέρμανση, γεγονός αναμενόμενο αν αναλογισθεί κανείς ότι από τον παρονομαστή του κλάσματος απουσιάζει μόνο η ισχύς της δεύτερης αντλίας νερού.

- θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$n_{th} = \frac{P_T - P_C - P_{P1}}{Q} = \frac{849,34 - 772,02 - 4,039}{47898 \cdot 0,01918} = 0,0798 = 7,98\%$$

Στο παράρτημα της παρούσας εργασίας παρατίθεται το αντίστοιχο φύλλο του προγράμματος IPSEpro, στο οποίο προσομοιώθηκε το συγκεκριμένο σύστημα αποθήκευσης.

Όσον αφορά στην εξεργειακή ανάλυση του μονοβάθμιου συστήματος με προθέρμανση αέρα, η φυσική εξέργεια στο ρεύμα του αέρα, του νερού, του καυσίμου και των καυσαερίων υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από τη σχέση:  $\dot{E}^{PH} = \dot{m} \cdot [h - h_o - T_o \cdot (s - s_o)]$ , όπου  $p_o = 1 \text{ atm}$  και  $T_o = 298,15 \text{ K}$  με τις εκάστοτε ενθαλπίες και εντροπίες αναφοράς. Από την άλλη πλευρά, η χημική εξέργεια του αέρα λαμβάνεται ίση με το μηδέν καθότι η χημική του σύσταση συμπίπτει με αυτήν του περιβάλλοντος, ενώ αυτή του νερού δίδεται

από τη σχέση:  $\dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \frac{e^{-CH}}{MB}$ , όπου η τιμή της γραμμομοριακής χημικής

εξέργειας λαμβάνεται για τα μοντέλα I και II από πίνακα στο παράρτημα της αναφοράς [52]. Όσον αφορά στη χημική εξέργεια του καυσίμου χρησιμοποιείται η παραπάνω σχέση για το νερό σε συνδυασμό με την κατ' όγκον σύσταση του καυσίμου. Συγκεκριμένα, η χημική εξέργεια του καυσίμου δίδεται από τη σχέση:

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \left( \frac{x_{CH_4} e_{CH_4}^{-CH}}{MB_{CH_4}} + \frac{x_{C_2H_6} e_{C_2H_6}^{-CH}}{MB_{C_2H_6}} + \frac{x_{C_3H_8} e_{C_3H_8}^{-CH}}{MB_{C_3H_8}} + \frac{x_{CO_2} e_{CO_2}^{-CH}}{MB_{CO_2}} + \frac{x_{N_2} e_{N_2}^{-CH}}{MB_{N_2}} \right),$$

όπου  $x_i$  η γραμμομοριακή σύσταση των συστατικών του φυσικού αερίου που προστίθεται προς καύση στον θάλαμο καύσης του συστήματος και  $e^{-CH}$  η τιμή της γραμμομοριακής χημικής εξέργειας για κάθε συστατικό του καυσίμου, που λαμβάνεται για τα μοντέλα I και II από πίνακα στο παράρτημα της αναφοράς [52].

Τέλος, όσον αφορά στον υπολογισμό της χημικής εξέργειας των καυσαερίων, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- αν η ποσότητα των καυσαερίων έρθει στην κατάσταση  $p_o, T_o$ , τότε τμήμα της ποσότητας αυτής θα συμπυκνωθεί. Σε θερμοκρασία, λοιπόν,  $25^\circ\text{C}$  το μίγμα των καυσαερίων θα χαρακτηρίζεται από τη συνύπαρξη συστατικών σε αέρια και υγρή φάση.

- για τον υπολογισμό της νέας κατ' όγκο σύστασης των καυσαερίων στην αέρια μορφή, υπολογίζουμε αρχικά την μερική πίεση των υδρατμών στα καυσαέρια ως εξής:  $p_u = x_u p$ , όπου  $x_u$  η αρχική γραμμομοριακή του υδρατμού στα καυσαέρια.
- κατά την ψύξη των καυσαερίων στους 25°C, σε 1 kmol καυσαερίων θα περιλαμβάνεται ποσότητα  $(1-p_u)$  kmol ξηρών προϊόντων και  $n_u$  kmol υδρατμοί. Στην κατάσταση αυτή η μερική πίεση του υδρατμού θα ισούται με την πίεση κορεσμού  $p_g(25^\circ\text{C})=0,0317$  bar. Συνεπώς, η ποσότητα του υδρατμού που περιλαμβάνεται στην αέρια φάση των καυσαερίων δίδεται από τη σχέση:

$$0,0317\text{bar} = \frac{n_u}{(1-p_u) + n_u} \cdot 1,013\text{bar}$$

- κατά συνέπεια, 1 kmol μίγματος των καυσαερίων στους 25°C θα περιλαμβάνει  $(x_u - n_u)$  kmol νερού.
- με βάση, λοιπόν, τα παραπάνω υπολογίζεται η κατ' όγκο σύσταση των συστατικών των καυσαερίων στην αέρια μορφή ( $x_i'$ ).
- στη συνέχεια υπολογίζεται η ποσότητα:  $\sum x_i' e_i'^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')$  με σκοπό τον υπολογισμό της συνεισφοράς της αέριας φάσης στη χημική εξέργεια του μίγματος.
- τέλος, η γραμμομοριακή χημική εξέργεια των καυσαερίων προκύπτει ίση με:

$$e_{gas}^{-CH} = (1 - (x_u - n_u)) \cdot (\sum x_i' e_i'^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')) + (x_u - n_u) \cdot e_{water}^{-CH}$$

και κατά συνέπεια η χημική εξέργεια των καυσαερίων προκύπτει ίση

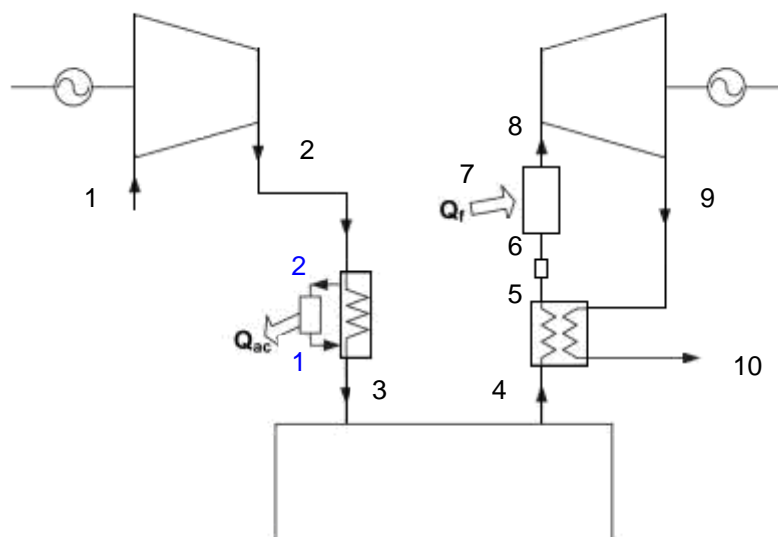
$$\text{με: } \dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \frac{e^{-CH}}{MB}$$

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω σχέσεις στο παρόν σύστημα με τις παραμέτρους που ήδη αναφέρθηκαν, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα για τη χημική εξέργεια του καυσαερίου σύμφωνα με το μοντέλο I και II:

Μοντέλο I (II)

$x_u$	$p_u$ (bar)	$n_u$	$\sum x_i' e_i'^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')$ (kJ/kmol)	$e_{gas}^{-CH}$ (kJ/kmol)	$\dot{E}^{CH}$ (kW)
0,053	0,054	0,031	-53,986 (197,637)	-51,738 (213,592)	-2,163 (8,929)

Στη συνέχεια, με βάση την αρίθμηση του σχήματος που ακολουθεί παρατίθεται πίνακας με τις τιμές της εξέργειας για κάθε ρεύμα όπως αυτές υπολογίσθηκαν για την περίπτωση παροχής μάζας αέρα ίσης με 1,2 kg/s για τα δύο μοντέλα:



Σχήμα 5.11. Μονοβάθμιο σύστημα micro-CAES με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη με αρίθμηση των ρευμάτων.

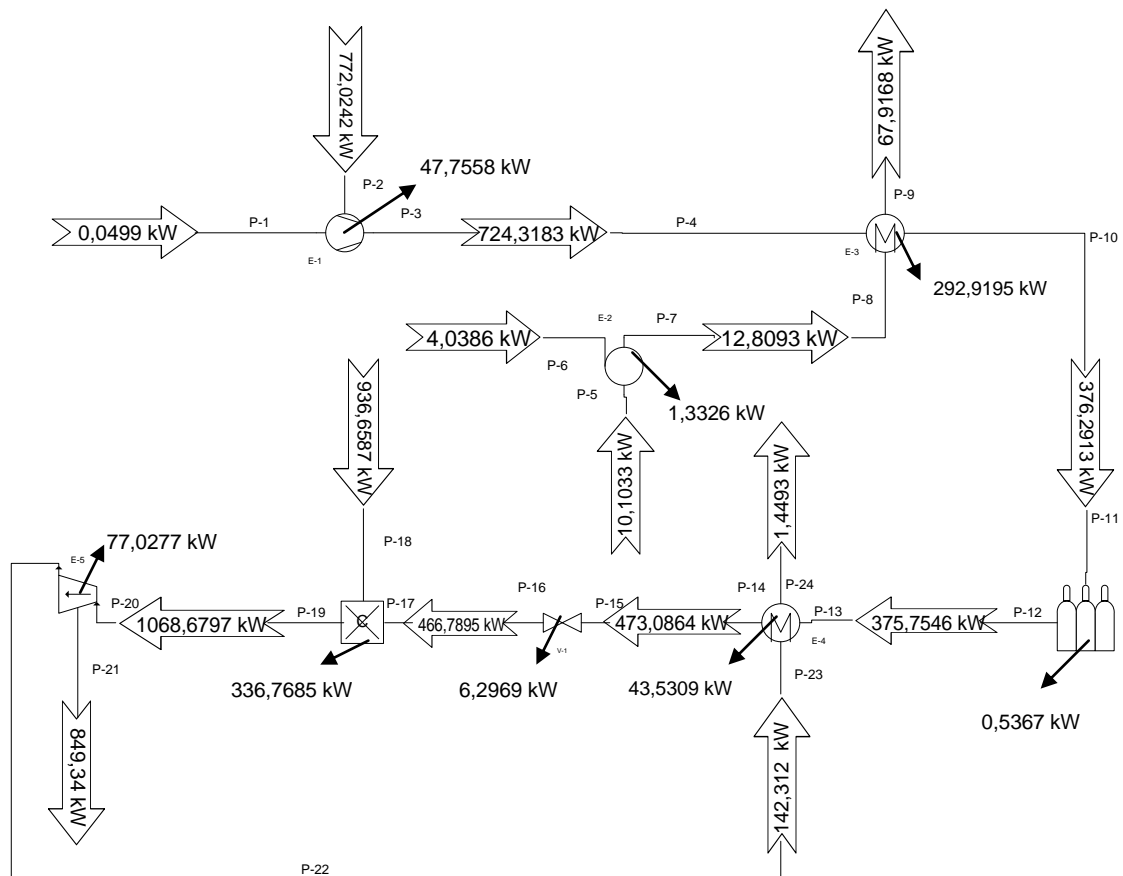
Μοντέλο I (II)

Μέσο	Κατάσταση	Φυσική εξέργεια $E^{PH}$ (kW)	Χημική εξέργεια $E^{CH}$ (kW)	Συνολική εξέργεια $E$ (kW)
Αέρας	1	0,05	0	0,05
Αέρας	2	724,318	0	724,318
Αέρας	3	376,291	0	376,291
Αέρας	4	375,755	0	375,755
Αέρας	5	473,086	0	473,086
Αέρας	6	466,789	0	466,789
Καύσιμο	7	0,002	936,657 (1248,653)	936,659 (1248,655)
Καυσαέρια	8	1070,842	-2,163 (8,929)	1068,679 (1079,771)



Καυσαέρια	9	144,475	-2,163 (8,929)	142,312 (153,404)
Καυσαέρια	10	3,612	-2,163 (8,929)	1,449 (12,541)
Νερό	1	7,064	5,745 (114,904)	12,809 (121,968)
Νερό	2	62,172	5,745 (114,904)	67,917 (177,076)
Νερό	P1	4,358	5,745 (114,904)	10,103 (119,262)

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η ροή της εξέργειας του συγκεκριμένου συστήματος όπως προέκυψε από τις τιμές της εξέργειας για το μοντέλο I:



Σχήμα 5.12. Απεικόνιση ροής εξέργειας μονοβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με προθέρμανση.

Στον παραπάνω πίνακα ως κατάσταση P1 του νερού χαρακτηρίστηκε η κατάσταση εισόδου του νερού στην αντλία, ενώ μεταξύ των ρευμάτων 5 και 6 του αέρα μεσολαβεί στραγγαλιστική βαλβίδα. Επίσης σε παρένθεση περιλαμβάνονται οι τιμές που υπολογίσθηκαν για τη χημική και συνολική εξέργεια των ρευμάτων με βάση το μοντέλο II.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι υπολογισμοί της καταστροφής εξέργειας σε καθεμία από τις συνιστώσες του συστήματος αποθήκευσης. Για κάθε συνιστώσα χρησιμοποιήθηκε ισολογισμός εξέργειας:

$$\dot{E}_D = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \cdot Q_j - W_{cv} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e$$

όπου ο όρος της μεταφοράς εξέργειας λόγω μετάδοσης θερμότητας θεωρείται μηδενικός καθώς ο όγκος ελέγχου λαμβάνεται έτσι ώστε η μεταφορά θερμότητας να λαμβάνει χώρα στους 25°C.

Βάσει, λοιπόν του ισολογισμού εξέργειας λαμβάνεται η καταστροφή εξέργειας σε κάθε συνιστώσα του συστήματος:

- συμπιεστής:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = -\frac{\dot{m}_{air}(h_1 - h_2)}{n_m} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = 47,7558kW$
- αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{p1w} - \dot{E}_{1w} = 1,3326kW$
- εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_2 + \dot{E}_{1w} - \dot{E}_3 - \dot{E}_{2w} = 292,9195kW$
- αποθηκευτική διάταξη:  $\dot{E}_D = \dot{E}_3 - \dot{E}_4 = 0,5367kW$
- ανακομιστής καυσαερίων:  $\dot{E}_D = \dot{E}_4 + \dot{E}_9 - \dot{E}_5 - \dot{E}_{10} = 43,5309kW$
- στραγγαλιστική βαλβίδα:  $\dot{E}_D = \dot{E}_5 - \dot{E}_6 = 6,2969kW$
- θάλαμος καύσης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_6 + \dot{E}_7 - \dot{E}_8 = 334,7685kW$
- στρόβιλος:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_8 - \dot{E}_9 = -\dot{m}_{air}(h_9 - h_8) \cdot n_m + \dot{E}_8 - \dot{E}_9 = 77,0277kW$

Αθροίζοντας την καταστροφή της εξέργειας σε κάθε συνιστώσα προκύπτει συνολική καταστροφή στο σύστημα ίση με 804,1686 kW, δηλαδή το σύστημα αυτό καταστρέφει 259,44 kW περισσότερα εν συγκρίσει με το αντίστοιχο σύστημα χωρίς προθέρμανση αέρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερα υψηλή καταστροφή εξέργειας που υπεισέρχεται στο σύστημα λόγω του θαλάμου καύσης και την αισθητά μικρότερη καταστροφή εξέργειας στον ανακομιστή καυσαερίων συγκριτικά με τον εναλλάκτη που χρησιμοποιείται στο σύστημα χωρίς προθέρμανση για την κάλυψη ψυκτικών αναγκών. Η καταστροφή της εξέργειας στο παρόν σύστημα καταμερίζεται συγκεκριμένα ως εξής:

<b>Συμπιεστής</b>	<b>Αντλία</b>	<b>Εναλλάκτης</b>	<b>Αποθηκευτική διάταξη</b>
5,939%	0,166%	36,425%	0,066%
<b>Ανακομιστής</b>	<b>Στραγγαλιστική βαλβίδα</b>	<b>Θάλαμος καύσης</b>	<b>Στρόβιλος</b>
5,413%	0,783%	41,629%	9,579%

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, το μεγαλύτερο ποσοστό καταστροφής της εξέργειας του συστήματος αντιστοιχεί στο θάλαμο καύσης και κατά δεύτερο λόγο στον εναλλάκτη που είναι τοποθετημένος πριν την αποθηκευτική διάταξη.

Τέλος, θα υπολογισθεί ο συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος με σκοπό την αποτίμηση αυτού από την εξεργειακή πλευρά ως εξής:

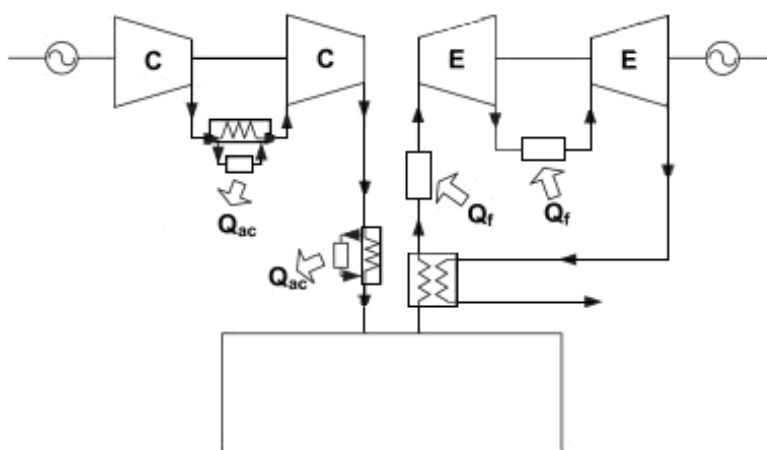
$$n_{\Pi CAES} = \frac{\dot{m}_{air}(h_8 - h_9) \cdot n_m + (\dot{E}_{2w} - \dot{E}_{1w}) + (\dot{E}_5 - \dot{E}_4)}{\left( P_{pump} + \frac{\dot{m}_{air}(h_2 - h_1)}{n_m} + \dot{E}_7 \right)} = 0,5849 = 58,49\%$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό του εξεργειακού βαθμού απόδοσης λήφθηκε υπόψη τόσο η μεταβολή της εξέργειας κατά τη διέλευση του αέρα από τον ανακομιστή όσο και η εξέργεια του ρεύματος του καυσίμου. Όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς, το σύστημα προθέρμανσης του αέρα παρουσιάζει βαθμό απόδοσης υψηλότερο κατά 23,95% σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα χωρίς προθέρμανση του αέρα. Αυτό αποδίδεται στην κατακόρυφη αύξηση της παρεχόμενης ισχύος από το στρόβιλο, αύξηση τόσο μεγάλη που υπερκαλύπτει την αύξηση της καταστροφής εξέργειας με αποτέλεσμα το σύστημα να αποδεικνύεται πιο αποδοτικό.

#### 5.4 Διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση αέρα

Τέλος, θα εξετασθεί το διβάθμιο σύστημα micro-CAES με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν την είσοδό του στο στρόβιλο υψηλής πίεσης. Συγκεκριμένα, το σύστημα αυτό περιλαμβάνει διβάθμια συμπίεση του αέρα με ενδιάμεση ψύξη και ψύξη αυτού μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έξοδό του από το συμπιεστή υψηλής πίεσης. Στην έξοδο της αποθηκευτικής διάταξης ευρίσκεται ανακομιστής θερμότητας των καυσαερίων του στρόβιλου χαμηλής πίεσης με σκοπό τη θέρμανση του

ψυχρού συμπιεσμένου αέρα πριν την είσοδό του στο θάλαμο καύσης, όπου θα προστεθεί επιπλέον ποσό θερμότητας στο ρεύμα του αέρα. Εν συνεχεία ακολουθεί ο στρόβιλος υψηλής πίεσης, ενώ στο ρεύμα καυσαερίων προστίθεται ποσότητα συμπληρωματικού καυσίμου πριν την είσοδο στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης.



Σχήμα 5.13. Διβάθμιο σύστημα micro-CAES με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη.

Όπως και στην περίπτωση του μονοβάθμιου συστήματος, το σύστημα αυτό συγκριτικά με το διβάθμιο σύστημα χωρίς προθέρμανση χαρακτηρίζεται από υψηλότερη αποδοτικότητα αποθήκευσης ενέργειας, ωστόσο απαιτείται καύση συμπληρωματικού καυσίμου σε δύο θαλάμους καύσης και δεν υπάρχει η δυνατότητα προς χρήση του αέρα για κάλυψη ψυκτικών αναγκών.

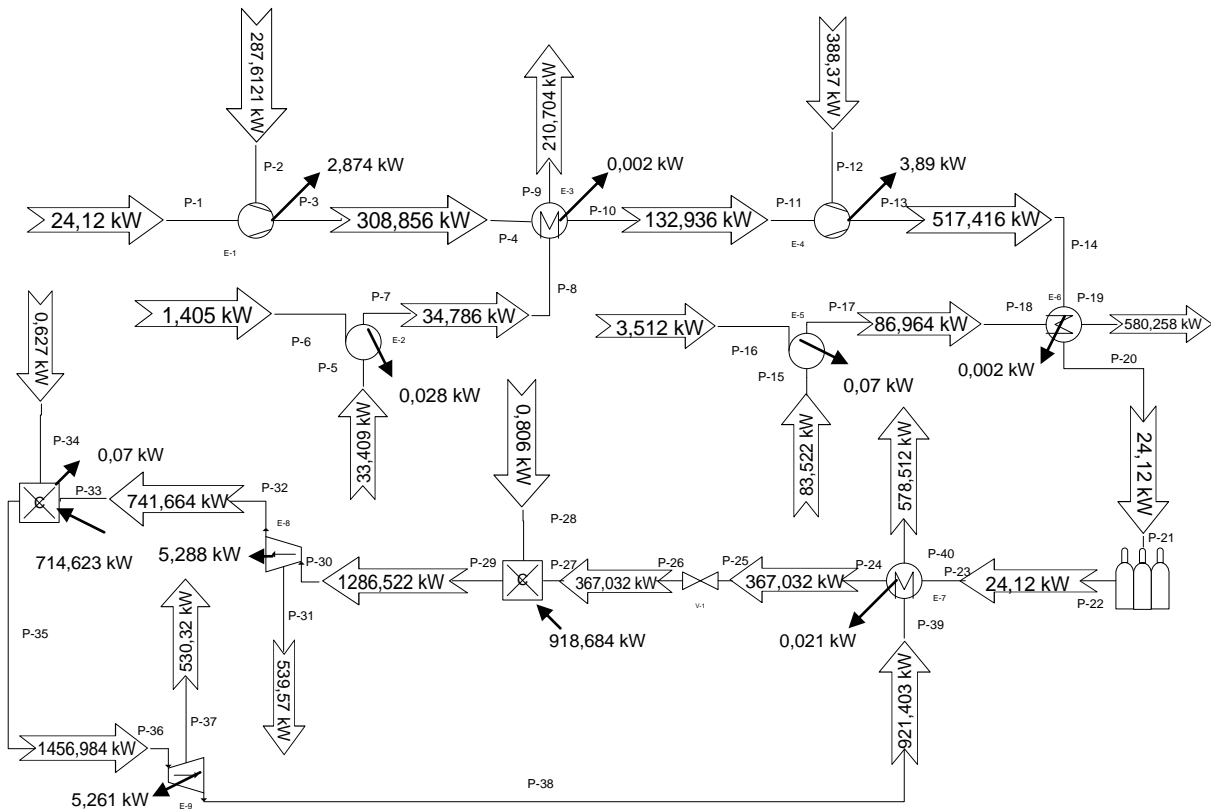
Το παραπάνω σύστημα προσομοιώθηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα IPSE-pro ως εξής:

- παροχή μάζας αέρα στο συμπιεστή ίση με 1,2 kg/s
- είσοδος του αέρα στο συμπιεστή υπό πίεση ίση με 1,013 bar και θερμοκρασία 20°C, συμπίεση στην ενδιάμεση πίεση των 6,3 bar στο συμπιεστή χαμηλής πίεσης και στα 40 bar στον συμπιεστή υψηλής
- μηχανικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κινητήρων ίσοι με  $\eta_{m,M}=0,99$  και  $\eta_{el,M}=0,98$  αντίστοιχα
- ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστών  $\eta_{is,C}=0,85$  και μηχανικός βαθμός απόδοσης ίσος με  $\eta_{m,C}=0,99$
- ενδιάμεση ψύξη του αέρα σε υδρόψυκτο εναλλάκτη με απώλειες πίεσης στο ρεύμα του αέρα και του νερού ίσες με 0,2 bar και

θερμοκρασία εισόδου του νερού τους  $10^{\circ}\text{C}$ . Η παροχή του νερού ανέρχεται στα  $0,8 \text{ kg/s}$ , ενώ απαιτείται έργο ίσο με  $1,405 \text{ kW}$  για τη συμπίεση του νερού από τα  $3 \text{ bar}$  στα  $15 \text{ bar}$ .

- ψύξη του αέρα εξόδου από το συμπιεστή υψηλής πίεσης σε θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$  με χρήση υδρόψυκτου εναλλάκτη θερμότητας με απώλειες πίεσης στο ρεύμα του αέρα και του νερού ίσες με  $0,5 \text{ bar}$  και  $0,2 \text{ bar}$  αντίστοιχα. Η θερμοκρασία εισόδου του νερού ανέρχεται στους  $10^{\circ}\text{C}$ , η παροχή μάζας του στα  $2 \text{ kg/s}$  και το απαιτούμενο έργο της αντλίας στα  $3,512 \text{ kW}$ .
- απώλεια πίεσης στην διάταξη αποθήκευσης ίση με  $0,2 \text{ bar}$
- ανακομιστής καυσαερίων του στροβίλου χαμηλής πίεσης με απώλειες πίεσης στο ρεύμα του συμπιεσμένου αέρα και των καυσαερίων ίσες με  $0,5 \text{ bar}$  και  $0,2 \text{ bar}$  αντίστοιχα και θερμοκρασία εξόδου του αέρα ίση με  $300^{\circ}\text{C}$
- στραγγαλιστική βαλβίδα με σκοπό την πτώση της πίεσης στα  $36,5 \text{ bar}$ , καθότι το πρόγραμμα δεν επιτρέπει ψεκασμό φυσικού αερίου της δοθείσης σύνθεσης σε πιέσεις άνω των  $36,5 \text{ bar}$  και απαιτεί ο ψεκασμός του καυσίμου να γίνεται σε πιέσεις μεγαλύτερες ή ίσες με αυτή του κυρίως ρεύματος
- θάλαμος καύσης με λόγο ισοδυναμίας  $\lambda=3,8$ , κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου ίση με  $47898 \text{ kJ/kg}$  και απώλεια πίεσης ίση με  $0,1 \text{ bar}$
- είσοδος των καυσαερίων στο στρόβιλο με θερμοκρασία  $1211,35 \text{ K}$  και εκτόνωση αυτού στα  $6 \text{ bar}$
- θάλαμος καύσης με λόγο ισοδυναμίας  $\lambda=3,6$ , κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου ίση με  $47897 \text{ kJ/kg}$  και απώλεια πίεσης ίση με  $0,1 \text{ bar}$
- είσοδος των καυσαερίων στο στρόβιλο με θερμοκρασία  $1287,9 \text{ K}$  και εκτόνωση αυτού στα  $1,213 \text{ bar}$
- ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλων ίσος με  $\eta_{is,T}=0,87$  και μηχανικός βαθμός απόδοσης ίσος με  $\eta_{m,T}=0,99$
- μηχανικός και ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης γεννητριών ίσοι με  $\eta_{m,M}=0,99$  και  $\eta_{el,M}=0,98$  αντίστοιχα.

Στη συνέχεια παρατίθεται απεικόνιση της ροής ενέργειας του συγκεκριμένου συστήματος όπως αυτή προέκυψε από την εκτέλεση του προγράμματος:



Σχήμα 5.14. Απεικόνιση ροής ενέργειας διβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με προθέρμανση.

Η προσομοίωση του συστήματος αυτού έγινε στο σύνολό του στο IPSEpro, διότι η προθέρμανση του αέρα μέσω της ανάκτησης θερμότητας και της καύσης συμπληρωματικού καυσίμου απέτρεψε την παρουσίαση προβλημάτων αντίστοιχων με αυτά που εμφανίσθηκαν στα συστήματα χωρίς προθέρμανση.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής της ενέργειας, παρέχονται από τους στροβίλους 833,7156 kW επιπλέον εν συγκρίσει με το αντίστοιχο σύστημα χωρίς προθέρμανση, ωστόσο πλέον τα 237,564 kW που χρησιμοποιούνταν για την κάλυψη ψυκτικών αναγκών δεν είναι πλέον διαθέσιμα. Η κατακόρυφη αύξηση της ισχύος που λαμβάνεται από το στρόβιλο οφείλεται στην καύση 0,01918 kg/s καυσίμου με κατώτερη θερμογόνο ικανότητα ίση με 47898 kJ/kg, που αντιστοιχεί σε προσθήκη 918,684 kW στο σύστημα και την καύση 0,01492 kg/s καυσίμου με κατώτερη θερμογόνο ικανότητα ίση με 47897 kJ/kg στο δεύτερο θάλαμο καύσης, που αντιστοιχεί σε είσοδο 714,623 kW. Από την άλλη πλευρά, τα συναλλασσόμενα ποσά θερμότητας στους εναλλάκτες στην έξοδο των συμπιεστών παραμένουν ίσα με τα αντίστοιχα του διβάθμιου συστήματος χωρίς προθέρμανση καθότι οι αλλαγές στο σύστημα επέρχονται μετά την αποθηκευτική διάταξη.

Τέλος, παρατίθεται ο υπολογισμός του θερμικού βαθμού απόδοσης και των βαθμών απόδοσης αποθήκευσης και εκμετάλλευσης της θερμότητας συμπίεσης. Συγκεκριμένα, έχουμε:

- βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας:

$$n_{αποθ.} = \frac{P_{T_1} + P_{T_2} - Q_1 \cdot n_p - Q_2 \cdot n_p}{P_{C_1} + P_{C_2} + P_{P_1} + P_{P_2}} =$$

$$= \frac{(539,57 + 530,32 - 47898 \cdot 0,01918 \cdot 0,4 - 47897 \cdot 0,01492 \cdot 0,4)kW}{(287,61 + 388,37 + 1,405 + 3,512)kW} =$$

$$= 0,6118 = 61,18\%$$

όπου  $Q_1$  η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα στον πρώτο θάλαμο καύσης,  $Q_2$  το αντίστοιχο μέγεθος για το μίγμα του δεύτερου θαλάμου καύσης και  $n_p$  ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός συμβατικού σταθμού παραγωγής ενέργειας. Όπως ήταν αναμενόμενο, η προθέρμανση και η προσθήκη καυσίμου στο ρεύμα του αέρα και των καυσαερίων εν συνεχεία οδήγησε στην αύξηση της ισχύος των στροβίλων, ενώ παράλληλα η απαιτούμενη ισχύς από τους συμπίεστρες παρέμεινε σταθερή με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης της αποθήκευσης κατά 26,56%.

- βαθμός εκμετάλλευσης της εκλυόμενης θερμότητας από τη συμπίεση:

$$n_{θερμ.} = \frac{Q_{C_1} + Q_{C_2}}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2}} = \frac{[\dot{m}_w(h_{out} - h_{in})]_1 + [\dot{m}_w(h_{out} - h_{in})]_2}{P_C + P_{P_1} + P_{P_2}} =$$

$$= \frac{0,8 \cdot (263,38 - 43,482) + 2 \cdot (290,13 - 43,482)kW}{(287,612 + 388,37 + 1,405 + 3,512)kW} = 0,9828 = 98,28\%$$

δηλαδή ο βαθμός απόδοσης είναι ελαφρά μεγαλύτερος σε σχέση με το διβάθμιο σύστημα χωρίς προθέρμανση, γεγονός αναμενόμενο αν αναλογισθεί κανείς ότι από τον παρονομαστή του κλάσματος απουσιάζουν μόνο οι όροι της ισχύος των δύο αντλιών νερού μετά την αποθηκευτική διάταξη.

- θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$n_{th} = \frac{(P_{T_1} + P_{T_2}) - (P_{C_1} + P_{C_2} + P_{P_1} + P_{P_2})}{Q_1 + Q_2} =$$

$$= \frac{(539,57 + 568,04) - (287,61 + 388,37 + 1,405 + 3,512)}{47898 \cdot 0,01918 + 47897 \cdot 0,01492} = 0,2382 = 23,82\%$$

Στο παράρτημα της παρούσας εργασίας παρατίθεται το αντίστοιχο φύλλο του προγράμματος IPSEpro, στο οποίο προσομοιώθηκε το συγκεκριμένο σύστημα αποθήκευσης.

Όσον αφορά στην εξεργειακή ανάλυση του διβάθμιου συστήματος με προθέρμανση αέρα, η φυσική εξέργεια στο ρεύμα του αέρα, του νερού, του

καυσίμου και των καυσαερίων υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από τη σχέση:

$$\dot{E}^{PH} = \dot{m} \cdot [h - h_o - T_o \cdot (s - s_o)],$$

όπου  $p_o=1\text{atm}$  και  $T_o=298,15\text{K}$  με τις εκάστοτε ενθαλπίες και εντροπίες αναφοράς. Από την άλλη πλευρά, η χημική εξέργεια του αέρα λαμβάνεται ίση με το μηδέν καθότι η χημική του σύσταση συμπίπτει με αυτήν του περιβάλλοντος, ενώ αυτή του νερού δίδεται από τη σχέση:

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \frac{e^{-CH}}{MB},$$

όπου η τιμή της γραμμομοριακής χημικής εξέργειας λαμβάνεται για τα μοντέλα I και II από πίνακα στο παράρτημα της αναφοράς [52]. Όσον αφορά στη χημική εξέργεια του καυσίμου, χρησιμοποιείται η παραπάνω σχέση για το νερό σε συνδυασμό με την κατ' όγκον σύσταση του καυσίμου:

$$\dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \left( \frac{x_{CH_4} e_{CH_4}^{-CH}}{MB_{CH_4}} + \frac{x_{C_2H_6} e_{C_2H_6}^{-CH}}{MB_{C_2H_6}} + \frac{x_{C_3H_8} e_{C_3H_8}^{-CH}}{MB_{C_3H_8}} + \frac{x_{CO_2} e_{CO_2}^{-CH}}{MB_{CO_2}} + \frac{x_{N_2} e_{N_2}^{-CH}}{MB_{N_2}} \right)$$

όπου  $x_i$  η γραμμομοριακή σύσταση των συστατικών του φυσικού αερίου που προστίθεται προς καύση στους θαλάμους καύσης του συστήματος και  $e^{-CH}$  η τιμή της γραμμομοριακής χημικής εξέργειας για κάθε συστατικό του καυσίμου, που λαμβάνεται για τα μοντέλα I και II από πίνακα στο παράρτημα της αναφοράς [52]. Τέλος, όσον αφορά στον υπολογισμό της χημικής εξέργειας των καυσαερίων που εξέρχονται από τους θαλάμους καύσης, ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στην περίπτωση του μονοβάθμιου συστήματος με προθέρμανση. Υπολογίζεται, δηλαδή, η κατ' όγκο σύσταση των συστατικών των καυσαερίων που βρίσκονται στην αέρια μορφή, η ποσότητα  $\sum x_i' e_i^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')$  για την εύρεση της συνεισφοράς της αέριας φάσης στη χημική εξέργεια του μίγματος, η γραμμομοριακή χημική εξέργεια  $e_{gas}^{-CH} = (1 - (x_u - n_u)) \cdot (\sum x_i' e_i^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')) + (x_u - n_u) \cdot e_{water}^{-CH}$  και εν τέλει η χημική εξέργεια του ρεύματος των καυσαερίων:  $\dot{E}^{CH} = \dot{m} \cdot \frac{e^{-CH}}{MB}$ .

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις υπολογισμού της χημικής εξέργειας των καυσαερίων στο παρόν σύστημα με τις παραμέτρους που ήδη αναφέρθηκαν, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα για τη χημική εξέργεια σύμφωνα με το μοντέλο I και II:



- Καυσαέρια μετά τον 1<sup>ο</sup> Θ.Κ.:

Μοντέλο I

$x_u$	$p_u$ (bar)	$n_u$	$\sum x_i' e_i'^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')$ (kJ/kmol)	$e_{gas}^{-CH}$ (kJ/kmol)	$\dot{E}^{CH}$ (kW)
0,053	0,054	0,031	-53,986	-51,738	-2,163

Μοντέλο II

$x_u$	$p_u$ (bar)	$n_u$	$\sum x_i' e_i'^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')$ (kJ/kmol)	$e_{gas}^{-CH}$ (kJ/kmol)	$\dot{E}^{CH}$ (kW)
0,053	0,054	0,031	197,637	213,592	8,929

- Καυσαέρια μετά τον 2<sup>ο</sup> Θ.Κ.:

Μοντέλο I

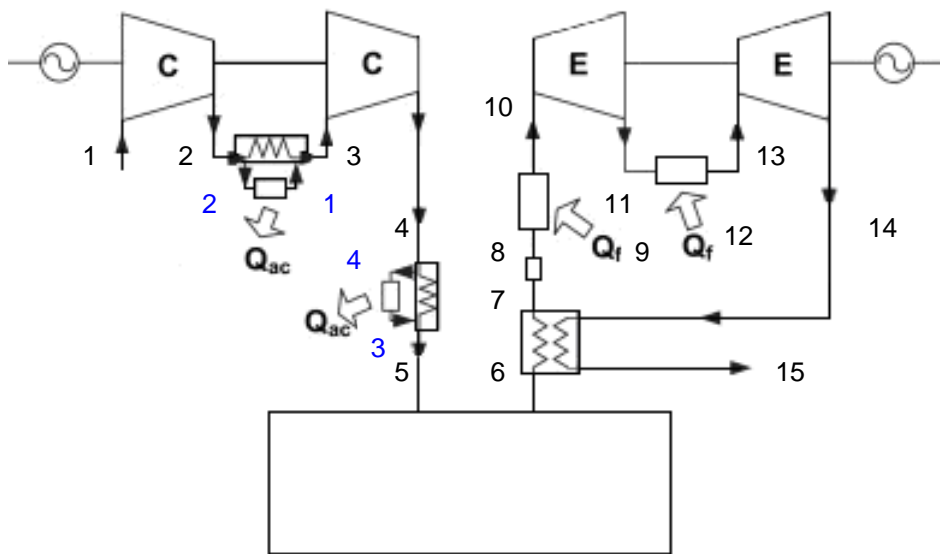
$x_u$	$p_u$ (bar)	$n_u$	$\sum x_i' e_i'^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')$ (kJ/kmol)	$e_{gas}^{-CH}$ (kJ/kmol)	$\dot{E}^{CH}$ (kW)
0,093	0,094	0,029	125,739	120,613	5,094

Μοντέλο II

$x_u$	$p_u$ (bar)	$n_u$	$\sum x_i' e_i'^{-CH} + \bar{R}T_o \sum x_i' \ln(x_i')$ (kJ/kmol)	$e_{gas}^{-CH}$ (kJ/kmol)	$\dot{E}^{CH}$ (kW)
0,093	0,094	0,029	507,599	532,509	22,489

Όπως παρατηρούμε η χημική εξέργεια των καυσαερίων που εξέρχονται από τον πρώτο θάλαμο καύσης συμπίπτει με αυτήν των καυσαερίων του μονοβάθμιου συστήματος, γεγονός αναμενόμενο καθότι προστίθεται το ίδιο καύσιμο και η καύση διεξάγεται υπό τις αυτές συνθήκες.

Στη συνέχεια, με βάση την αρίθμηση του σχήματος που ακολουθεί παρατίθεται πίνακας με τις τιμές της εξέργειας για κάθε ρεύμα όπως αυτές υπολογίσθηκαν για την περίπτωση παροχής μάζας αέρα ίσης με 1,2 kg/s για τα δύο μοντέλα:



Σχήμα 5.15. Διβάθμιο σύστημα micro-CAES με προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα μετά την έξοδο από την αποθηκευτική διάταξη με αρίθμηση των ρευμάτων.

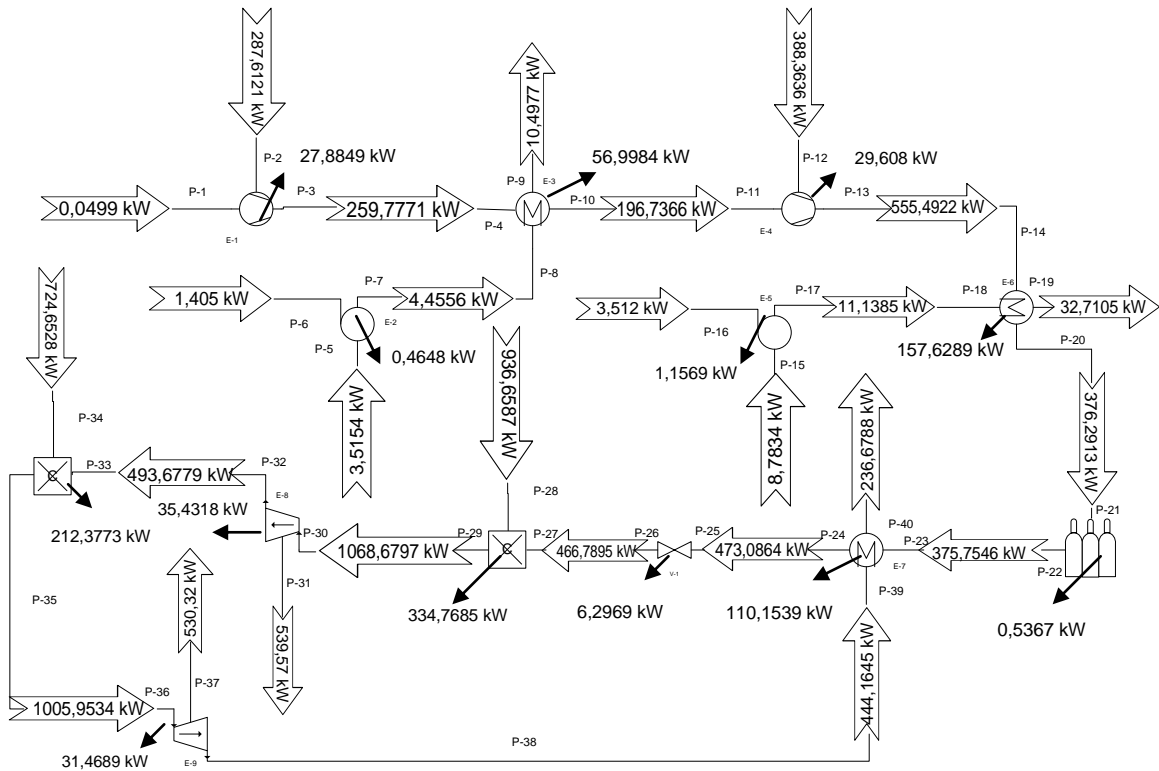
Μοντέλο I (II)

Μέσο	Κατάσταση	Φυσική εξέργεια $E^{PH}$ (kW)	Χημική εξέργεια $E^{CH}$ (kW)	Συνολική εξέργεια $E$ (kW)
Αέρας	1	0,05	0	0,05
Αέρας	2	259,777	0	259,777
Αέρας	3	196,737	0	196,737
Αέρας	4	555,492	0	555,492
Αέρας	5	376,291	0	376,291
Αέρας	6	375,755	0	375,755
Αέρας	7	473,086	0	473,086
Αέρας	8	466,789	0	466,789
Καύσιμο	9	0,002	936,657 (1248,653)	936,659 (1248,655)
Καυσαέρια	10	1070,842	-2,163 (8,929)	1068,679 (1079,771)

Καυσαέρια	11	495,841	-2,163 (8,929)	493,678 (504,77)
Καύσιμο	12	-3,966	728,619 (971,319)	724,653 (967,353)
Καυσαέρια	13	1000,859	5,094 (22,489)	1005,953 (1023,348)
Καυσαέρια	14	439,071	5,094 (22,489)	444,165 (461,56)
Καυσαέρια	15	231,585	5,094 (22,489)	236,679 (254,074)
Νερό	1	2,457	1,998 (39,967)	4,455 (42,424)
Νερό	2	8,499	1,998 (39,967)	10,497 (48,466)
Νερό	3	6,143	4,996 (99,917)	11,139 (106,06)
Νερό	4	27,715	4,996 (99,917)	32,711 (127,632)
Νερό	P1	1,517	1,998 (39,967)	3,515 (41,484)
Νερό	P2	3,788	4,996 (99,917)	8,784 (103,705)

Στον παραπάνω πίνακα ως κατάστασεις P1 και P2 του νερού χαρακτηρίστηκαν οι καταστάσεις εισόδου του νερού στις αντλίες, ενώ μεταξύ των ρευμάτων 7 και 8 του αέρα μεσολαβεί στραγγαλιστική βαλβίδα. Επίσης σε παρένθεση περιλαμβάνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν για τη χημική και συνολική εξέργεια των ρευμάτων με βάση το μοντέλο II.

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η ροή της εξέργειας του συγκεκριμένου συστήματος όπως προέκυψε από τις τιμές της εξέργειας για το μοντέλο I:



Σχήμα 5.16. Απεικόνιση ροής εξέργειας διβάθμιου συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με προθέρμανση.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι υπολογισμοί της καταστροφής εξέργειας σε καθεμία από τις συνιστώσες του συστήματος αποθήκευσης. Για κάθε συνιστώσα χρησιμοποιήθηκε ισολογισμός εξέργειας:

$$\dot{E}_D = \sum_j \left( 1 - \frac{T_o}{T_j} \right) \cdot Q_j - W_{cv} + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e$$

όπου ο όρος της μεταφοράς εξέργειας λόγω μετάδοσης θερμότητας θεωρείται μηδενικός καθώς ο όγκος ελέγχου λαμβάνεται έτσι ώστε η μεταφορά θερμότητας να λαμβάνει χώρα στους 25°C.

Βάσει, λοιπόν του ισολογισμού εξέργειας λαμβάνεται η καταστροφή εξέργειας σε κάθε συνιστώσα του συστήματος:

- συμπίεστης ΧΠ:

$$\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = -\frac{\dot{m}_{air}(h_1 - h_2)}{n_m} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = 27,8849 kW$$

- 1<sup>η</sup> αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{P1w} - \dot{E}_{1w} = 0,4648 kW$

- 1<sup>ος</sup> εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_2 + \dot{E}_{1w} - \dot{E}_3 - \dot{E}_{2w} = 56,9984 kW$

- συμπίεστης ΥΠ:

$$\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_3 - \dot{E}_4 = -\frac{\dot{m}_{air}(h_3 - h_4)}{n_m} + \dot{E}_3 - \dot{E}_4 = 29,608kW$$

- 2<sup>η</sup> αντλία νερού:  $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{P2w} - \dot{E}_{3w} = 1,1569kW$
- 2<sup>ος</sup> εναλλάκτης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_4 + \dot{E}_{3w} - \dot{E}_5 - \dot{E}_{4w} = 157,6289kW$
- αποθηκευτική διάταξη:  $\dot{E}_D = \dot{E}_5 - \dot{E}_6 = 0,5367kW$
- ανακομιστής καυσαερίων:  $\dot{E}_D = \dot{E}_6 + \dot{E}_{14} - \dot{E}_7 - \dot{E}_{15} = 110,1539kW$
- στραγγαλιστική βαλβίδα:  $\dot{E}_D = \dot{E}_7 - \dot{E}_8 = 6,2969kW$
- 1<sup>ος</sup> θάλαμος καύσης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_8 + \dot{E}_9 - \dot{E}_{10} = 334,7685kW$
- στρόβιλος ΥΠ:  
 $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{10} - \dot{E}_{11} = -\dot{m}_{air}(h_{11} - h_{10}) \cdot n_m + \dot{E}_{10} - \dot{E}_{11} = 35,4318kW$
- 2<sup>ος</sup> θάλαμος καύσης:  $\dot{E}_D = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{12} - \dot{E}_{13} = 212,3773kW$
- στρόβιλος ΧΠ:  
 $\dot{E}_D = -W_{cv} + \dot{E}_{13} - \dot{E}_{14} = -\dot{m}_{air}(h_{14} - h_{13}) \cdot n_m + \dot{E}_{13} - \dot{E}_{14} = 31,4689kW$

Αθροίζοντας την καταστροφή της εξέργειας σε κάθε συνιστώσα προκύπτει συνολική καταστροφή στο σύστημα ίση με 1004,776 kW, δηλαδή το σύστημα αυτό καταστρέφει 572,01 kW περισσότερα εν συγκρίσει με το αντίστοιχο σύστημα χωρίς προθέρμανση αέρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερα υψηλή καταστροφή εξέργειας που υπεισέρχεται στο σύστημα λόγω των θαλάμων καύσης. Παράλληλα, το σύστημα αυτό καταστρέφει κατά προσέγγιση 200,61 kW περισσότερα από το μονοβάθμιο σύστημα με προθέρμανση, γεγονός που οφείλεται στο δεύτερο θάλαμο καύσης που υπεισέρχεται σε αυτό ενώ ταυτόχρονα η μεγαλύτερη καταστροφή στον ανακομιστή εξισορροπείται από τη μείωση της καταστροφής στους εναλλάκτες πριν την αποθηκευτική διάταξη. Η καταστροφή της εξέργειας στο παρόν σύστημα καταμερίζεται συγκεκριμένα ως εξής:

Συμπιεστής ΧΠ	1 <sup>η</sup> αντλία	1 <sup>ος</sup> εναλλάκτης	Συμπιεστής ΥΠ	2 <sup>η</sup> αντλία	2 <sup>ος</sup> εναλλάκτης	Αποθηκευτική διάταξη
2,775%	0,046%	5,673%	2,947%	0,115%	15,688%	0,053%

Ανακομιστής	Στραγγαλιστική Βαλβίδα	1 <sup>ος</sup> Θ.Κ.	Στρόβιλος ΥΠ	2 <sup>ος</sup> Θ.Κ.	Στρόβιλος ΧΠ
10,963%	0,627%	33,318%	3,526%	21,137%	3,132%

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, το μεγαλύτερο ποσοστό καταστροφής της εξέργειας του συστήματος αντιστοιχεί στους θαλάμους καύσης, ποσοστό που ξεπερνά συνολικά το 50%.

Τέλος, θα υπολογισθεί ο συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος με σκοπό την αποτίμηση αυτού από την εξεργειακή πλευρά και τη σύγκρισή του με τα υπόλοιπα συστήματα. Συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης προκύπτει ίσος με:

$$n_{\Pi}^{CAES} = \frac{\dot{m}_{gas}(h_{10} - h_{11}) \cdot n_m + \dot{m}_{gas2}(h_{13} - h_{14}) \cdot n_m}{\left( \sum_{i=1}^2 P_{pump_i} + \frac{\dot{m}_{air}(h_2 - h_1)}{n_m} + \frac{\dot{m}_{air}(h_4 - h_3)}{n_m} + \dot{E}_9 + \dot{E}_{12} \right)} + \frac{(\dot{E}_{2w} - \dot{E}_{1w}) + (\dot{E}_{4w} - \dot{E}_{3w}) + (\dot{E}_7 - \dot{E}_6)}{\left( \sum_{i=1}^2 P_{pump_i} + \frac{\dot{m}_{air}(h_2 - h_1)}{n_m} + \frac{\dot{m}_{air}(h_4 - h_3)}{n_m} + \dot{E}_9 + \dot{E}_{12} \right)} = 0,5101 = 51,01\%$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό του εξεργειακού βαθμού απόδοσης λήφθηκε υπόψη τόσο η μεταβολή της εξέργειας κατά τη διέλευση του αέρα από τον ανακομιστή όσο και η εξέργεια των ρευμάτων καυσίμου. Όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς, το διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση του αέρα παρουσιάζει βαθμό απόδοσης υψηλότερο κατά 9,57% σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα χωρίς προθέρμανση. Αυτό αποδίδεται στην κατακόρυφη αύξηση της παρεχόμενης ισχύος από τους στροβίλους, αύξηση της τάξεως των 833,7156 KW η οποία είναι τόσο μεγάλη που υπερκαλύπτει την αύξηση της καταστροφής εξέργειας λόγω των θαλάμων καύσης με αποτέλεσμα το σύστημα αυτό να αποδεικνύεται πιο αποδοτικό. Επίσης, ο βαθμός απόδοσης του παρόντος συστήματος είναι κατά 7,48% χαμηλότερος εν συγκρίσει με το μονοβάθμιο σύστημα με προθέρμανση, γεγονός το οποίο οφείλεται στην εξέργεια που εισέρχεται στο σύστημα μέσω του καυσίμου στο δεύτερο θάλαμο καύσης, ποσό το οποίο είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερο του αθροίσματος του επιπλέον έργου που αποδίδεται από τους στροβίλους και της μειωμένης ποσότητας ισχύος που απαιτούν οι συμπιεστές.

Συνοψίζοντας, παρατίθεται στη συνέχεια ο παρακάτω συγκριτικός πίνακας με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των προαναφερθέντων συστημάτων:

	<b>Μονοβάθμιο χωρίς προθέρμανση</b>	<b>Διβάθμιο χωρίς προθέρμανση</b>	<b>Μονοβάθμιο με προθέρμανση</b>	<b>Διβάθμιο με προθέρμανση</b>
Βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας	24,79%	34,62%	62,09%	61,18%
Βαθμός εκμετάλλευσης θερμότητας συμπύεσης	98,3%	98,09%	98,48%	98,28%
Ψυκτικός βαθμός απόδοσης	30,15%	34,49%	-	-
Θερμικός βαθμός απόδοσης	-	-	7,98%	23,82%
Εξεργειακός βαθμός απόδοσης	34,54%	41,44%	58,49%	51,01%

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται η αύξηση του βαθμού απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης λόγω της ενδιάμεσης ψύξης μεταξύ των δύο βαθμίδων συμπύεσης και της αναθέρμανσης μεταξύ των δύο στροβίλων. Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται σαφής βελτίωση του βαθμού απόδοσης αποθήκευσης και του εξεργειακού βαθμού στα συστήματα με προθέρμανση του αέρα λόγω αύξησης της παραγωγής ισχύος από τους στροβίλους. Τέλος, δεν παρατηρείται κάποια βελτίωση του βαθμού αποθήκευσης με την εισαγωγή της δεύτερης βαθμίδας συμπύεσης στο σύστημα με προθέρμανση του αέρα καθότι η αυξημένη ισχύς των στροβίλων δεν επαρκεί για να καλύψει την εισαγωγή ισχύος στο σύστημα υπό τη μορφή καυσίμου. Αναφορικά με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, αυτός μειώνεται αισθητά λόγω της προσθήκης της χημικής εξεργειας του καυσίμου στο δεύτερο θάλαμο καύσης.





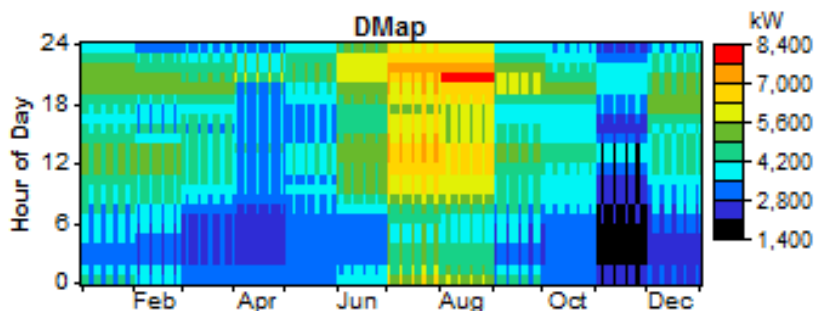
## 6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΤΗ ΜΟΡΦΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ H<sub>2</sub> ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ HOMER

Στην παρούσα ενότητα θα εξετασθεί η περίπτωση αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υδρογόνου προσομοιώνοντας το σύστημα στο υπολογιστικό πρόγραμμα HOMER με χρήση ανεμολογικών στοιχείων και στοιχείων φορτίου για τη νήσο Κάρπαθο και για οικισμό μικρότερης κλίμακας.

### 6.1 Σταθερές είσοδοι προγράμματος

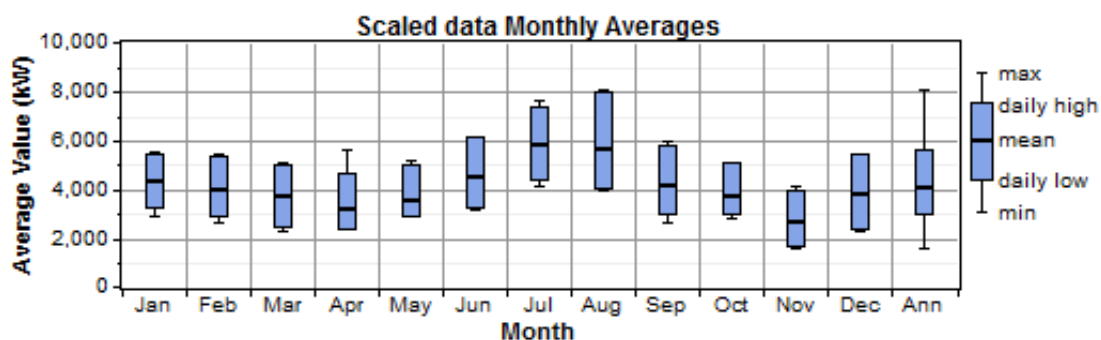
#### 6.1.1 Φορτίο

Για την εκτέλεση του εν λόγω προγράμματος απαιτείται η συμπλήρωση των μέσων ωριαίων στοιχείων του φορτίου της εξεταζόμενης περιοχής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους τόσο κατά τις πρώτες πέντε ημέρες της εβδομάδας όσο και κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου. Κατά συνέπεια, με βάση ωριαία στοιχεία φορτίου της ΔΕΗ για τη νήσο Κάρπαθο για το σύνολο των ημερών του έτους 2009, υπολογίσθηκε η μέση ωριαία τιμή του φορτίου για κάθε μήνα του έτους και τα στοιχεία αυτά εισήχθησαν στο πρόγραμμα. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η διακύμανση του φορτίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, ενώ παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση των τιμών του φορτίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω αυξημένης τουριστικής δραστηριότητας.



Σχήμα 6.1. Χρονική διακύμανση του φορτίου κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους 2009.

Βάσει των στοιχείων του φορτίου που εισήχθησαν στο πρόγραμμα, υπολογίσθηκε το μέσο ετήσιο φορτίο του νησιού ίσο με 4,148 MW και αιχμή ζήτησης ίση με 8,054 MW, ενώ η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας βρέθηκε ίση με 99,545 MWh/ημέρα. Παράλληλα, σχεδιάσθηκε διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές του φορτίου για τον κάθε μήνα, αλλά και για το σύνολο του έτους:



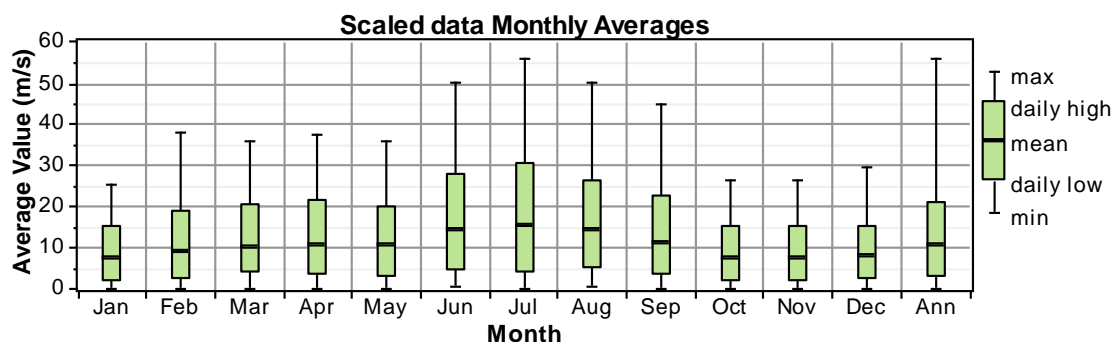
Σχήμα 6.2. Απεικόνιση μέσων, μέγιστων και ελάχιστων τιμών του φορτίου κάθε μήνα και του συνόλου του έτους 2009.

### 6.1.2 Ανεμολογικά δεδομένα

Πέραν των στοιχείων φορτίου που απαιτούνται ως είσοδος για την εκτέλεση του προγράμματος, απαιτείται η συμπλήρωση των μέσων μηνιαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου. Βάσει, λοιπόν, των χαρτών εκμεταλλεύσιμου αιολικού δυναμικού του ΚΑΠΕ και στοιχείων της αναφοράς [53], λήφθηκαν οι παρακάτω τιμές ως μέσες μηνιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για τοποθεσίες της Καρπάθου με υψηλό αιολικό δυναμικό:

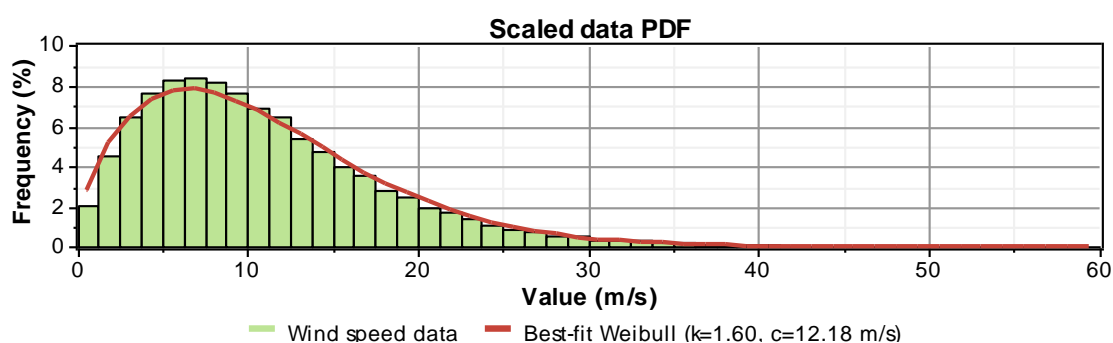
Μήνας	Μέση ταχύτητα ανέμου (m/sec)
Ιανουάριος	7,76
Φεβρουάριος	9,35
Μάρτιος	10,62
Απρίλιος	11,25
Μάιος	10,94
Ιούνιος	14,78
Ιούλιος	15,88
Αύγουστος	14,67
Σεπτέμβριος	11,87
Οκτώβριος	7,69
Νοέμβριος	8,04
Δεκέμβριος	8,32
<b>Μέση ετήσια τιμή</b>	<b>10,938</b>

Οι μετρήσεις του αιολικού δυναμικού θεωρήθηκε ότι έγιναν σε υψόμετρο 40 μέτρων, η παράμετρος  $k$  της κατανομής Weibull λήφθηκε ίση με 1,6, ενώ ως ώρα εμφάνισης της υψηλότερης ταχύτητας του ανέμου λήφθηκε η τρίτη μετά μεσημβρία. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και τις παραμέτρους που ορίστηκαν, προέκυψε το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για τον κάθε μήνα, αλλά και για το σύνολο του έτους:



Σχήμα 6.3. Απεικόνιση μέσων, μέγιστων και ελάχιστων τιμών της ταχύτητας του ανέμου για κάθε μήνα και για το σύνολο του έτους.

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η συχνότητα εμφάνισης κάθε ταχύτητας κατά τη διάρκεια του έτους, ενώ παριστάνεται με την κόκκινη γραμμή παριστάνεται η κατανομή Weibull ( $k=1,6$  και  $c=12,18$  m/sec) που προσαρμόζεται κατά βέλτιστο τρόπο στα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα:



Σχήμα 6.4. Συχνότητα εμφάνισης ταχυτήτων κατά τη διάρκεια του έτους και βέλτιστη προσέγγιση των δεδομένων από κατανομή Weibull.

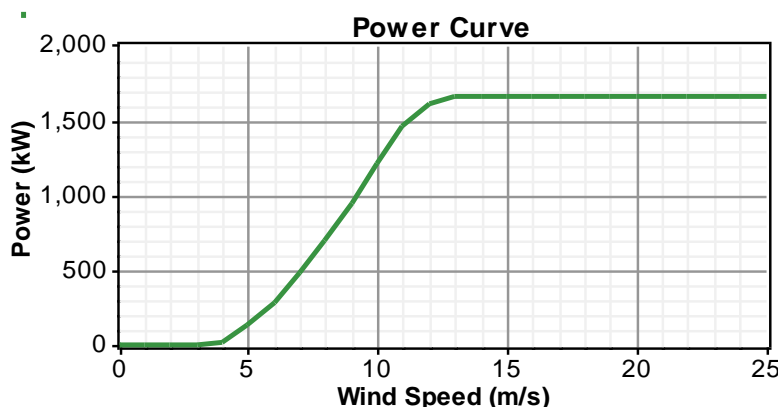
## 6.2 Μεταβαλλόμενες εισοδοί προγράμματος

Ως μεταβαλλόμενες εισοδοί του προγράμματος χαρακτηρίζονται αυτές, για τις οποίες έχει ορισθεί να λαμβάνουν διάφορες τιμές από ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών κατά την εκτέλεση του προγράμματος, ούτως ώστε

αυτό να παράγει αποτελέσματα για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς συστημάτων προς εύρεση του βέλτιστου από πλευράς κόστους και παράλληλα τεχνικά εφικτού συστήματος.

### 6.2.1 Ανεμογεννήτριες

Όσον αφορά στην εγκατάσταση των ανεμογεννητριών προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος, δύο παράμετροι οφείλουν να επιλεγούν: η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών και ο αριθμός τους. Στο πρόγραμμα HOMER παρέχεται ένα αρκετά μεγάλο πλήθος ανεμογεννητριών με τις καμπύλες ισχύος τους προς επιλογή της καταλληλότερης για την κάθε εφαρμογή, ωστόσο οι περισσότερες μηχανές χαρακτηρίζονται από μικρή ονομαστική ισχύ. Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψη την έκταση του νησιού και την αισθητική τους αφομοίωση από το φυσικό περιβάλλον, επιλέγονται ανεμογεννήτριες με υψηλή ονομαστική ισχύ με σκοπό την κάλυψη του φορτίου με το δυνατόν μικρότερο αριθμό μηχανών και συγκεκριμένα οι Vestas V82 με ονομαστική ισχύ ίση με 1.650 kW και καμπύλη ισχύος που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.5. Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Vestas V82.

Αναφορικά με τον αριθμό των ανεμογεννητριών προς εγκατάσταση, θέτουμε ένα εύρος τιμών [6,15] που αντιστοιχεί σε συνολική ισχύ του αιολικού πάρκου μεταξύ [9.900, 24750 kW] ούτως ώστε το κάτω όριο να εξασφαλίζει την κάλυψη της ζήτησης σε συνδυασμό με την κυψέλη καυσίμου και το πάνω όριο να μην οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση του πάρκου και πολύ υψηλό κόστος επένδυσης. Τέλος, επιλέγεται ύψος πύργου ίσο με 70m ενώ η διάρκεια ζωής των μηχανών τίθεται ίση με 25 έτη.

Το κόστος αγοράς εξοπλισμού, η μεταφορά και η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου μπορεί να θεωρηθεί ίσο με 1500 € ανά εγκατεστημένο kW. Η

κατανομή του κόστους στα επιμέρους στάδια παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα με βάση στοιχεία από αιολικά πάρκα στην Ευρώπη: [54]

Τεχνοοικονομική μελέτη	1-2%
Έργα ανάπτυξης	2-3%
Ηλεκτρομηχανολογικές εργασίες	2-4%
Εξοπλισμός	68-75%
Balance of plant	15-20%
Λοιπές δαπάνες	3-5%

Επιπλέον πρέπει να υπολογιστεί το κόστος της ηλεκτρικής διασύνδεσης, προσεγγιστικά σε € ως εξής (όπου N ο αριθμός των ανεμογεννητριών): Κόστος Ηλεκτρικής Διασύνδεσης =  $300.000 + 100.000 \times N$ . Επιπρόσθετα, μπορεί να επιβαρυνθεί ο επενδυτής με το κόστος κατασκευής υποσταθμού. Για αιολικό πάρκο μέχρι 6 MW δεν απαιτείται κατασκευή υποσταθμού. Εάν απαιτηθεί υποσταθμός το κόστος εκτιμάται σε 2.000.000 €, και μπορούν να συνδεθούν μέχρι 15MW αιολικά πάρκα. Στην περίπτωση, λοιπόν, που εξετάζουμε θα λάβουμε υπόψη και το κόστος ανέγερσης υποσταθμού καθότι η ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου ξεπερνά τα 6 MW. Τέλος, το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας (O&M Cost) σε € ανά έτος μπορεί να λαμβάνεται ως το 1,5 - 2% του αρχικού κόστους επένδυσης.

### 6.2.2 Μονάδα ηλεκτρόλυσης

Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν σχετικά με τη μονάδα ηλεκτρόλυσης είναι οι εξής: η ονομαστική ισχύς και ο βαθμός απόδοσής της. Όσον αφορά στην ονομαστική ισχύ, θέτουμε ένα εύρος τιμών μεταξύ [1.800, 18.000 kW] ούτως ώστε το πρόγραμμα να επιλέξει τη βέλτιστη λύση για το εν λόγω σύστημα. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε αυτό το εύρος διότι, σύμφωνα με στοιχεία που δόθηκαν από την εταιρεία κατασκευής μονάδων ηλεκτρόλυσης Hydrogenics, είναι διαθέσιμες μονάδες ονομαστικής ισχύος 1,8 MW οι οποίες χαρακτηρίζονται από πίεση εξόδου ίση με 10 bar, κατανάλωση ενέργειας ίση με  $5,21 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ H}_2$ , ρυθμό παραγωγής υδρογόνου ίσο με  $360 \text{ Nm}^3/\text{h}$  και το κόστος τους ανέρχεται στα 2.700.000 €.

Ο βαθμός απόδοσης της μονάδας λήφθηκε ίσος με 84%, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ίσο με 1% του αρχικού κόστους επένδυσης, ως

διάρκεια ζωής θεωρήθηκαν τα 20 έτη, ενώ η μονάδα ορίστηκε να τίθεται σε λειτουργία όταν ξεπερνά το 10% της ονομαστικής της ισχύος.

### 6.2.3 Μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου

Ως είσοδος της μονάδας αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου σε αέρια μορφή δίδεται το βάρος του υδρογόνου που δύναται να αποθηκευθεί σε αυτήν. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που μελετάται δόθηκαν τιμές στο εύρος [25.000, 250.000 kg] ούτως ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη δυνατή λύση για την εγκατάσταση. Ως διάρκεια ζωής της μονάδας τέθηκαν τα 20 έτη, η δεξαμενή θεωρήθηκε ότι είναι γεμάτη κατά το 55% κατά την αρχή του έτους, ενώ το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ελήφθη ίσο με 0,5% του αρχικού κόστους επένδυσης.

### 6.2.4 Κυψέλη καυσίμου

Ως συνιστώσα χρήσης του αποθηκευμένου υδρογόνου επιλέχθηκε η κυψέλη καυσίμου, για την οποία πρέπει να επιλεγεί η ονομαστική ισχύς. Η συγκεκριμένη παράμετρος ορίστηκε να λαμβάνει τιμές στο εύρος [500, 7.000 kW] με σκοπό να καλύπτεται η ζήτηση στις περιόδους κατά τις οποίες η αιολική παραγωγή δεν δύναται να την καλύψει. Ως ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της μονάδας λήφθηκε μία αντιπροσωπευτική τιμή και συγκεκριμένα τέθηκε ίσος με 45%, ενώ η διάρκεια ζωής της θεωρήθηκε ότι ανέρχεται στις 40.000 ώρες λειτουργίας. Παράλληλα, η μονάδα ορίστηκε να λειτουργεί πάνω από το 10% της ονομαστικής της ισχύος, ενώ το κόστος συντήρησης και λειτουργίας λήφθηκε ίσο με 1,5% του κόστους επένδυσης.

## 6.3 Απαιτήσεις συστήματος

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή υδρογόνου πέραν της απαίτησης για επίτευξη όσο το δυνατόν χαμηλότερου κόστους επένδυσης, συντήρησης και λειτουργίας, απαιτείται να πληροί κάποιες προϋποθέσεις ούτως ώστε να είναι λειτουργικό και να καλύπτει τη ζήτηση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με σκοπό την κατά το δυνατόν ανεξαρτητοποίηση της νήσου της Καρπάθου από τη συμβατική παραγωγή ενέργειας. Συγκεκριμένα, πρέπει να δοθεί έμφαση στα εξής σημεία:

- η δεξαμενή αποθήκευσης του συμπιεσμένου υδρογόνου απαιτείται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ακόμα και στις περιόδους χαμηλής αιολικής παραγωγής, να μην φτάνει σε μηδενική στάθμη. Το γεγονός αυτό θα οδηγούσε σε αδυναμία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου με αποτέλεσμα την αδυναμία κάλυψης των αναγκών του μόνιμου και τουριστικού πληθυσμού της νήσου.

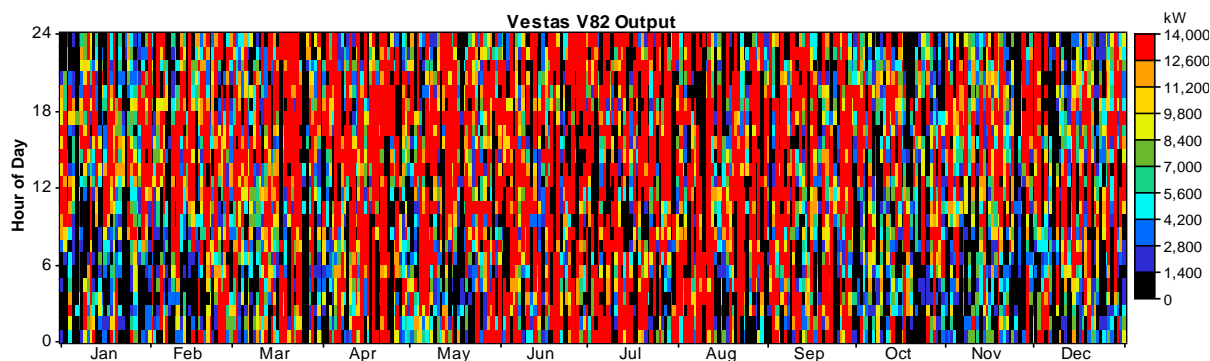
- ενεργοποίηση της επιλογής του προγράμματος HOMER με σκοπό την επίτευξη ίσης ή και υψηλότερης στάθμης στη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου κατά το τέλος κάθε έτους, γεγονός το οποίο εξασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία της εγκατάστασης και κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αποκλείει κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων συστήματα τα οποία μπορεί μεν να είναι οικονομικά συμφέροντα, αλλά να μην καλύπτουν την παραπάνω απαίτηση. Η ενεργοποίηση της συγκεκριμένης επιλογής κρίνεται ιδιαίτερης σημασίας, καθότι μας εξασφαλίζει απέναντι στην επιλογή συστήματος το οποίο λειτουργεί κατά τρόπο τέτοιο, ώστε στο πέρας του έτους η στάθμη της δεξαμενής αποθήκευσης να είναι χαμηλότερη της αρχικής ή ακόμα και κοντά στη μηδενική τιμή. Η κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιθανά προβλήματα κατά τα επόμενα έτη καθώς θα οδηγούσε σε αδυναμία κάλυψης του φορτίου με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η διακοπή της λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης με σκοπό τη μερική γόμωση της δεξαμενής.

#### 6.4 Εκτέλεση του προγράμματος και αποτελέσματα

Το υπολογιστικό πρόγραμμα HOMER προσομοίωσε 8.000 διαφορετικά συστήματα με σκοπό την εύρεση της οικονομικά βέλτιστης επιλογής και ταυτόχρονα τεχνικά εφαρμόσιμης λύσης. Συγκεκριμένα, σε καθεμία από τις 8.000 προσομοιώσεις δινόταν μία διαφορετική τιμή στο εύρος τιμών που ορίστηκε για κάθε συνιστώσα του συστήματος και το πρόγραμμα πέραν της οικονομικά βέλτιστης λύσης εμφάνιζε και άλλες εξίσου ικανοποιητικές λύσεις υψηλότερου κόστους. Δίνοντας βάση στις απαιτήσεις που τέθηκαν για το σύστημα επιλέχθηκε ως καταλληλότερο ένα σύστημα το οποίο απαρτίζεται από τις εξής συνιστώσες:

- 8 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V82 ονομαστικής ισχύος 1.650 kW με ύψος πύργου ίσο με 70 m και κατά συνέπεια εγκατάσταση αιολικού πάρκου συνολικής ισχύος 13,2 MW
- μονάδα ηλεκτρόλυσης ονομαστικής ισχύος 16,2 MW αποτελούμενη από 9 επιμέρους μονάδες των 1,8 MW βαθμού απόδοσης 84%
- δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου χωρητικότητας 100.000 kg υδρογόνου γομωμένη κατά 55% κατά την αρχή του έτους
- κυψέλη καυσίμου τύπου PEM ισχύος 4.000 kW, ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης 45% και διάρκειας ζωής ίσης με 40.000 ώρες λειτουργίας.

Για το αιολικό πάρκο που επιλέχθηκε και με βάση τα στοιχεία σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους, προέκυψε το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η χρονική διακύμανση της αιολικής παραγωγής κατά τη διάρκεια μίας ημέρας αλλά και ολόκληρου του έτους:

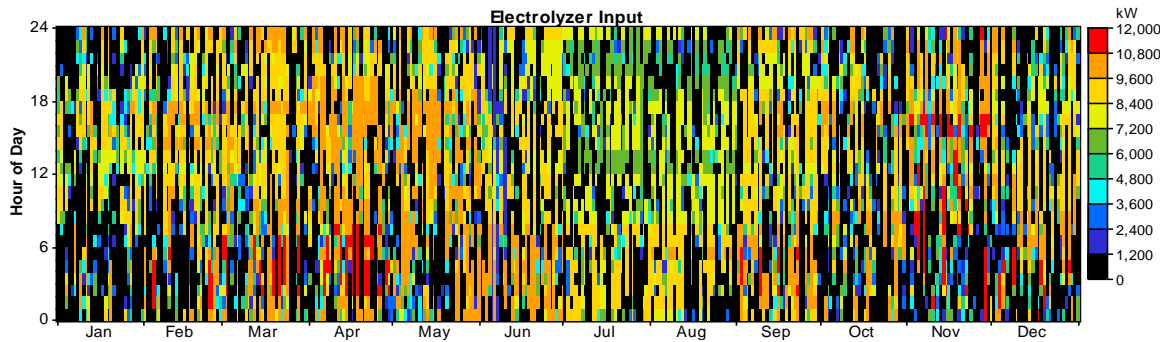


Σχήμα 6.6. Χρονική διακύμανση της αιολικής παραγωγής κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους.

Από το σχήμα 6.6 διαπιστώνεται ότι κατά τους μήνες Ιανουάριο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο οπότε και η ταχύτητα του ανέμου δεν λαμβάνει τόσο υψηλές τιμές όσο κατά τους υπόλοιπους μήνες του έτους, η παραγόμενη ισχύς από το αιολικό πάρκο δεν προσεγγίζει την ονομαστική τιμή της ισχύος. Συγκεκριμένα, η αιολική παραγωγή κυμαίνεται στην κλίμακα μεταξύ 0-7.000 kW με εξαίρεση τις μεσημεριανές ώρες κατά τις οποίες παρουσιάζεται κατά κύριο λόγο αύξηση της αιολικής παραγωγής, γεγονός που οφείλεται στον ορισμό της τρίτης ώρας μετά μεσημβρίας ως ώρας εμφάνισης των υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου. Παράλληλα, παρατηρείται σημαντική αύξηση της παραγωγής του πάρκου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου κατά μείζονα λόγο λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ. Η μέση ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου υπολογίσθηκε στα 7.218 kW επιτυγχάνοντας βαθμό εκμεταλλευσιμότητας της τάξεως του 54,7% και ετήσια παραγωγή ενέργειας ίση με 63.227.348 kWh/έτος, ενώ οι ώρες λειτουργίας των ανεμογεννητριών υπολογίσθηκε ότι ανέρχονται στις 7.509 ανά έτος.

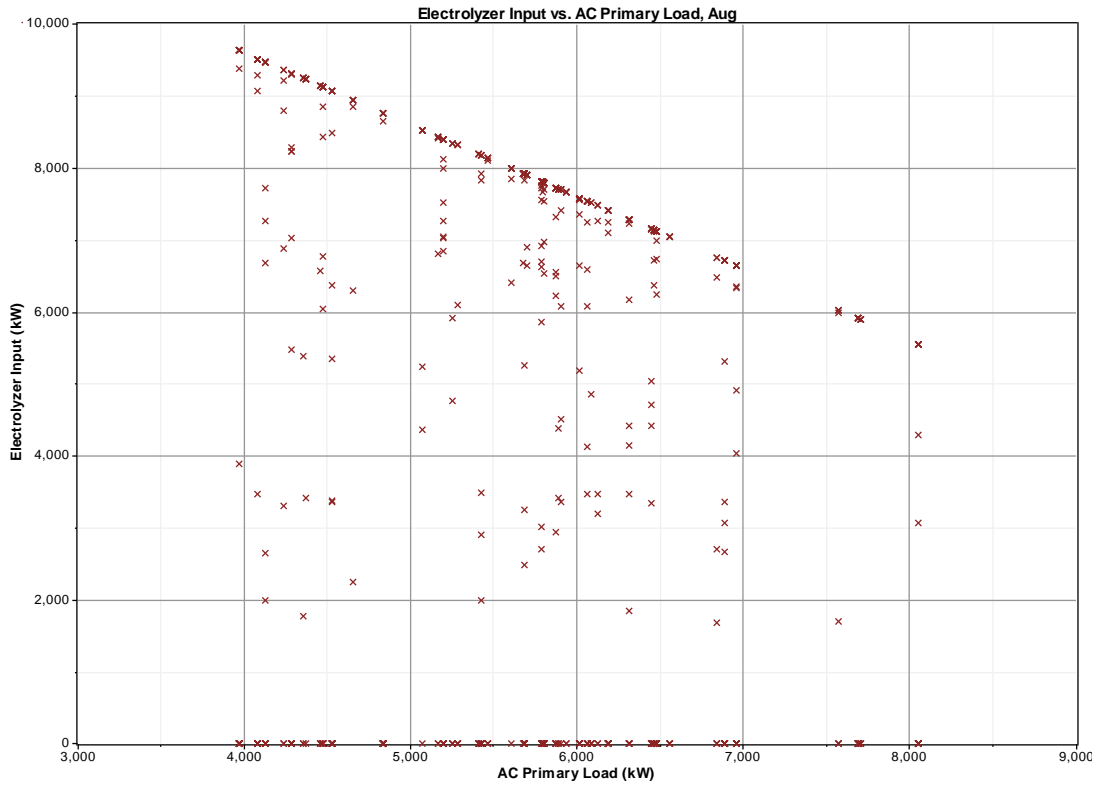
Στη συνέχεια, με βάση την αιολική παραγωγή και τα στοιχεία φορτίου που δόθηκαν ως είσοδοι στο πρόγραμμα, υπολογίζεται η ακριβής λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Συγκεκριμένα, κατασκευάζεται το διάγραμμα της χρονικής διακύμανσης της ισχύος εισόδου στη μονάδα κατά τη διάρκεια μίας ημέρας αλλά και ολόκληρου του έτους, το οποίο έχει ως εξής:



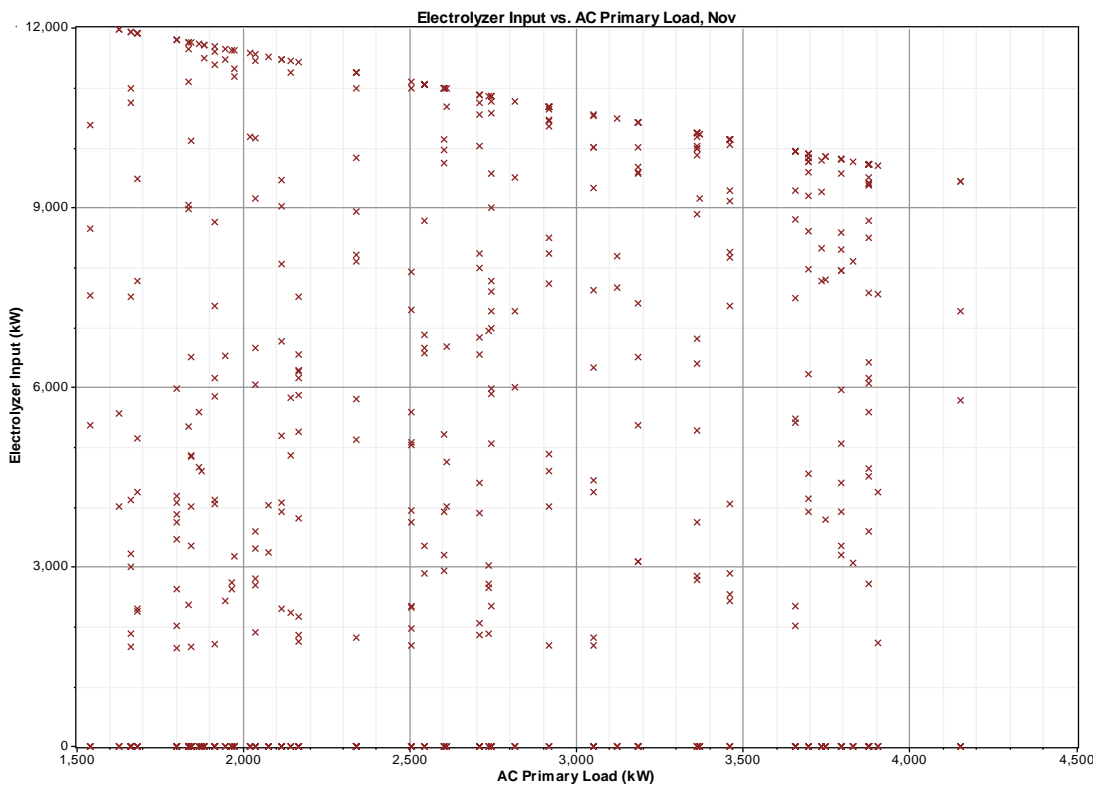


Σχήμα 6.7. Χρονική διακύμανση της ισχύος εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους.

Στο σχήμα 6.7 παρατηρείται ότι η ισχύς εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης κατά το μήνα Ιανουάριο κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα με εξαίρεση τις μεσημεριανές ώρες οπότε και αυξάνεται η αιολική παραγωγή. Κατά τους επόμενους τέσσερις μήνες, παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση της ισχύος εισόδου, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ελαφρά μείωση του φορτίου που κυμαίνεται σε τιμές μεταξύ 3.500-4.000 kW -με την μέση τιμή του φορτίου για τον Απρίλιο να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από τα 3 MW- και την παράλληλη σημαντική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Όσον αφορά στους καλοκαιρινούς μήνες, παρατηρείται σταδιακή μείωση της ισχύος εισόδου παρά το υψηλό αιολικό δυναμικό εκείνης της περιόδου του έτους. Ειδικά, μάλιστα, κατά τον Ιούλιο και τον Αύγουστο η ισχύς εισόδου κυμαίνεται μεταξύ 3.600-7.200 kW κατά μείζονα λόγο και συγκεκριμένα μετά μεσημβρίας και μέχρι το τέλος της ημέρας οπότε και η ζήτηση αυξάνεται κατακόρυφα. Αντιθέτως, κατά τις μεταμεσονύχτιες ώρες, οπότε και παρατηρείται μειωμένη ζήτηση η ισχύς εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης αυξάνεται και κυμαίνεται περί τα 9 MW. Τέλος, κατά τους τελευταίους τέσσερις μήνες του έτους παρατηρείται αρκετά αυξημένη ισχύς εισόδου αν αναλογισθεί κανείς τη σταδιακή μείωση της ταχύτητας του ανέμου, γεγονός που οφείλεται στη σημαντική μείωση της ζήτησης κατά την περίοδο αυτή. Αναλυτικότερα, διακρίνεται αύξηση της ισχύος κατά το μήνα Σεπτέμβριο καθώς η μέση ζήτηση κατέρχεται από τα 6 MW του Αυγούστου στα 4 MW, ενώ ο άνεμος που πνέει διατηρείται σε αρκετά υψηλές τιμές ταχύτητας. Αντιθέτως, το μήνα Νοέμβριο οπότε και η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται σημαντικά παρατηρείται ότι κατά διαστήματα η ισχύς εισόδου φθάνει κατά προσέγγιση τα 11 MW, κάτι που αποδίδεται στην κατακόρυφη πτώση του φορτίου κάτω από τα 3 MW, ενώ σε άλλα διαστήματα του μήνα η ισχύς μηδενίζεται λόγω χαμηλής ταχύτητας του ανέμου και κατά συνέπεια μηδενικής αιολικής παραγωγής.

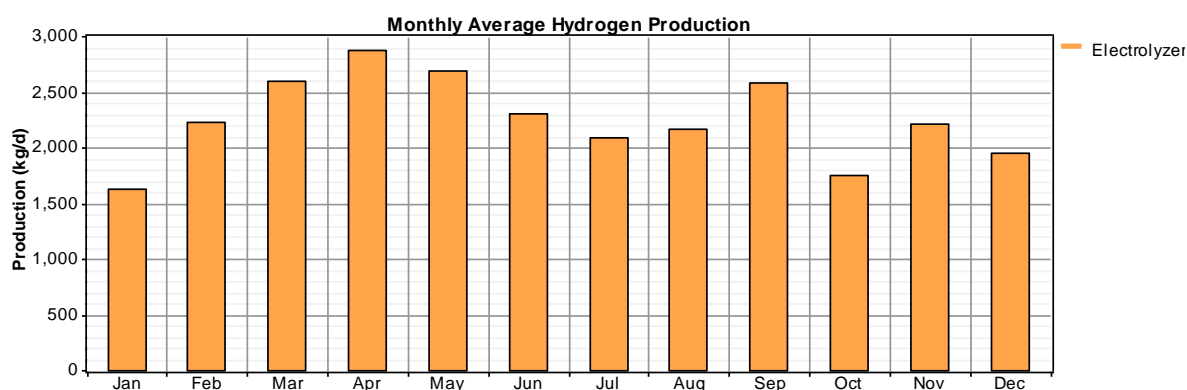


Σχήμα 6.8. Διάγραμμα ισχύος εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης συναρτήσει του φορτίου για το μήνα Αύγουστο (αιχμή ζήτησης).



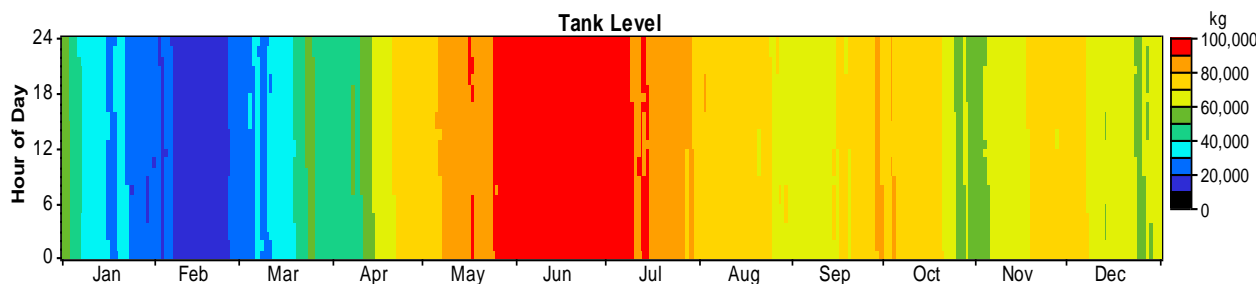
Σχήμα 6.9. Διάγραμμα ισχύος εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης συναρτήσει του φορτίου για το μήνα Νοέμβριο (ελάχιστο φορτίο).

Η μέση ισχύ εισόδου της ηλεκτρολυτικής μονάδας υπολογίσθηκε στα 4.415 kW και η μέγιστη στα 11.974 kW επιτυγχάνοντας βαθμό εκμεταλλευσιμότητας της τάξεως του 27,3% με ετήσια κατανάλωση ενέργειας ίση με 38.674.140 kWh/έτος, ενώ οι ώρες λειτουργίας υπολογίσθηκαν ότι ανέρχονται στις 5.084 ανά έτος. Αντίστοιχα, ο μέσος ρυθμός παραγωγής υδρογόνου ανέρχεται στα 94 kg/h, ο αντίστοιχος μέγιστος στα 255 kg/h, ενώ η συνολική ετήσια παραγωγή υδρογόνου είναι ίση με 823.580 kg H<sub>2</sub>/έτος. Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται ο μέσος μηνιαίος ρυθμός παραγωγής υδρογόνου σε kg/ημέρα, το οποίο επαληθεύει τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν σχετικά με την ισχύ εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης με το μέγιστο ρυθμό παραγωγής να παρατηρείται κατά τον Απρίλιο.



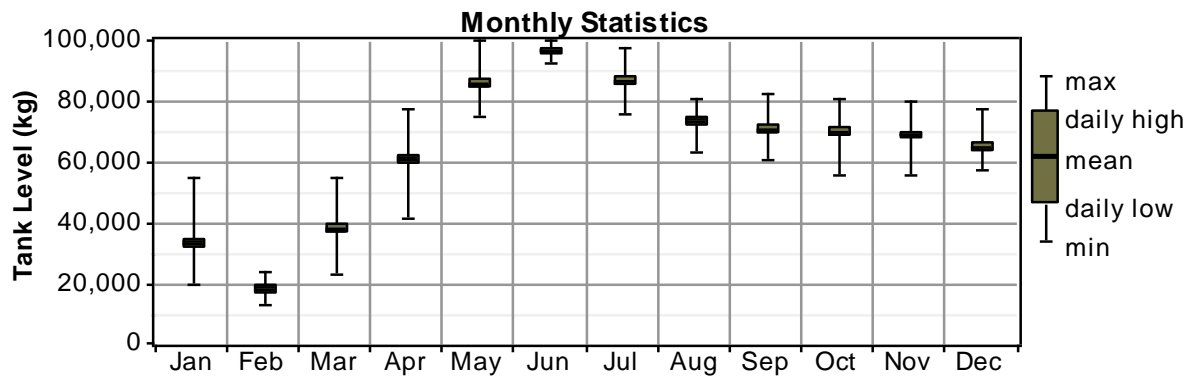
Σχήμα 6.10. Διάγραμμα μέσου μηνιαίου ρυθμού παραγωγής υδρογόνου κατά τη διάρκεια του έτους.

Με βάση τα στοιχεία που δόθηκαν ως είσοδοι στο πρόγραμμα και τους παραπάνω υπολογισμούς, υπολογίζονται τα στοιχεία που αφορούν στη δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου. Βάσει των υπολογισμών αυτών, προέκυψε το διάγραμμα της χρονικής διακύμανσης της στάθμης της δεξαμενής στη διάρκεια μίας ημέρας και του συνόλου του έτους, το οποίο και παρατίθεται στη συνέχεια:



Σχήμα 6.11. Χρονική διακύμανση της στάθμης της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους.

Στο σχήμα 6.11 παρατηρείται ότι αρχικά η στάθμη της δεξαμενής αποθήκευσης είναι κατά 55% γεωμενής όπως ορίστηκε για την εκτέλεση του προγράμματος, ενώ μέχρι τα τέλη Φεβρουαρίου παρατηρείται σταδιακή μείωση αυτής γεγονός το οποίο καταδεικνύει ότι κατά τους δύο πρώτους μήνες του έτους παρουσιάζονται σε πολλά διαστήματα της ημέρας ελλείμματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η ενεργοποίηση της κυψέλης καυσίμου με σκοπό την κάλυψη της ζήτησης ειδικά κατά τις μεταμεσονύχτιες ώρες, οπότε και η αιολική παραγωγή παρουσιάζεται μειωμένη. Στη συνέχεια, μέχρι και τα τέλη Μαρτίου, η στάθμη της δεξαμενής αυξάνεται βαθμιαία λόγω της σημαντικής αύξησης της αιολικής παραγωγής κατά τη συγκεκριμένη περίοδο και ειδικά περί τα μέσα Μαρτίου, η οποία συνεπάγεται και την αύξηση της ημερήσιας παραγωγής υδρογόνου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.10. Η αύξηση της στάθμης της δεξαμενής ανακόπτεται στα τέλη Μαρτίου και μέχρι τις αρχές Απριλίου καθώς η αιολική παραγωγή αυτής της χρονικής περιόδου ελαττώνεται αισθητά ή ακόμα και εκμηδενίζεται για αρκετές ώρες και ιδίως μετά τα μεσάνυχτα. Συγκεκριμένα, η στάθμη της δεξαμενής από τα 54.918,5 kg υδρογόνου, στα οποία ανέρχεται στις 21:00 κατά την 24<sup>η</sup> Μαρτίου, μειώνεται στην τιμή των 42.362,8 kg στις 17:00 κατά την 4<sup>η</sup> Απριλίου. Μετά το πέρας του παραπάνω διαστήματος, συνεχίζεται η αύξηση της στάθμης της δεξαμενής μέχρι και τα μέσα Ιουλίου λαμβάνοντας τιμές κοντά στη μέγιστη περί τις αρχές Ιουνίου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην σημαντική αύξηση της αιολικής παραγωγής κατά την περίοδο αυτών των μηνών, μέρος της οποίας καλύπτει το σταδιακά αυξανόμενο φορτίο ενώ το υπόλοιπο τμήμα διατίθεται στη μονάδα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η γενική εικόνα της αύξησης της στάθμης της δεξαμενής δεν υπονοεί την συνεχή αύξηση αυτής και την πλήρη έλλειψη ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αντιθέτως, και κατά τη διάρκεια των μηνών αυτών παρατηρούνται ελλείμματα με αποτέλεσμα την κατανάλωση ποσοτήτων αποθηκευμένου υδρογόνου, ποσότητες οι οποίες όμως υπερκαλύπτονται σε επόμενο στάδιο από την παραγωγή της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Από τα μέσα Ιουλίου μέχρι και τα μέσα Σεπτεμβρίου διακρίνεται σταδιακή μείωση του υδρογόνου που περιέχεται στη δεξαμενή κάτι το οποίο αποδίδεται στη μειωμένη παραγωγή υδρογόνου κατά την περίοδο αυτή λόγω της κατακόρυφης αύξησης του φορτίου. Παράλληλα για τη κάλυψη της αυξημένης ζήτησης κατά τα διαστήματα ελλείμματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των καλοκαιρινών μηνών, απαιτείται χρήση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου με αποτέλεσμα τη μείωση της στάθμης της δεξαμενής ειδικά τον Αύγουστο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.12.

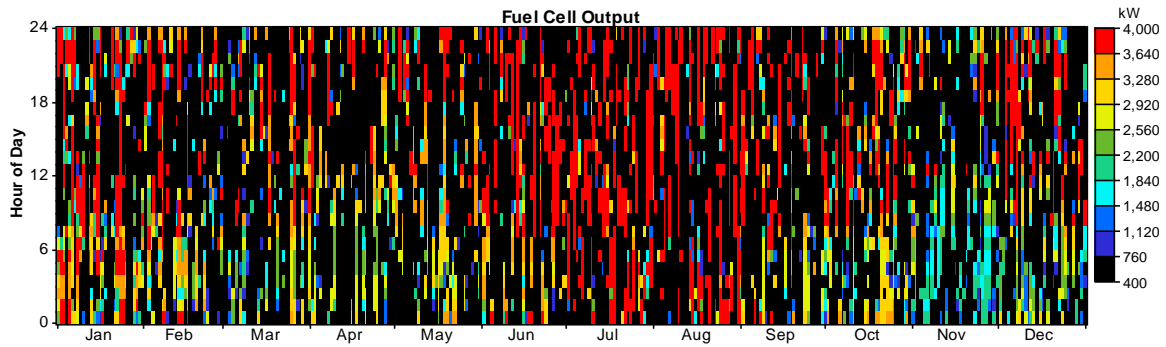


Σχήμα 6.12. Διάγραμμα μέσων μηνιαίων τιμών της στάθμης της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια του έτους.

Κατά το δεύτερο ήμισυ του Σεπτεμβρίου και τις αρχές Οκτωβρίου διακρίνεται μία αύξηση της τάξεως των 8.000 kg υδρογόνου, η οποία οφείλεται στην αδιάλειπτη σχεδόν παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο, η οποία ελαχιστοποιεί τη χρήση του αποθηκευμένου υδρογόνου και παράλληλα προκαλεί αύξηση της στάθμης λόγω του αυξημένου ρυθμού παραγωγής, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 6.10. Από την 4<sup>η</sup> Οκτωβρίου μέχρι και την 1<sup>η</sup> Νοεμβρίου, όμως, ακολουθεί σημαντική μείωση της στάθμης της δεξαμενής της τάξεως των 24.842,1 kg υδρογόνου λόγω της σημαντικής μείωσης της αιολικής παραγωγής κατά το μήνα αυτό, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 6.7. Αύξηση του περιεχόμενου υδρογόνου παρατηρείται από τις αρχές του Νοεμβρίου μέχρι και το τέλος του μηνός αυτού λόγω του μειωμένου φορτίου που επιτρέπει στη μειωμένη αιολική παραγωγή να καλύψει τη ζήτηση και στο σύστημα να χρησιμοποιήσει την περίσσεια με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου προς αποθήκευση. Αντιθέτως, κατά τον τελευταίο μήνα του έτους η στάθμη της δεξαμενής ελαττώνεται και πάλι λόγω της εμφάνισης σημαντικών χρονικών διαστημάτων με μηδαμινή αιολική παραγωγή.

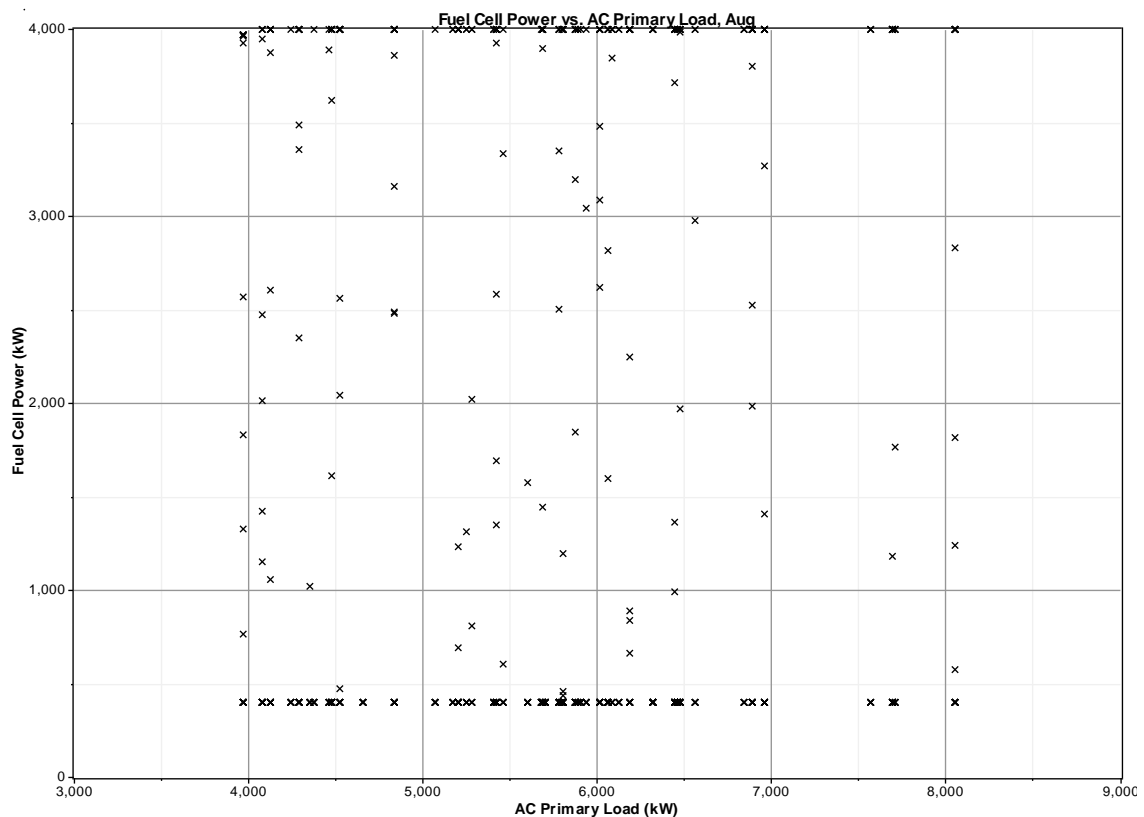
Η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης υπολογίσθηκε ίση με 3.333.334 kWh, η αυτονομία της στις 804 ώρες ενώ η στάθμη της δεξαμενής κατά το τέλος του έτους βρέθηκε ίση με 62.930 kg υδρογόνου, τιμή η οποία είναι πράγματι μεγαλύτερη της αρχικής όπως απαιτείτο αλλά και κοντά σε αυτήν.

Τέλος, βάσει των εισόδων του προγράμματος και των παραπάνω υπολογισμών, υπολογίζονται τα στοιχεία που αφορούν στην ακριβή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Βάσει των υπολογισμών αυτών, προέκυψε το διάγραμμα της χρονικής διακύμανσης της ισχύος εξόδου της κυψέλης στη διάρκεια μίας ημέρας και του συνόλου του έτους, το οποίο και παρατίθεται στη συνέχεια:



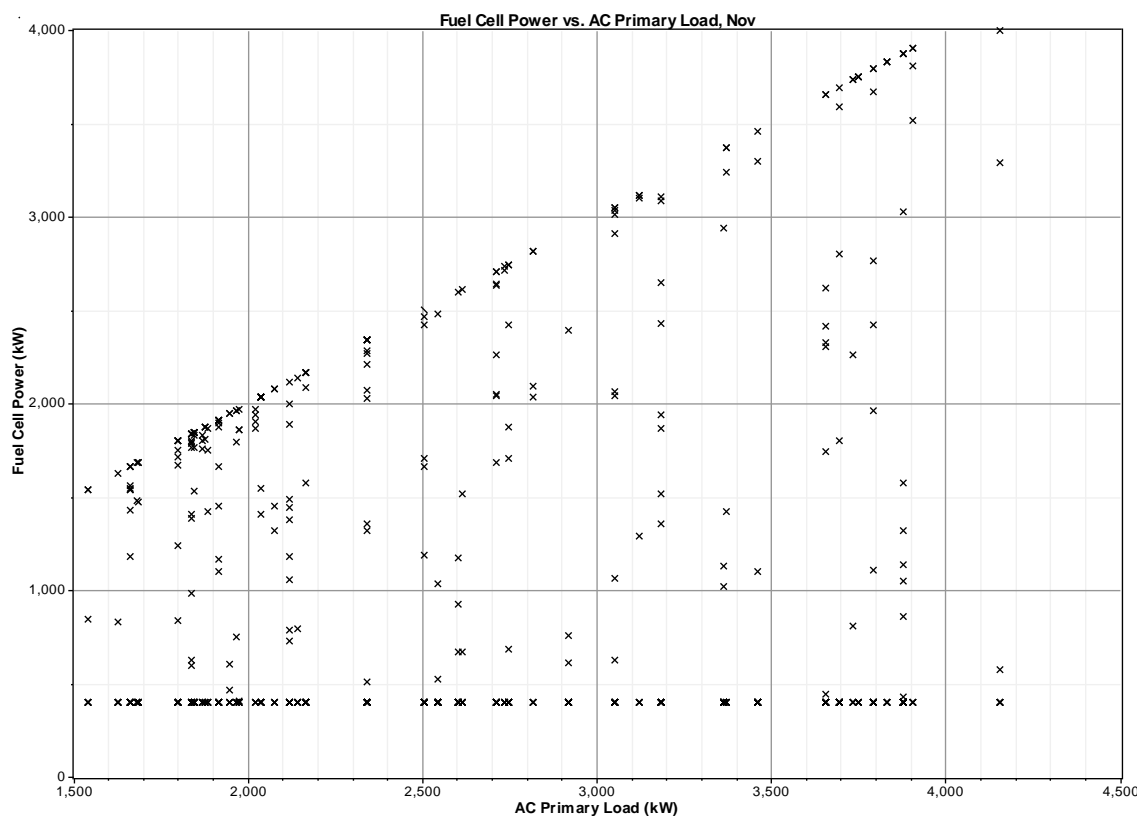
Σχήμα 6.13. Χρονική διακύμανση της ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους.

Το σχήμα 6.13 επαληθεύει τις παρατηρήσεις που έγιναν αναφορικά με τη δεξαμενή αποθήκευσης, ενώ αξιοσημείωτη είναι η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου κοντά στην ονομαστική της ισχύ κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης και σε πολύ χαμηλές τιμές της ισχύος κατά το μήνα Νοέμβριο. Όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, κατά τα διαστήματα μηδενικής ή μικρής αιολικής παραγωγής των καλοκαιρινών μηνών απαιτείται η εκμετάλλευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου και λειτουργία της κυψέλης κοντά στην ονομαστική τιμή της ισχύος για την κάλυψη της ζήτησης.



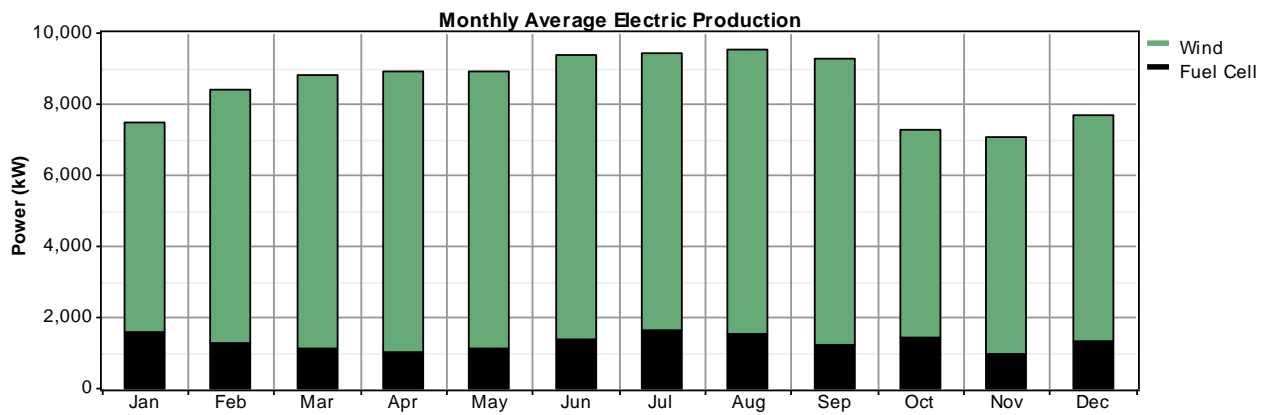
Σχήμα 6.14. Διάγραμμα ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου για το μήνα Αύγουστο.

Αντιθέτως, η ζήτηση του Νοεμβρίου είναι ελάχιστη και παρά τις μειωμένες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, η αιολική παραγωγή επαρκεί για την κάλυψη αυτής και την παροχή της περίσσειας για την παραγωγή υδρογόνου. Ως εκ τούτου, η κυψέλη τίθεται κατά μεγάλα διαστήματα εκτός λειτουργίας και όποια ελλείμματα παρατηρούνται, δύνανται να καλυφθούν με λειτουργία αυτής σε μερικό φορτίο. Η μέση ισχύς εισόδου της κυψέλης καυσίμου υπολογίσθηκε στα 1.309 kW με βαθμό εκμεταλλευσιμότητας της τάξεως του 32,7% και ετήσια παραγωγή ενέργειας ίση με 11.470.285 kWh/έτος. Η συνολική ετήσια κατανάλωση υδρογόνου βρέθηκε ίση με 815.649 kg/έτος, ενώ ο μέσος βαθμός απόδοσης ίσος με 42,2%. Στη συνέχεια παρατίθεται διάγραμμα της ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου της νήσου για το μήνα Νοέμβριο:



Σχήμα 6.15. Διάγραμμα ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου για το μήνα Νοέμβριο.

Τέλος, υπολογίσθηκε η μέση μηνιαία συνολική παραγωγή ισχύος κατά τη διάρκεια του έτους, όπως επίσης και η μέση παραγωγή ισχύος που αντιστοιχούσε στο αιολικό πάρκο και στην κυψέλη καυσίμου για κάθε μήνα με τα αποτελέσματα των υπολογισμών να φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 6.16. Διάγραμμα μέσης μηνιαίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους.

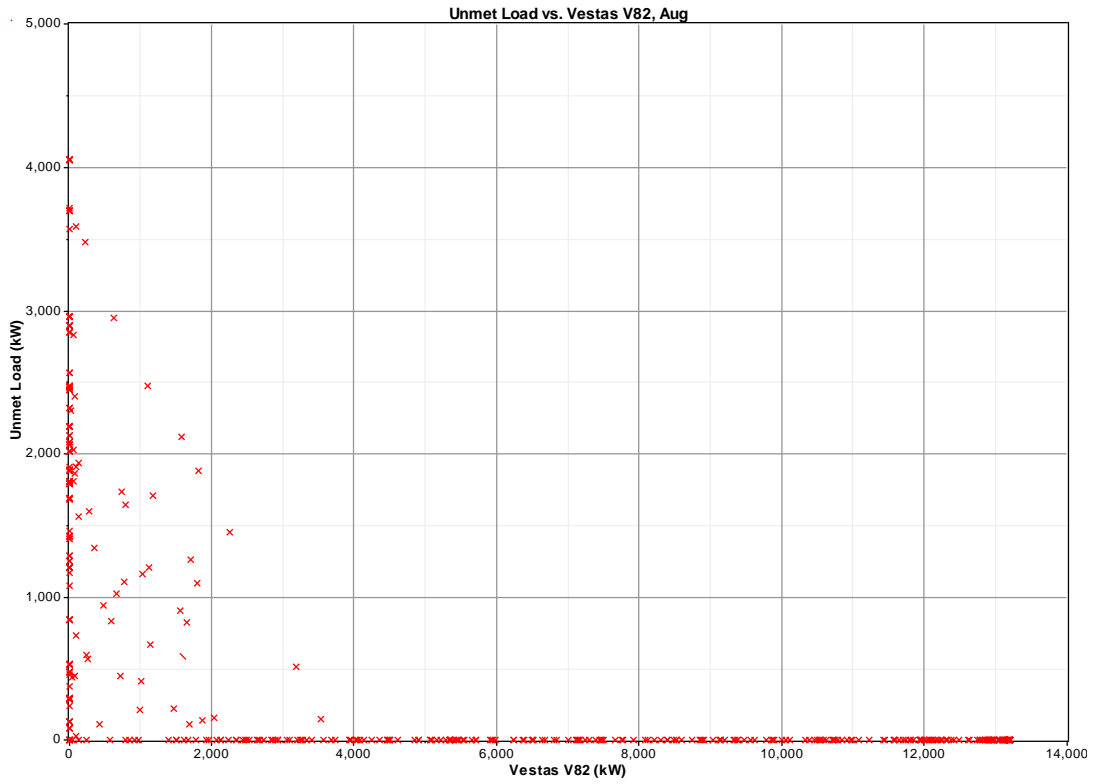
Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας βρέθηκε ίση με 74.697.632 kWh/έτος με το 85% της παραπάνω ποσότητας να αντιστοιχεί στην παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο και το 15% σε παραγωγή της κυψέλης καυσίμου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα μέρος του ετήσιου φορτίου παραμένει ανικανοποίητο και συγκεκριμένα το 3,06% της ετήσιας ζήτησης, ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ενέργεια ίση με 1.110.542 kWh/έτος.

Η έλλειψη δυνατότητας ικανοποίησης του φορτίου παρουσιάζεται στις εξής περιπτώσεις:

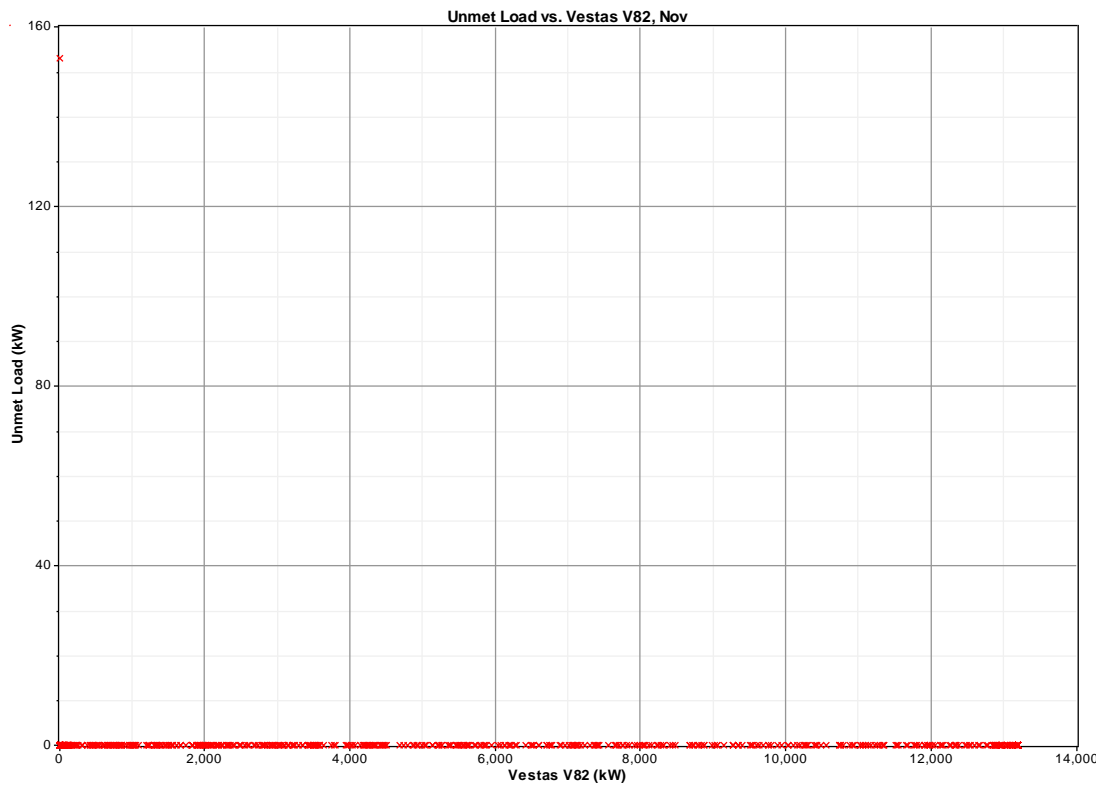
- μηδενική αιολική παραγωγή από το πάρκο λόγω έλλειψης πνέοντος ανέμου ή ανέμου πολύ μικρών ταχυτήτων που δεν έχουν τη δυνατότητα να υπερνικήσει την αναπτυσσόμενη τριβή και να κινήσει το δρομέα της ανεμογεννήτριας (3-4m/sec) με παράλληλη εμφάνιση φορτίου μεγαλύτερου των 4 MW.
- εμφάνιση πολύ υψηλού φορτίου σε συνδυασμό με μειωμένη αιολική παραγωγή, η οποία σε συνδυασμό με την κυψέλη καυσίμου δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσει πλήρως τη ζήτηση, φαινόμενο το οποίο παρουσιάζεται κατά μείζονα λόγο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες υψηλής τουριστικής δραστηριότητας.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα σχετικά διαγράμματα ανικανοποίητου φορτίου συναρτήσει της αιολικής παραγωγής για τους μήνες του έτους που εμφανίζεται το μεγαλύτερο και το μικρότερο πρόβλημα (Αύγουστος και Νοέμβριος αντίστοιχα):





Σχήμα 6.17. Διάγραμμα ανικανοποίητου φορτίου συναρτήσει της αιολικής παραγωγής για το μήνα Αύγουστο.



Σχήμα 6.18. Διάγραμμα ανικανοποίητου φορτίου συναρτήσει της αιολικής παραγωγής για το μήνα Νοέμβριο.

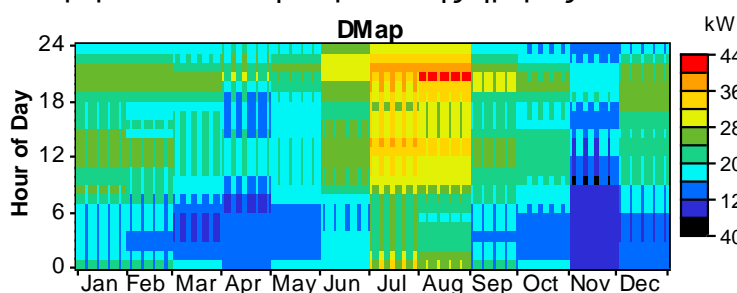
Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6.17, κατά το μήνα Αύγουστο εμφανίζονται και οι δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς παρουσιάζεται ανικανοποίητο φορτίο τόσο σε χρονικά διαστήματα κατά τα οποία δεν υπάρχει αιολική παραγωγή όσο και σε διαστήματα κατά τα οποία η αιολική παραγωγή δεν επαρκεί, ώστε να τα ικανοποιήσει σε συνδυασμό με την κυψέλη καυσίμου. Αντιθέτως, από το σχήμα 6.18 συμπεραίνουμε ότι μόλις μία φορά κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου παρατηρείται ανικανοποίητο φορτίο ίσο με 152,99 kW και αντιστοιχεί στη δεύτερη περίπτωση λόγω μηδενικής αιολικής παραγωγής. Συμπερασματικά, θα χρειασθεί η λειτουργία γεννήτριας Diesel για την κάλυψη του φορτίου που παραμένει ανικανοποίητο κατά τη διάρκεια του έτους.

### 6.5 Προσομοίωση του συστήματος αποθήκευσης για οικισμό της Καρπάθου

Κατά την προσομοίωση του συστήματος για το σύνολο της νήσου, εξήχθη το συμπέρασμα ότι η κάλυψη του φορτίου σχεδόν στο σύνολό του μέσω παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και με χρήση του συστήματος αποθήκευσης, απαιτεί υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος και χρήση τεχνολογιών που δεν είναι εμπορικά διαθέσιμες. Συγκεκριμένα, απαιτείται ηλεκτρολυτική διάταξη ισχύος 16,2 MW και κυψέλη καυσίμου ονομαστικής ισχύος 4 MW, ενώ η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης ανέρχεται στα 100.000 kg H<sub>2</sub>, ποσότητα που αντιστοιχεί σε μεγάλο αποθηκευτικό όγκο λόγω της χαμηλής πυκνότητας του υδρογόνου. Ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η μελέτη ενός πιο ρεαλιστικού σεναρίου, σύμφωνα με το οποίο θα μελετάται η εγκατάσταση ενός συστήματος αποθήκευσης για την ικανοποίηση της ζήτησης ενός οικισμού της νήσου.

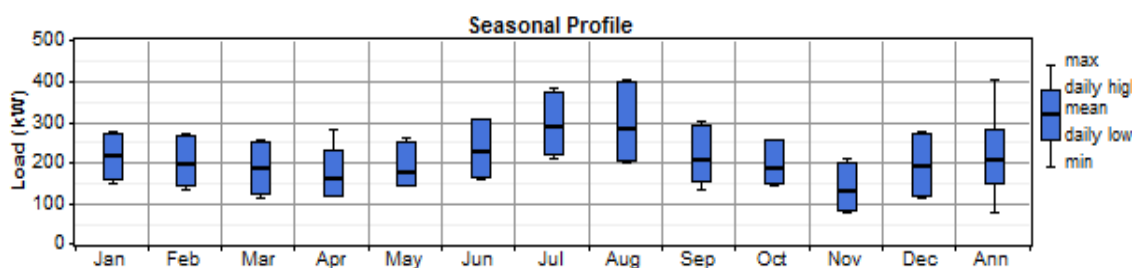
#### 6.5.1 Στοιχεία φορτίου και ανεμολογικά δεδομένα

Ο παραπάνω οικισμός θα χαρακτηρίζεται από φορτίο, το οποίο αντιστοιχεί στο 5% του φορτίου της νήσου με τα ανεμολογικά δεδομένα να παραμένουν σταθερά με την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών να γίνεται στην ίδια τοποθεσία. Συγκεκριμένα, στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η διακύμανση του φορτίου κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους:



Σχήμα 6.19. Χρονική διακύμανση του φορτίου κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους 2009.

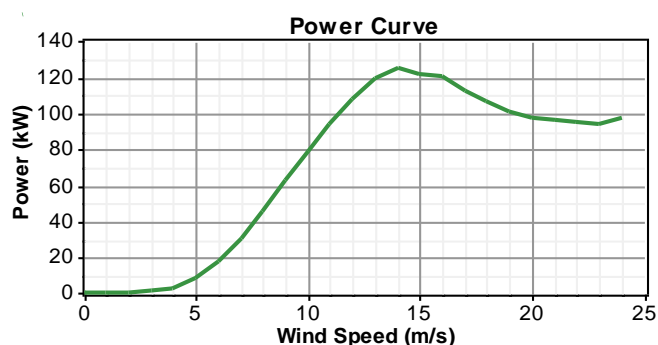
Βάσει των στοιχείων του φορτίου που εισήχθησαν στο πρόγραμμα, υπολογίστηκε το μέσο ετήσιο φορτίο του νησιού ίσο με 207 kW και αιχμή ζήτησης ίση με 403 kW, ενώ η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας βρέθηκε ίση με 4,977 MWh/ημέρα. Παράλληλα, σχεδιάστηκε διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές του φορτίου για τον κάθε μήνα, αλλά και για το σύνολο του έτους:



Σχήμα 6.20. Απεικόνιση μέσων, μέγιστων και ελάχιστων τιμών του φορτίου κάθε μήνα και του συνόλου του έτους 2009.

### 6.5.2 Ανεμογεννήτριες

Όσον αφορά στην επιλογή των ανεμογεννητριών, πρέπει να καθορισθούν η ονομαστική ισχύς και ο αριθμός τους, δηλαδή η ονομαστική ισχύς του αιολικού πάρκου. Όπως προαναφέρθηκε, το πρόγραμμα HOMER παρέχει ένα αρκετά μεγάλο πλήθος ανεμογεννητριών με τις αντίστοιχες καμπύλες ισχύος προς επιλογή της καταλληλότερης για την κάθε εφαρμογή. Ως εκ τούτου, με βάση την αιχμή ζήτησης θα αναζητηθούν ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος περί τα 100 kW, ούτως ώστε για την κάλυψη των αναγκών να απαιτείται η εγκατάσταση τέτοιου πλήθους μηχανών που από τη μία να επιτρέπει την αισθητική τους αφομοίωση από το φυσικό περιβάλλον και από την άλλη να είναι ικανά μεγάλο για την αποφυγή προβλημάτων σε περίπτωση βλάβης κάποιας μηχανής. Κατά συνέπεια, οι ανεμογεννήτριες που ικανοποιούν τις παραπάνω προϋποθέσεις είναι οι Fuhrländer 100 με ονομαστική ισχύ ίση με 100 kW και καμπύλη ισχύος που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.21. Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Fuhrländer 100.

Αναφορικά με τον αριθμό των ανεμογεννητριών προς εγκατάσταση, θέτουμε ένα εύρος τιμών [7,10] που αντιστοιχεί σε συνολική ισχύ του αιολικού πάρκου μεταξύ [700, 1.000 kW] ούτως ώστε το κάτω όριο να εξασφαλίζει την κάλυψη της ζήτησης σε συνδυασμό με την κυψέλη καυσίμου και το πάνω όριο να μην οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση του πάρκου με αποτέλεσμα μεγάλη απόρριψη ενέργειας και πολύ υψηλό κόστος επένδυσης. Τέλος, επιλέγεται ύψος πύργου ίσο με 35m ενώ η διάρκεια ζωής των μηχανών τίθεται ίση με 25 έτη.

Το κόστος αγοράς εξοπλισμού, η μεταφορά και η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου μπορεί να θεωρηθεί ίσο με 1500 € ανά εγκατεστημένο kW. Η κατανομή του κόστους στα επιμέρους στάδια έχει ως παρουσιάσθηκε στον πίνακα της ενότητας 6.2.1 με βάση στοιχεία από αιολικά πάρκα στην Ευρώπη [54]. Το κόστος της ηλεκτρικής διασύνδεσης, προσεγγιστικά σε € έχει ως εξής: Κόστος Ηλεκτρικής Διασύνδεσης =  $300.000 + 100.000 \times N$  (όπου N ο αριθμός των ανεμογεννητριών). Όσον αφορά στην κατασκευή υποσταθμού, ο επενδυτής δεν επιβαρύνεται με το συγκεκριμένο κόστος καθώς το αιολικό πάρκο δεν ξεπερνά σε ισχύ τα 6 MW. Τέλος, το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας (O&M Cost) σε € ανά έτος μπορεί να λαμβάνεται ως το 1,5 - 2% του αρχικού κόστους επένδυσης.

### 6.5.3 Μονάδα ηλεκτρόλυσης

Οι προς καθορισμό παράμετροι της ηλεκτρολυτικής μονάδας είναι, όπως και στην προηγούμενη εκτέλεση, οι εξής: η ονομαστική ισχύς και ο βαθμός απόδοσής της. Όσον αφορά στην ονομαστική ισχύ, θέτουμε ένα εύρος τιμών μεταξύ [400, 900 kW] ούτως ώστε το πρόγραμμα να επιλέξει τη βέλτιστη λύση για το εν λόγω σύστημα. Η επιλογή του συγκεκριμένου εύρους έγινε με βάση την ονομαστική ισχύ του αιολικού πάρκου αποβλέποντας στην εκμετάλλευση της περίσσειας ενέργειας που προκύπτει από την αιολική παραγωγή και τη ζήτηση. Ο βαθμός απόδοσης της μονάδας λήφθηκε ίσος με 84%, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ίσο με 1% του αρχικού κόστους επένδυσης, ως διάρκεια ζωής θεωρήθηκαν τα 20 έτη, ενώ η μονάδα ορίστηκε να τίθεται σε λειτουργία όταν ξεπερνά το 10% της ονομαστικής της ισχύος.

### 6.5.4 Μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου

Ως είσοδος της μονάδας αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου σε αέρια μορφή δίδεται το βάρος του υδρογόνου που δύναται να αποθηκευθεί σε αυτήν. Στην περίπτωση που μελετάται δόθηκαν τιμές στο εύρος [750, 1.000 kg] τιμές οι οποίες θεωρούνται αντιπροσωπευτικές του σταδίου ανάπτυξης των δεξαμενών αποθήκευσης και παράλληλα κρίνεται ότι έχουν τη

δυνατότητα να καλύψουν τη ζήτηση σε περιόδους μηδενικής ή μειωμένης αιολικής παραγωγής. Ως διάρκεια ζωής της μονάδας τέθηκαν τα 20 έτη, η δεξαμενή θεωρήθηκε ότι είναι γεμάτη κατά το 95% στην αρχή του έτους ούτως ώστε να ικανοποιείται το φορτίο κατά τους πρώτους κυρίως μήνες, ενώ το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ελήφθη ίσο με 0,5% του αρχικού κόστους επένδυσης.

#### 6.5.5 Κυψέλη καυσίμου

Όσον αφορά στην κυψέλη καυσίμου, η προς επιλογή παράμετρος είναι η ονομαστική ισχύς. Η συγκεκριμένη παράμετρος ορίστηκε να λαμβάνει τιμές στο εύρος [450, 600 kW] με σκοπό να καλύπτεται η ζήτηση στις περιόδους κατά τις οποίες η αιολική παραγωγή δεν δύναται να την καλύψει. Ως ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της μονάδας λήφθηκε μία αντιπροσωπευτική τιμή για κυψέλη πολυμερούς μεμβράνης και συγκεκριμένα τέθηκε ίσος με 44%, ενώ η διάρκεια ζωής της θεωρήθηκε ότι ανέρχεται στις 40.000 ώρες λειτουργίας. Παράλληλα, η μονάδα ορίστηκε να λειτουργεί όταν ξεπερνά το 10% της ονομαστικής της ισχύος, ενώ το κόστος συντήρησης και λειτουργίας λήφθηκε ίσο με 1,5% του κόστους επένδυσης.

#### 6.5.6 Απαιτήσεις συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση εκτέλεσης του προγράμματος για την εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης με σκοπό την κάλυψη του φορτίου του συνόλου της νήσου, το σύστημα απαιτείται να πληροί κάποιες προϋποθέσεις ούτως ώστε να είναι λειτουργικό και να καλύπτει τη ζήτηση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Κατά τη μελέτη του παρόντος συστήματος, τίθεται ως στόχος η πλήρης κάλυψη του φορτίου κατά τη διάρκεια του έτους και η πλήρης ανεξαρτητοποίηση του τμήματος της νήσου από τη συμβατική παραγωγή ενέργειας. Συγκεκριμένα, κατά την εκτέλεση του προγράμματος δίνεται ιδιαίτερο βάρος στα σημεία που αναφέρθηκαν και παραπάνω:

- ✓ η δεξαμενή αποθήκευσης του συμπιεσμένου υδρογόνου απαιτείται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ακόμα και στις περιόδους μηδαμινής αιολικής παραγωγής και αυξημένης ζήτησης, να μην φτάνει σε μηδενική στάθμη.
- ✓ ενεργοποίηση της επιλογής του προγράμματος HOMER με σκοπό την επίτευξη ίσης ή και υψηλότερης στάθμης στη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου κατά το τέλος κάθε έτους, γεγονός το οποίο εξασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία της εγκατάστασης και κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών.

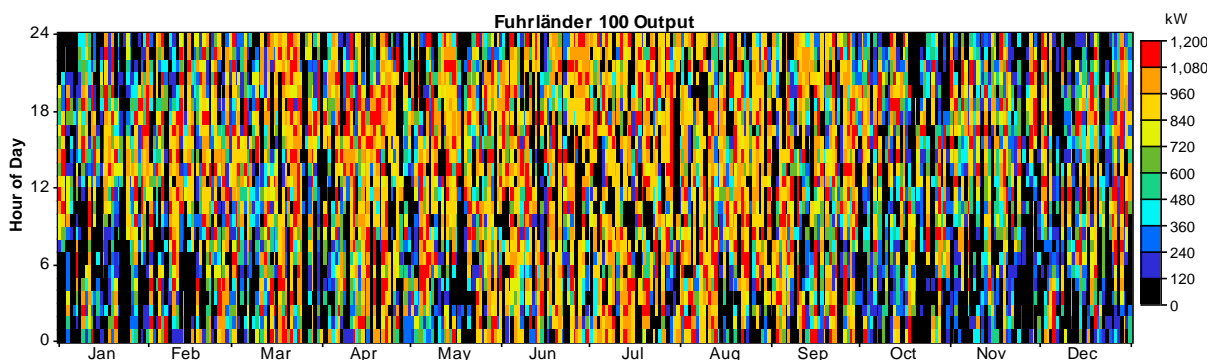
- ✓ επιλογή κυψέλης καυσίμου ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης της αιχμής ζήτησης με σκοπό τη δυνατότητα πλήρους κάλυψης του φορτίου ακόμα και σε ακραίες συνθήκες (αιχμή ζήτησης και μηδενική αιολική παραγωγή).

### 6.5.7 Εκτέλεση του προγράμματος και αποτελέσματα

Το υπολογιστικό πρόγραμμα HOMER προσομοίωσε 576 διαφορετικά συστήματα με σκοπό την εύρεση της οικονομικά βέλτιστης επιλογής και ταυτόχρονα τεχνικά εφαρμόσιμης λύσης. Δίνοντας βάση στις απαιτήσεις που τέθηκαν για το σύστημα επιλέχθηκε ως καταλληλότερο ένα σύστημα το οποίο απαρτίζεται από τις εξής συνιστώσες:

- 9 ανεμογεννήτριες τύπου Fuhrländer 100 ονομαστικής ισχύος 100 kW με ύψος πύργου ίσο με 35 m, δηλαδή επιλέχθηκε η εγκατάσταση αιολικού πάρκου συνολικής ισχύος 900 kW
- μονάδα ηλεκτρόλυσης ονομαστικής ισχύος 700 kW βαθμού απόδοσης 84%
- δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου χωρητικότητας 1.000 kg υδρογόνου γομωμένη κατά 95% στην αρχή του έτους
- κυψέλη καυσίμου τύπου PEM ισχύος 450 kW, ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης 44% και διάρκειας ζωής ίσης με 40.000 ώρες λειτουργίας.

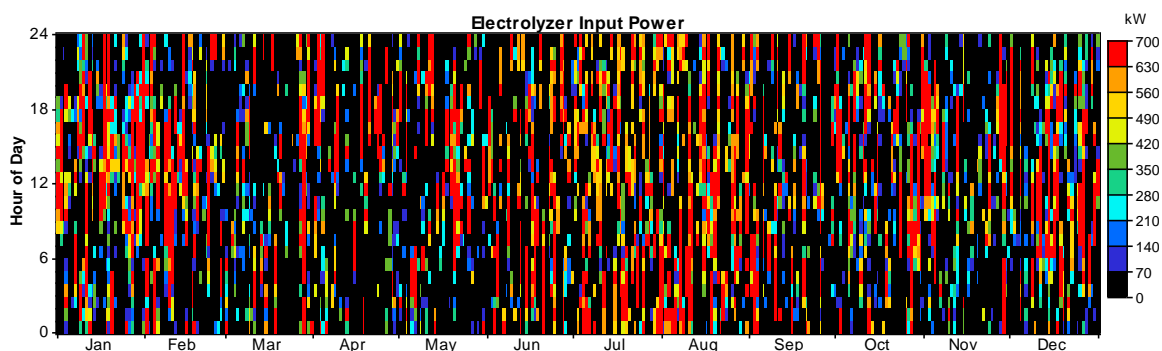
Βάσει των ανεμολογικών δεδομένων που δόθηκαν ως είσοδοι στο πρόγραμμα και την επιλογή του βέλτιστου συστήματος, προέκυψε το διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η χρονική διακύμανση της αιολικής παραγωγής κατά τη διάρκεια μίας ημέρας αλλά και ολόκληρου του έτους:



Σχήμα 6.22. Χρονική διακύμανση της αιολικής παραγωγής κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους.

Από το σχήμα 6.22 προκύπτει ότι κατά τους μήνες Ιανουάριο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο οπότε η ταχύτητα του ανέμου δεν λαμβάνει ιδιαίτερα υψηλές τιμές συγκριτικά με τους υπόλοιπους μήνες του έτους όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3, η παραγόμενη ισχύς από το αιολικό πάρκο δεν προσεγγίζει την ονομαστική τιμή της ισχύος. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κατά κύριο λόγο κατά τις βραδινές και τις πρώτες πρωινές ώρες, οπότε η αιολική παραγωγή κυμαίνεται στην κλίμακα μεταξύ 0-360 kW, ενώ κατά τις μεσημεριανές ώρες τις οποίες παρουσιάζεται κατακόρυφη αύξηση της αιολικής παραγωγής λόγω του ορισμού της τρίτης ώρας μετά μεσημβρίας ως ώρας εμφάνισης των υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου. Από την άλλη πλευρά, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται σημαντική αύξηση της παραγωγής του πάρκου και λειτουργία αυτού με ελάχιστες εξαιρέσεις κοντά στην ονομαστική του ισχύ. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η ονομαστική ισχύς των χρησιμοποιούμενων ανεμογεννητριών επιτυγχάνεται σε ταχύτητες 25 m/sec, ενώ σε ταχύτητα 14 m/sec η ισχύς που παράγεται από κάθε ανεμογεννήτρια ανέρχεται στα 125 kW. Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, η μέση ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου υπολογίσθηκε στα 520 kW επιτυγχάνοντας βαθμό εκμεταλλευσιμότητας της τάξεως του 57,8% και ετήσια παραγωγή ενέργειας ίση με 4.554.623 kWh/έτος, ενώ οι ώρες λειτουργίας των ανεμογεννητριών υπολογίσθηκε ότι ανέρχονται στις 7.974 ανά έτος.

Εν συνέχεια, βάσει της αιολικής παραγωγής και των στοιχείων φορτίου, υπολογίζεται η λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης και κατασκευάζεται το διάγραμμα της χρονικής διακύμανσης της ισχύος εισόδου στη μονάδα κατά τη διάρκεια μίας ημέρας αλλά και ολόκληρου του έτους, το οποίο έχει ως εξής:



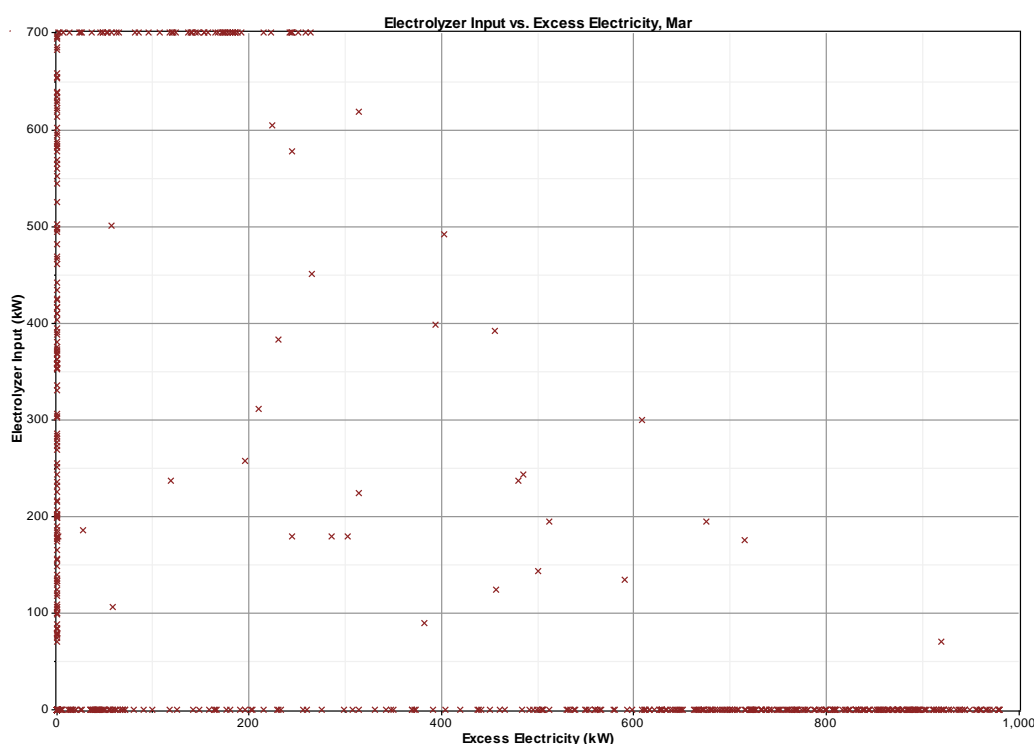
Σχήμα 6.23. Χρονική διακύμανση της ισχύος εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους.

Από το σχήμα 6.23 προκύπτει ότι η ισχύς εισόδου κατά το μήνα Ιανουάριο κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα με εξαίρεση τις μεσημεριανές ώρες οπότε και αυξάνεται η αιολική παραγωγή. Κατά τους επόμενους τέσσερις

μήνες του έτους, αν και παρατηρείται σημαντική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με παράλληλη ελαφρά μείωση του μέσου φορτίου σε τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 150-200 kW, δεν παρατηρείται η ανάλογη αύξηση της ισχύος εισόδου του ηλεκτρολύτη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας παρά μόνο κατά την πρώτη εβδομάδα του Φεβρουαρίου και τα τέλη του Μαρτίου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην υψηλή περιεκτικότητα της δεξαμενής σε υδρογόνο. Όπως συμπεραίνεται, η χρησιμοποιούμενη ποσότητα υδρογόνου για την κάλυψη του φορτίου κατά τις ώρες μικρής αιολικής παραγωγής του Ιανουαρίου αναπληρώθηκε μερικώς από την περίσσεια αιολικής ισχύος κατά τις μεσημεριανές ώρες αυτού του μήνα και το υδρογόνο της δεξαμενής στις 23:00 της 31<sup>ης</sup> Ιανουαρίου ανέρχεται στα 709 kg. Παράλληλα, το μειωμένο φορτίο και η αυξημένη αιολική παραγωγή της πρώτης εβδομάδας του Φεβρουαρίου έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη γόμωση της δεξαμενής με υδρογόνο στις 17:00 της 5<sup>ης</sup> ημέρας του μήνα αυτού. Ως εκ τούτου, η περίσσεια ενέργειας απορρίπτεται κατά το διάστημα που η δεξαμενή δεν μπορεί να δεχθεί επιπλέον υδρογόνο και η μονάδα ηλεκτρόλυσης τίθεται και πάλι σε λειτουργία μετά την εμφάνιση ελλείμματος και χρήσης ποσότητας του αποθηκευμένου υδρογόνου. Όσον αφορά στους καλοκαιρινούς μήνες, παρατηρούνται εναλλαγές στον τρόπο λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης μεταξύ υψηλών τιμών ισχύος και θέσης αυτής εκτός λειτουργίας. Συγκεκριμένα, η μονάδα τίθεται εκτός λειτουργίας σε διαστήματα εμφάνισης ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας και σε διαστήματα που η πληρότητα της δεξαμενής υδρογόνου δεν επιτρέπει την περαιτέρω παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου με αποτέλεσμα να απορρίπτεται η περίσσεια της αιολικής παραγωγής. Ωστόσο, σε άλλα διαστήματα των καλοκαιρινών μηνών, τα οποία αποτελούν και την πλειοψηφία, οπότε η δεξαμενή δεν είναι πλήρης και τα οποία χαρακτηρίζονται από σημαντική περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, παρατηρείται λειτουργία του ηλεκτρολύτη σε τιμές ισχύος κοντά στην ονομαστική (490-700 kW). Οι εναλλαγές, λοιπόν, της λειτουργίας του ηλεκτρολύτη οφείλονται στη συνεχή αυξομείωση της στάθμης της δεξαμενής, η οποία προκαλείται από τη χρησιμοποίηση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου για την κάλυψη της κατακόρυφα αυξημένης ζήτησης των καλοκαιρινών μηνών. Μέχρι και τα μέσα Οκτωβρίου παρατηρείται ανάλογη συμπεριφορά παρά τη σταδιακή μείωση της ταχύτητας του ανέμου, γεγονός που οφείλεται στην σημαντική μείωση της ζήτησης. Από τις 13:00 της 18<sup>ης</sup> μέχρι και τις 17:00 της 25<sup>ης</sup> Οκτωβρίου ωστόσο παρατηρείται λειτουργία του ηλεκτρολύτη σε πολύ χαμηλές τιμές ισχύος λόγω της μειωμένης αιολικής παραγωγής κατά την εβδομάδα αυτή με τη δεξαμενή να περιλαμβάνει κατά αυτό το χρονικό σημείο 186 kg υδρογόνου. Εν συνεχεία και μέχρι την 5<sup>η</sup> Νοεμβρίου, η μονάδα λειτουργεί σε τιμές ισχύος κοντά στην ονομαστική με εξαίρεση τις πρώτες πρωινές ώρες με αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης της δεξαμενής στα

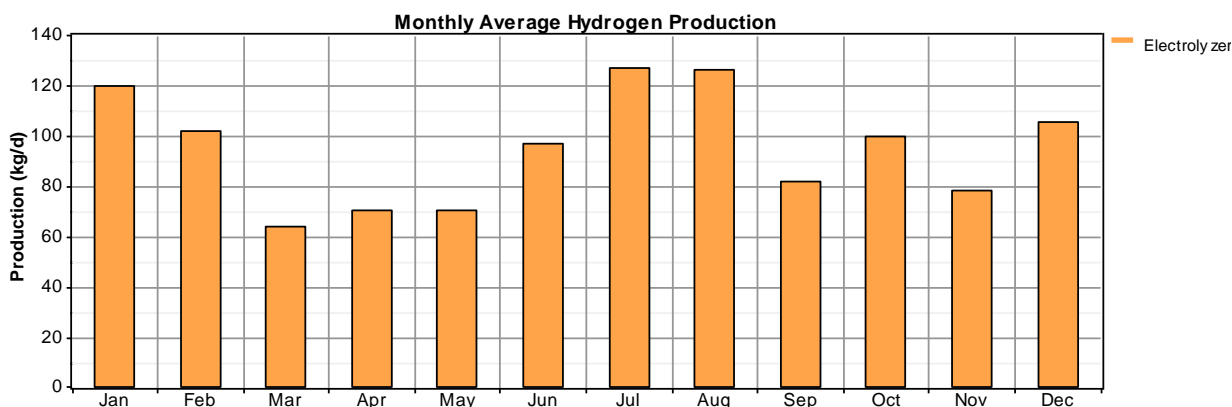


1000 kg H<sub>2</sub>. Η λειτουργία του ηλεκτρολύτη σε αυτές τις τιμές δικαιολογείται από τη σημαντική πτώση του φορτίου κατά το μήνα Νοέμβριο όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.20 με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μεγάλη περίσσεια ενέργειας παρά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών σε τιμές μακριά από την ονομαστική. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί και η επίδραση που έχει σε αυτήν την παράμετρο η μορφή της καμπύλης ισχύος των ανεμογεννητριών καθότι σε ταχύτητα 14 m/sec επιτυγχάνεται ισχύς 125 kW. Από το χρονικό αυτό σημείο μέχρι και την 23<sup>η</sup> Νοεμβρίου, ο ηλεκτρολύτης τίθεται κατά το μεγαλύτερο διάστημα εκτός λειτουργίας με εξαίρεση κάποιες περιόδους λειτουργίας σε χαμηλή ισχύ. Στο τέλος, ωστόσο, του μηνός η μονάδα λειτουργεί και πάλι σε τιμές κοντά στην ονομαστική κυρίως κατά τις μεσημεριανές ώρες οπότε και παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η παραγωγή αυτή, ωστόσο, δεν είναι σε θέση να υπερκαλύψει την κατανάλωση του υδρογόνου σε περιόδους ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα τη μείωση της στάθμης της δεξαμενής. Τέλος, κατά τον τελευταίο μήνα του έτους η μονάδα ηλεκτρόλυσης λειτουργεί σε χαμηλές τιμές ισχύος είτε λόγω πλήρους γόμωσης της δεξαμενής (αρχές και τέλη Δεκεμβρίου) είτε λόγω έλλειψης περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας (αρχές δεύτερης και τρίτης εβδομάδας). Αντιθέτως, κατά τις αρχές της τελευταίας εβδομάδας του έτους παρατηρείται λειτουργία στην ονομαστική τιμή με αποτέλεσμα την πλήρη γόμωση της δεξαμενής υδρογόνου.



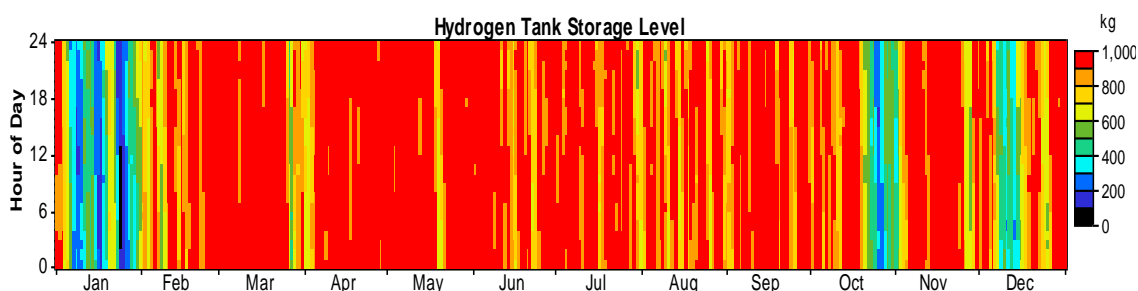
Σχήμα 6.24. Διάγραμμα ισχύος εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης συναρτήσει της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας για το μήνα Μάρτιο (υψηλές τιμές περίσσειας).

Η μέση ισχύς εισόδου της ηλεκτρολυτικής μονάδας υπολογίσθηκε στα 186,3 kW και η μέγιστη στα 700 kW με βαθμό εκμεταλλευσιμότητας της τάξεως του 26,6%. Όσον αφορά στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας, αυτή βρέθηκε ίση με 1.632.273 kWh/έτος με ειδική κατανάλωση 47 kWh/kg H<sub>2</sub>, ενώ οι ώρες λειτουργίας υπολογίσθηκαν ότι ανέρχονται στις 3.398 ανά έτος. Αντίστοιχα, ο μέσος ρυθμός παραγωγής υδρογόνου ανέρχεται στα 3,97 kg/h, ο αντίστοιχος μέγιστος στα 14,91 kg/h, ενώ η συνολική ετήσια παραγωγή υδρογόνου είναι ίση με 34.760 kg H<sub>2</sub>/έτος. Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται ο μέσος μηνιαίος ρυθμός παραγωγής υδρογόνου σε kg/ημέρα, το οποίο επαληθεύει τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν σχετικά με την ισχύ εισόδου στη μονάδα ηλεκτρόλυσης με το μέγιστο ρυθμό παραγωγής να παρατηρείται κατά τον Ιούλιο και τον Αύγουστο.



Σχήμα 6.25. Διάγραμμα μέσου μηνιαίου ρυθμού παραγωγής υδρογόνου κατά τη διάρκεια του έτους.

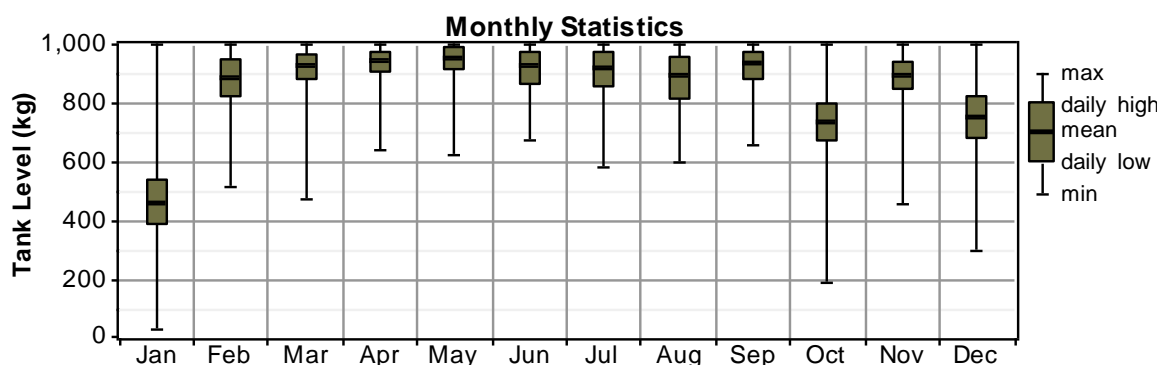
Με βάση τα στοιχεία που δόθηκαν ως είσοδοι στο πρόγραμμα και τους παραπάνω υπολογισμούς, υπολογίζονται τα στοιχεία που αφορούν στη δεξαμενή αποθήκευσης. Βάσει των υπολογισμών αυτών, προέκυψε το διάγραμμα της χρονικής διακύμανσης της στάθμης της δεξαμενής στη διάρκεια μίας ημέρας και του συνόλου του έτους:



Σχήμα 6.26. Χρονική διακύμανση της στάθμης της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους.

Στο σχήμα 6.26 παρατηρείται ότι αρχικά η στάθμη της δεξαμενής αποθήκευσης είναι κατά 95% γεωμενής όπως ορίστηκε για την εκτέλεση του προγράμματος. Κατά την έναρξη του έτους παρατηρείται σημαντική μείωση της στάθμης της δεξαμενής με κύμανσή της ακόμα και στο εύρος 0-200 kg, ενώ μέχρι και τις αρχές Φεβρουαρίου παρατηρούνται συνεχείς αυξομειώσεις αυτής, γεγονός το οποίο καταδεικνύει την ύπαρξη πολλών διαστημάτων ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η ενεργοποίηση της κυψέλης καυσίμου με σκοπό την κάλυψη της ζήτησης. Στη συνέχεια, η στάθμη της δεξαμενής αυξάνεται βαθμιαία λόγω της σημαντικής αύξησης της αιολικής παραγωγής κατά τη συγκεκριμένη περίοδο και για κάποιες ώρες της 5<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου φθάνει στη μέγιστη τιμή της για πρώτη φορά στο διάστημα αυτό. Από τη συγκεκριμένη ημερομηνία και μέχρι τα τέλη Μαρτίου, η στάθμη της δεξαμενής κυμαίνεται περί την μέγιστη τιμή με στιγμιαίες μειώσεις αυτής σε περιόδους ελλείμματος κατά τις οποίες ενεργοποιείται η κυψέλη καυσίμου. Η στάθμη της δεξαμενής ελαττώνεται, όμως, αισθητά στα τέλη Μαρτίου και μέχρι τις αρχές Απριλίου φθάνοντας τα 471 kg στις 22:00 της 26<sup>ης</sup> Μαρτίου καθότι η αιολική παραγωγή αυτής της χρονικής περιόδου ελαττώνεται αισθητά ή ακόμα και εκμηδενίζεται για αρκετές ώρες και ιδίως μετά τα μεσάνυχτα. Μετά το πέρας του παραπάνω διαστήματος και συγκεκριμένα στις 6:00 της 5<sup>ης</sup> Απριλίου, η στάθμη της δεξαμενής λαμβάνει και πάλι τη μέγιστη τιμή της γύρω από τη οποία κινείται, με κάποιες αυξομειώσεις που σημειώνονται ιδιαίτερα κατά τον Μάιο, μέχρι την έναρξη του Ιουνίου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην σημαντική αύξηση της αιολικής παραγωγής κατά την περίοδο αυτών των μηνών, μέρος της οποίας καλύπτει το σταδιακά αυξανόμενο φορτίο ενώ το υπόλοιπο τμήμα διατίθεται στη μονάδα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου. Παρά ταύτα, η παραγωγή υδρογόνου παρουσιάζεται μειωμένη συγκριτικά με την αντίστοιχη του Ιανουαρίου και του Φεβρουαρίου λόγω της πλήρους γόμωσης της δεξαμενής και της απόρριψης σημαντικών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Από τις αρχές Ιουνίου μέχρι και τα μέσα Οκτωβρίου, διακρίνεται κύμανση της στάθμης της δεξαμενής περί τη μέγιστη τιμή της, ενώ παρατηρούνται συνεχείς αυξομειώσεις αυτής κατά περιόδους. Οι περίοδοι αυτές αντιστοιχούν σε διαστήματα εμφάνισης ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα τη μερική ή αποκλειστική χρήση του αποθηκευμένου υδρογόνου και τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε τιμές ισχύος κοντά στην ονομαστική για την ικανοποίηση της κατακόρυφα αυξημένης ζήτησης, ειδικά του Ιουλίου και του Αυγούστου. Ωστόσο, η μείωση της στάθμης καλύπτεται σε επόμενο στάδιο πνοής ισχυρών ανέμων κατά το οποίο η περίσσεια διατίθεται ως είσοδος στην μονάδα του ηλεκτρολύτη. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, παρά την παρεμφερή συμπεριφορά που παρουσιάζει η στάθμη της δεξαμενής κατά το Σεπτέμβριο και μέχρι τα μέσα Οκτωβρίου σε σχέση με τους

καλοκαιρινούς μήνες, η παραγωγή υδρογόνου κατά την περίοδο αυτή είναι σημαντική μειωμένη λόγω της σταδιακής μείωσης της ταχύτητας του ανέμου και της σημαντικής ελάττωσης του φορτίου. Η μεταβολή των δύο αυτών παραμέτρων οδηγεί σε σταθεροποίηση της στάθμης περί την μέγιστη τιμή της και ευθύνεται για την εμφάνιση μικρότερης περίσσειας και ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας, που οδηγούν σε μικρότερη παραγωγή και κατανάλωση υδρογόνου αντίστοιχα. Από την 18<sup>η</sup> Οκτωβρίου μέχρι και την 25<sup>η</sup> του ίδιου μήνα ακολουθεί κατακόρυφη πτώση της στάθμης της δεξαμενής της τάξεως των 814 kg H<sub>2</sub> (σχήματα 6.26 και 6.27) γεγονός που καταδεικνύει σημαντικό έλλειμμα αιολικής παραγωγής, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 6.6. Αύξηση του περιεχόμενου υδρογόνου παρατηρείται από τα τέλη Οκτωβρίου μέχρι και την τελευταία εβδομάδα του Νοεμβρίου λόγω του μειωμένου φορτίου που επιτρέπει στη μειωμένη αιολική παραγωγή να καλύψει τη ζήτηση και στο σύστημα να χρησιμοποιήσει την περίσσεια με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου προς αποθήκευση. Αντιθέτως, κατά τον τελευταίο μήνα του έτους η στάθμη της δεξαμενής ελαττώνεται και πάλι για σημαντική χρονική περίοδο λόγω της εμφάνισης διαστημάτων με μηδαμινή αιολική παραγωγή, ενώ κατά την τελευταία εβδομάδα του έτους αυξάνεται σημαντικά και φθάνει κοντά στη μέγιστη τιμή της.

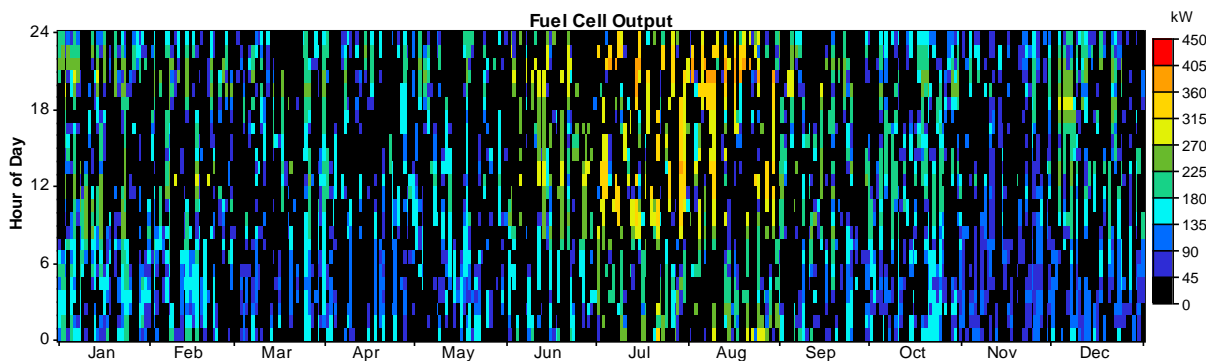


Σχήμα 6.27. Διάγραμμα μέσων μηνιαίων τιμών της στάθμης της δεξαμενής αποθήκευσης κατά τη διάρκεια του έτους.

Η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης υπολογίσθηκε ίση με 33.333,4 kWh, η αυτονομία της στις 161 ώρες ενώ η στάθμη της δεξαμενής κατά το τέλος του έτους βρέθηκε ίση με 995 kg υδρογόνου, τιμή η οποία είναι πράγματι μεγαλύτερη της αρχικής όπως απαιτείτο αλλά και κοντά σε αυτήν.

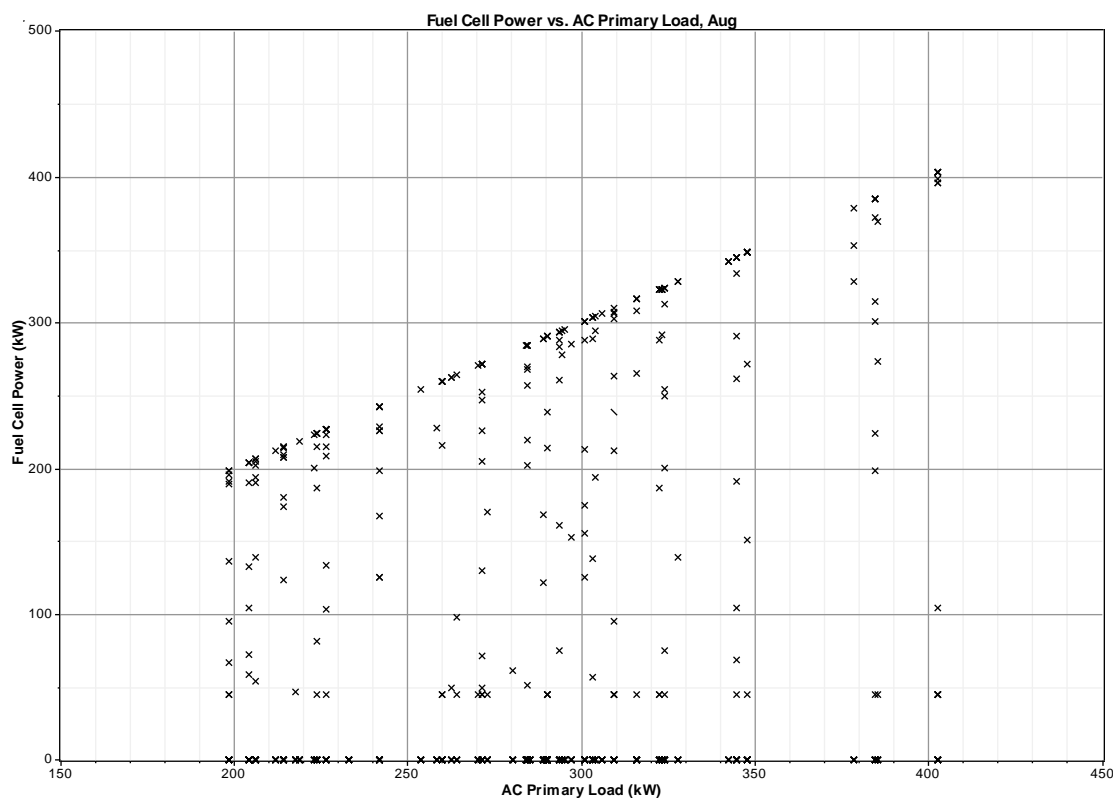
Τέλος, βάσει των εισόδων του προγράμματος και των παραπάνω υπολογισμών, υπολογίζονται τα στοιχεία που αφορούν στην ακριβή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Βάσει των υπολογισμών αυτών, προέκυψε

το διάγραμμα της χρονικής διακύμανσης της ισχύος εξόδου της κυψέλης στη διάρκεια μίας ημέρας και του συνόλου του έτους, το οποίο και παρατίθεται στη συνέχεια:



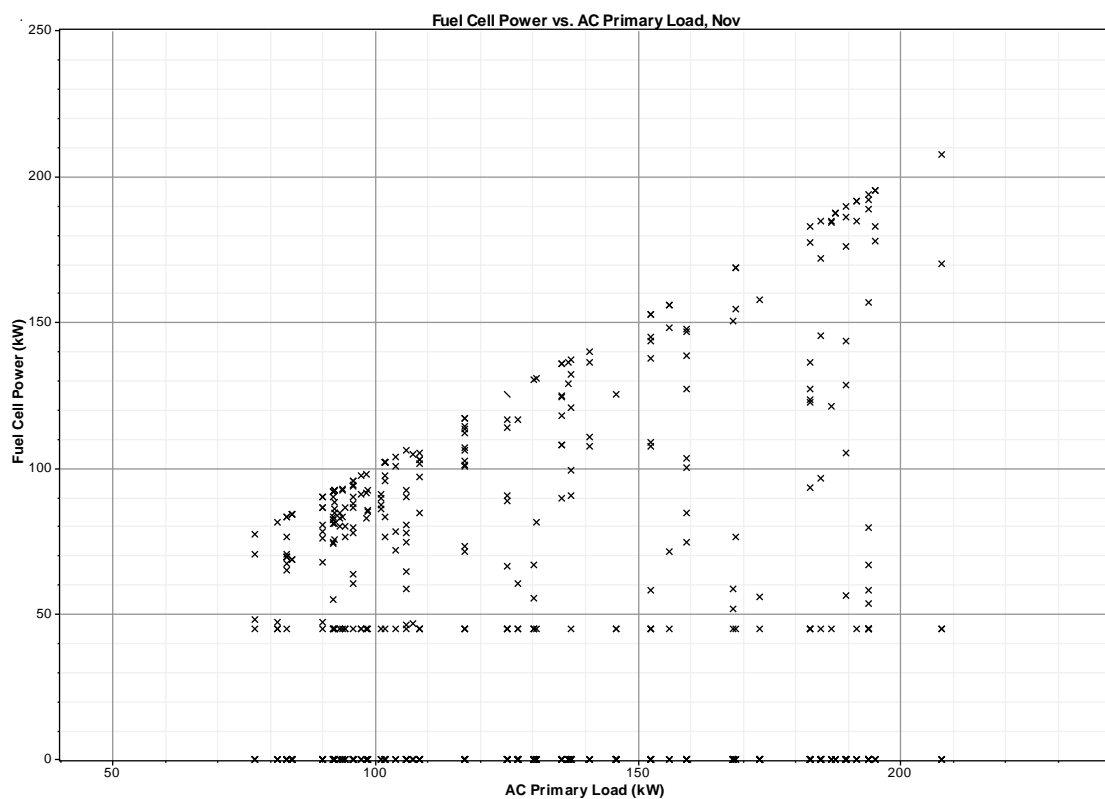
Σχήμα 6.28. Χρονική διακύμανση της ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και των μηνών του έτους.

Το σχήμα 6.28 επαληθεύει τις παρατηρήσεις που έγιναν αναφορικά με τη δεξαμενή αποθήκευσης, ενώ αξιοσημείωτη είναι η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου κοντά στην ονομαστική τιμή της ισχύος κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης (Ιούλιος - Αύγουστος) και σε πολύ χαμηλές τιμές της ισχύος κατά το μήνα Νοέμβριο και εν μέρει κατά το Δεκέμβριο.



Σχήμα 6.29. Διάγραμμα ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου για το μήνα Αύγουστο.

Όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, κατά τα διαστήματα μηδενικής ή μικρής αιολικής παραγωγής των καλοκαιρινών μηνών απαιτείται η εκμετάλλευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου και λειτουργία της κυψέλης κοντά στην ονομαστική τιμή της ισχύος για την κάλυψη της ζήτησης. Αντιθέτως, η ζήτηση του Νοεμβρίου είναι εξαιρετικά μειωμένη εν συγκρίσει με τους υπόλοιπους μήνες του έτους, με αποτέλεσμα, παρά τις μειωμένες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, η αιολική παραγωγή να επαρκεί για την κάλυψη αυτής και την παροχή της περίσσειας για την παραγωγή υδρογόνου. Ως εκ τούτου, η κυψέλη τίθεται κατά μεγάλα διαστήματα εκτός λειτουργίας και όποια ελλείμματα παρατηρούνται, δύνανται να καλυφθούν με λειτουργία αυτής σε χαμηλές τιμές της ισχύος.



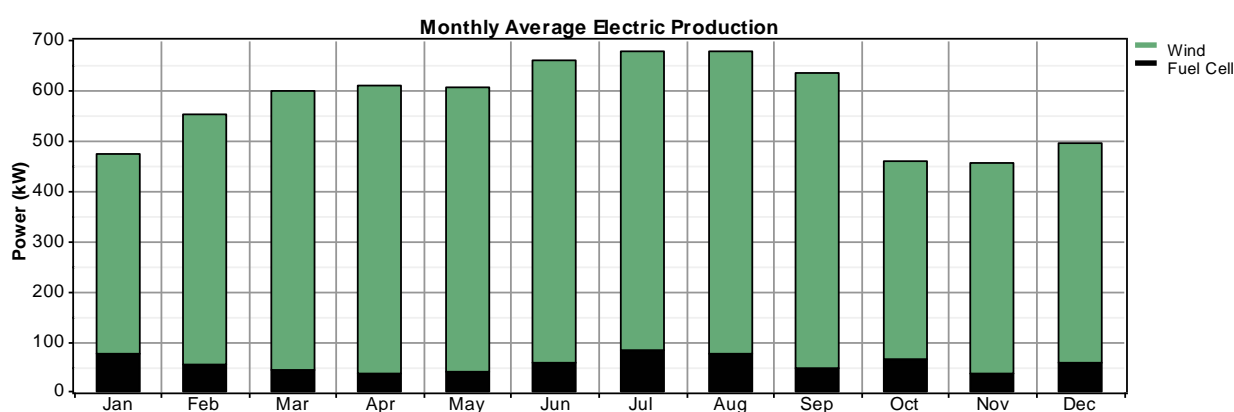
Σχήμα 6.30. Διάγραμμα ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου για το μήνα Νοέμβριο.

Τέλος, διακρίνεται σχεδόν συνεχής λειτουργία της κυψέλης καυσίμου κατά τον Οκτώβριο, γεγονός το οποίο συμβαδίζει με την σημαντική ελάττωση της στάθμης της δεξαμενής για μεγάλο χρονικό διάστημα αυτού του μήνα.

Η μέση ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου υπολογίσθηκε στα 151 kW με βαθμό εκμεταλλευσιμότητας της τάξεως του 12,4% και ετήσια παραγωγή ενέργειας ίση με 489.323 kWh/έτος. Η συνολική ετήσια κατανάλωση

υδρογόνου βρέθηκε ίση με 34.716 kg/έτος με την ειδική κατανάλωση να ανέρχεται στα 0,071 kg H<sub>2</sub>/kWh, ενώ ο μέσος βαθμός απόδοσης ίσος με 42,3%. Όσον αφορά στις ώρες λειτουργίας, αυτές υπολογίσθηκαν ίσες προς 3.233 h/έτος με την κυψέλη να καταγράφει 806 εκκινήσεις κατά τη διάρκεια του έτους.

Τέλος, υπολογίσθηκε η μέση μηνιαία συνολική παραγωγή ισχύος κατά τη διάρκεια του έτους και η κατανομή αυτής στο αιολικό πάρκο και την κυψέλη καυσίμου για κάθε μήνα με τα αποτελέσματα των υπολογισμών να φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 6.31. Διάγραμμα μέσης μηνιαίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους.

Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας βρέθηκε ίση με 5.043.945 kWh/έτος με το 90% της παραπάνω ποσότητας να αντιστοιχεί στην παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο και το 10% σε παραγωγή της κυψέλης καυσίμου. Με την επιλογή του συστήματος αυτού επιτυγχάνεται πλήρης ικανοποίηση του φορτίου στο σύνολο του έτους, ενώ σημαντικό ποσό της παραχθείσας ενέργειας απορρίπτεται λόγω πληρότητας της δεξαμενής υδρογόνου. Συγκεκριμένα, το ποσό αυτό ανέρχεται στις 1.595.047 kWh/έτος και αντιστοιχεί στο 31,6% της συνολικής παραγωγής. Η απορριπτόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου σε άλλη ηλεκτρολυτική μονάδα και χρήση αυτού στον τομέα των μεταφορών. Εναλλακτικά, προτείνεται η χρήση της ενέργειας αυτής για την παραγωγή υδρογόνου ή πεπιεσμένου αέρα με σκοπό την ικανοποίηση μέρους του ηλεκτρικού φορτίου άλλων οικισμών.





## **7. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΤΗ ΜΟΡΦΗ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

Στην παρούσα ενότητα θα εξετασθεί δυναμικά η περίπτωση αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα για το διβάθμιο σύστημα χωρίς προθέρμανση για οικισμό της Καρπάθου. Το συγκεκριμένο σύστημα επιλέχθηκε καθότι, όπως παρουσιάστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο, εμφανίζει υψηλότερο ενεργειακό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης από το αντίστοιχο μονοβάθμιο και προτιμήθηκε από τα συστήματα με προθέρμανση αέρα για λόγους αποφυγής χρήσης καυσίμου. Τέλος, θα ακολουθήσει σύγκριση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υδρογόνου με το σύστημα πεπιεσμένου αέρα από ενεργειακής και οικονομικής πλευράς.

### **7.1 Δυναμική ανάλυση συστήματος αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα**

#### **7.1.1 Φορτίο, ανεμολογικά δεδομένα και αιολική παραγωγή**

Για τη δυναμική ανάλυση του διβάθμιου συστήματος αποθήκευσης αέρα θα χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία φορτίου αυτά που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 6.5.1 και αντιστοιχούν στο 5% της ζήτησης της Καρπάθου, ενώ ως ανεμολογικά δεδομένα λαμβάνονται αυτά της ενότητας 6.1.2. Όσον αφορά στην εγκατάσταση του αιολικού πάρκου, επιλέγεται για λόγους σύγκρισης το πάρκο της ενότητας 6.5.7 με ονομαστική ισχύ 900 kW. Ως εκ τούτου, η χρονική διακύμανση της αιολικής παραγωγής κατά τη διάρκεια μίας ημέρας και ολόκληρου του έτους απεικονίζεται στο διάγραμμα 6.23.

#### **7.1.2 Συμπιεστές αέρα**

Η αποθήκευση αέρα υπό υψηλή πίεση σε δεξαμενή με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε χρονικά διαστήματα μειωμένης αιολικής παραγωγής απαιτεί τη συμπίεση του αέρα περιβάλλοντος σε δύο στάδια. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2, στο συμπιεστή ΧΠ συμπιέζεται αέρας πίεσης 1,013 bar και θερμοκρασίας 20°C στα 6,3 bar, ενώ αφού ακολουθήσει ενδιάμεση ψύξη αυτού, εισάγεται στο συμπιεστή ΥΠ, από όπου και εξέρχεται με πίεση 40 bar. Για λόγους σύγκρισης με το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου, η συνολική ονομαστική ισχύς των συμπιεστών λήφθηκε ίση με αυτήν της ηλεκτρολυτικής μονάδας (700 kW). Συγκεκριμένα, η ονομαστική ισχύς του συμπιεστή χαμηλής πίεσης λήφθηκε ίση με 300 kW, ενώ αυτή του συμπιεστή χαμηλής πίεσης ίση με 400 kW. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης των συμπιεστών τίθεται ίσος με  $\eta_{is,C}=0,85$ , ενώ ο μηχανικός ίσος με  $\eta_{m,C}=0,99$  με τον μηχανικό και ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης των κινητήρων να είναι ίσοι με  $\eta_{m,M}=0,99$  και  $\eta_{el,M}=0,98$  αντίστοιχα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι

μηχανές ορίστηκε να τίθενται σε λειτουργία όταν η ισχύς εισόδου τους ξεπερνά το 10% της ονομαστικής τους ισχύος.

### 7.1.3 Μονάδα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα

Κατά την εκτέλεση του υπολογιστικού προγράμματος Homer για τον οικισμό της Καρπάθου, ως είσοδος τέθηκε η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης σε υδρογόνο (1000 kg H<sub>2</sub>), ποσότητα η οποία αντιστοιχεί σε 33.333,4 kWh λαμβάνοντας υπόψη την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του υδρογόνου (LHV=33,3 kWh/kg). Ως εκ τούτου, για λόγους σύγκρισης, η χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα θα ληφθεί κατά τρόπο τέτοιο που να αντιστοιχεί σε 33.333,4 kWh και αυτονομία 161 ωρών. Για το σκοπό, όμως, αυτό είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του ποσού ενέργειας που δύναται να παραχθεί από 1 kg πεπιεσμένου αέρα με τις δεδομένες διαφορές ενθαλπίας στους στρόβιλους:

$$E = m \cdot \Delta h = 1 \text{ kg} \cdot ((20,1 - (-83,59)) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (9,64 - (-85,47)) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) = 198,8 \text{ kJ} = 0,0552 \text{ kWh}$$

Με διαίρεση, λοιπόν, της επιθυμητής χωρητικότητας με την παραπάνω ποσότητα προκύπτει η χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης του αέρα ίση με 603.622,94 kg. Ως διάρκεια ζωής της μονάδας τέθηκαν τα 20 έτη, η δεξαμενή θεωρήθηκε ότι είναι γεμάτη κατά το 95% στην αρχή του έτους, ενώ το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ελήφθη ίσο με 0,5% του αρχικού κόστους επένδυσης.

### 7.1.4 Στρόβιλοι

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε χρονικά διαστήματα μειωμένης αιολικής παραγωγής απαιτείται εκτόνωση του συμπιεσμένου αέρα σε δύο στάδια. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2, στο στρόβιλο ΥΠ εκτονώνεται αέρας πίεσης 39,3 bar και θερμοκρασίας 20°C στα 6,969 bar, ενώ αφού ακολουθήσει ενδιάμεση θέρμανση αυτού σε υδρόψυκτο εναλλάκτη, εισάγεται στο στρόβιλο ΧΠ, από όπου και εξέρχεται με πίεση 1,213 bar. Για λόγους σύγκρισης με το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου, η συνολική ονομαστική ισχύς των στρόβιλων λήφθηκε ίση με αυτήν της κυψέλης καυσίμου (450 kW). Συγκεκριμένα, η ονομαστική ισχύς του στρόβιλου υψηλής πίεσης λήφθηκε ίση με 230 kW, ενώ αυτή του συμπιεστή χαμηλής πίεσης ίση με 220 kW. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης των στρόβιλων τίθεται ίσος με  $\eta_{is,T}=0,87$ , ενώ ο μηχανικός ίσος με  $\eta_{m,T}=0,99$  με τον μηχανικό και ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης των γεννητριών να είναι ίσοι με  $\eta_{m,G}=0,99$  και  $\eta_{el,G}=0,98$  αντίστοιχα.

### 7.1.5 Απαιτήσεις συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση εκτέλεσης του προγράμματος HOMER για την εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου, το σύστημα απαιτείται να πληροί κάποιες προϋποθέσεις ούτως ώστε να είναι λειτουργικό και να καλύπτει τη ζήτηση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτές οι απαιτήσεις εξακολουθούν να ισχύουν και στην περίπτωση του συστήματος αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα και είναι οι εξής:

- ✓ η δεξαμενή αποθήκευσης απαιτείται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ακόμα και στις περιόδους υψηλής αιολικής παραγωγής, να μην φτάνει σε μηδενική στάθμη.
- ✓ επίτευξη ίσης ή και υψηλότερης στάθμης στη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου κατά το τέλος του έτους με σκοπό τη συνεχή λειτουργία της εγκατάστασης και κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών.
- ✓ επιλογή στροβίλων συνολικής ισχύος μεγαλύτερης της αιχμής ζήτησης με σκοπό τη δυνατότητα πλήρους κάλυψης του φορτίου ακόμα και σε ακραίες συνθήκες (αιχμή ζήτησης και μηδενική αιολική παραγωγή).

### 7.1.6 Αποτελέσματα υπολογισμών

Βάσει των στοιχείων που δόθηκαν ως είσοδοι για την εκτέλεση των υπολογισμών, προέκυψε η χρονική διακύμανση της αιολικής παραγωγής κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και του συνόλου του έτους όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 6.23. Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, η μέση ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου υπολογίσθηκε στα 520 kW επιτυγχάνοντας βαθμό εκμεταλλεσιμότητας της τάξεως του 57,8% και ετήσια παραγωγή ενέργειας ίση με 4.554.623 kWh/έτος, ενώ οι ώρες λειτουργίας των ανεμογεννητριών υπολογίσθηκε ότι ανέρχονται στις 7.974 ανά έτος.

Εν συνέχεια, βάσει της αιολικής παραγωγής και των στοιχείων φορτίου, υπολογίζεται η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα του έτους και εισάγοντας τον ηλεκτρικό και μηχανικό βαθμό απόδοσης των κινητήρων η συνολική ισχύς εισόδου στους συμπιεστές με βάση τη σχέση:

$$P_{comp} = P_{el} \cdot n_{el,M} \cdot n_{m,M} \quad (kW)$$

Σε περίπτωση που η ισχύς  $P_{comp}$  λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη των 700 kW, τίθεται ίση με την συνολική ονομαστική ισχύ, ενώ αντιθέτως όταν η συνολική ισχύς που τροφοδοτεί τους συμπιεστές δεν ξεπερνά τα 70 kW οι μηχανές τίθενται εκτός λειτουργίας. Στη συνέχεια, ευρίσκεται η παροχή μάζας των συμπιεστών για τις τιμές της συνολικής ισχύος εισόδου ως εξής:

$$\dot{m} = \frac{P_{comp} \cdot n_{m,comp}}{(\Delta h_1 + \Delta h_2)} \quad (kg/sec)$$

και με βάση την τιμή που προκύπτει, υπολογίζεται η ποσότητα αέρα που συμπιέζεται κατά τη διάρκεια μίας ώρας.

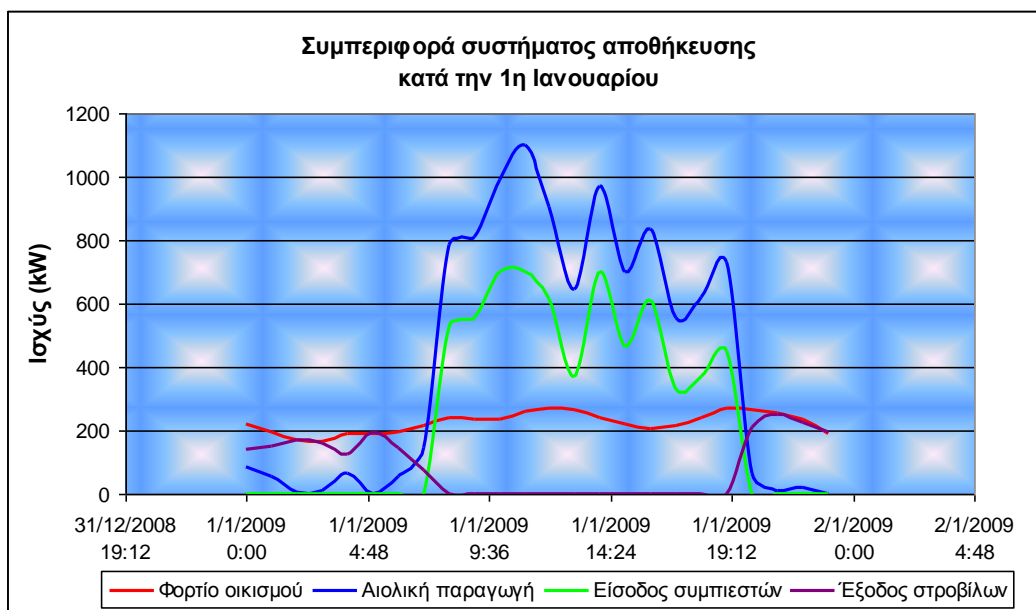
Με ανάλογο τρόπο ευρίσκεται το έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα και, με βάση τους βαθμούς απόδοσης των γεννητριών, η συνολική ισχύς που εξέρχεται από τους στροβίλους και οδηγείται προς τις γεννήτριες:

$$P_{turb} = \frac{P_{el}}{n_{el,G} \cdot n_{m,G}} \quad (kW)$$

Η παροχή μάζας των στροβίλων υπολογίζεται με σχέση αντίστοιχη αυτής που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της παροχής των συμπιεστών και, συγκεκριμένα, για τις τιμές της συνολικής ισχύος εξόδου προκύπτει ως εξής:

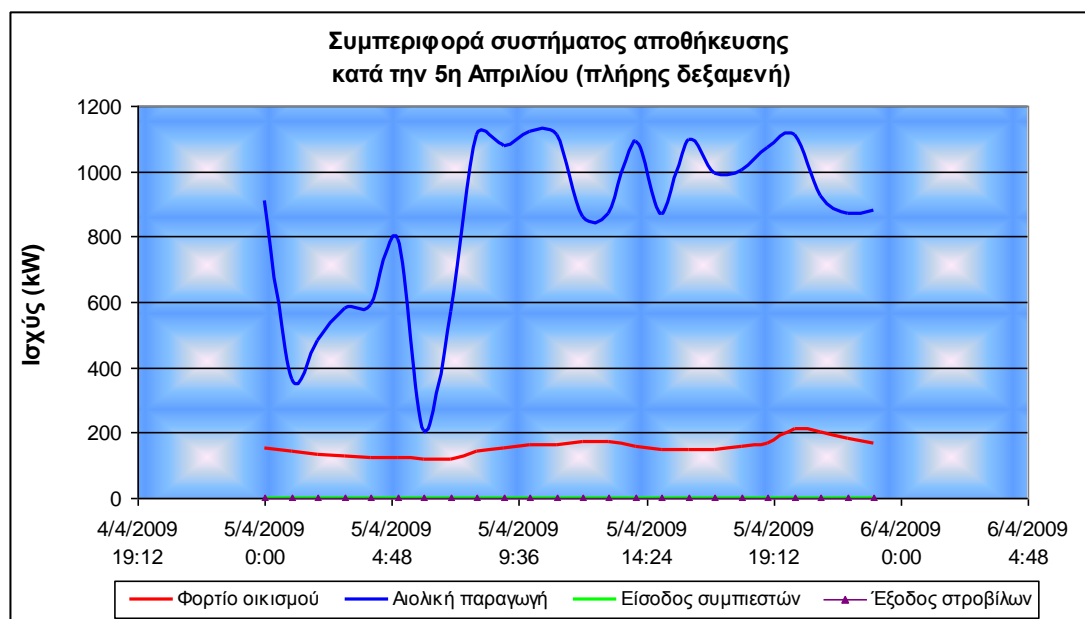
$$\dot{m} = \frac{P_{turb}}{n_{m,turb} \cdot (\Delta h_1 + \Delta h_2)} \quad (kg/sec)$$

Τέλος, βάσει της κατανάλωσης των στροβίλων και της παραγωγής αέρα από τους συμπιεστές, υπολογίζεται η στάθμη της μονάδας αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα, η τιμή της οποίας ελέγχεται ούτως ώστε όταν η δεξαμενή είναι πλήρης να τίθενται οι συμπιεστές εκτός λειτουργίας. Βάσει των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι για την εκτέλεση των υπολογισμών και την παραπάνω μεθοδολογία, παρατίθενται στη συνέχεια διαγράμματα που απεικονίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος σε διάφορα χρονικά διαστήματα του έτους:



Σχήμα 7.1. Σχηματική απεικόνιση συμπεριφοράς συστήματος αποθήκευσης κατά την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου.

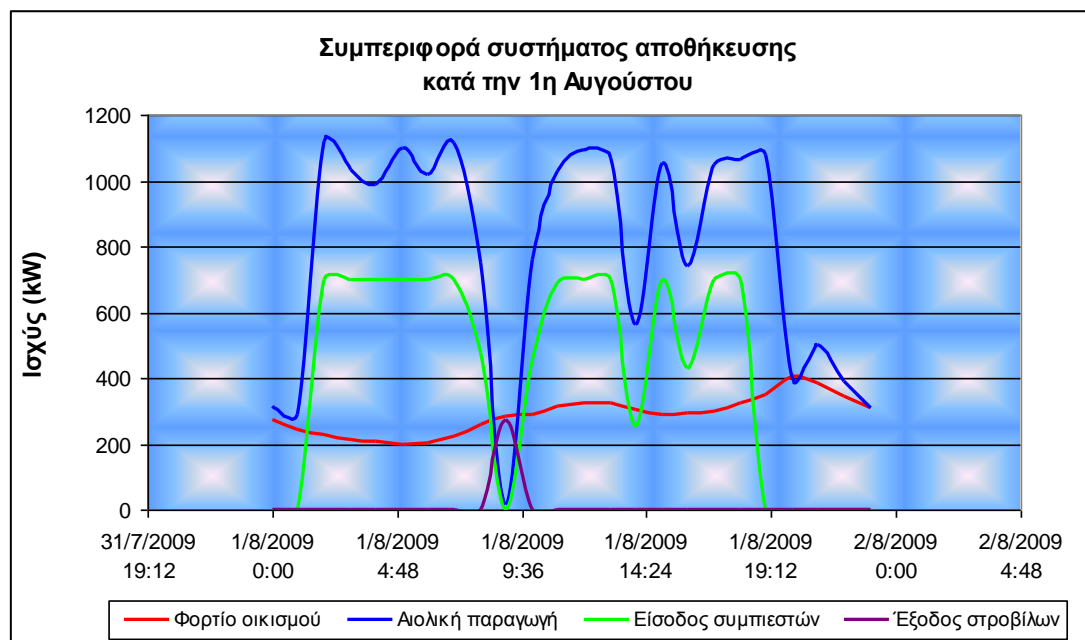
Στο σχήμα 7.1 παρατηρείται η συμπεριφορά του συστήματος κατά την πρώτη ημέρα του έτους κατά την οποία η δεξαμενή αποθήκευσης είναι γεωμενής κατά το 95% της χωρητικότητάς της. Κατά τις πρώτες πρωινές ώρες της ημέρας, η αιολική παραγωγή κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα με αποτέλεσμα τη λειτουργία των στροβίλων και τη χρήση ποσότητας αποθηκευμένου αέρα για την ικανοποίηση του φορτίου. Εν συνεχεία, παρατηρείται αύξηση της αιολικής παραγωγής, η οποία από τις 8:00 και έπειτα υπερκαλύπτει τη ζήτηση και θέτει σε λειτουργία τους συμπιεστές. Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι και τις 19:00 οι καμπύλες της αιολικής παραγωγής και της ισχύος εισόδου στους συμπιεστές διαφέρουν μόνο κατά το φορτίο του οικισμού, ενώ από το χρονικό αυτό σημείο και μετά η παραγωγή ισχύος από το αιολικό πάρκο σταδιακά ελαττώνεται και εκμηδενίζεται κατά το τέλος της ημέρας με συνέπεια την κάλυψη του φορτίου κατά μεγάλο μέρος από την εκτόνωση του αέρα στους στροβίλους.



Σχήμα 7.2. Σχηματική απεικόνιση συμπεριφοράς συστήματος αποθήκευσης κατά την 5<sup>η</sup> Απριλίου.

Στο σχήμα 7.2 απεικονίζεται η συμπεριφορά του συστήματος κατά την 5<sup>η</sup> Απριλίου, όπου παρατηρείται αυξημένη αιολική παραγωγή και μειωμένο φορτίο σε σύγκριση με την πρώτη ημέρα του έτους. Όπως προκύπτει από το σχήμα, η αιολική παραγωγή ικανοποιεί πλήρως το φορτίο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ενώ η περίσσεια της ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία των συμπιεστών. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι συμπιεστές βρίσκονται εκτός λειτουργίας γεγονός το οποίο οφείλεται στην πληρότητα της δεξαμενής αποθήκευσης από τις 21:00 της προηγούμενης

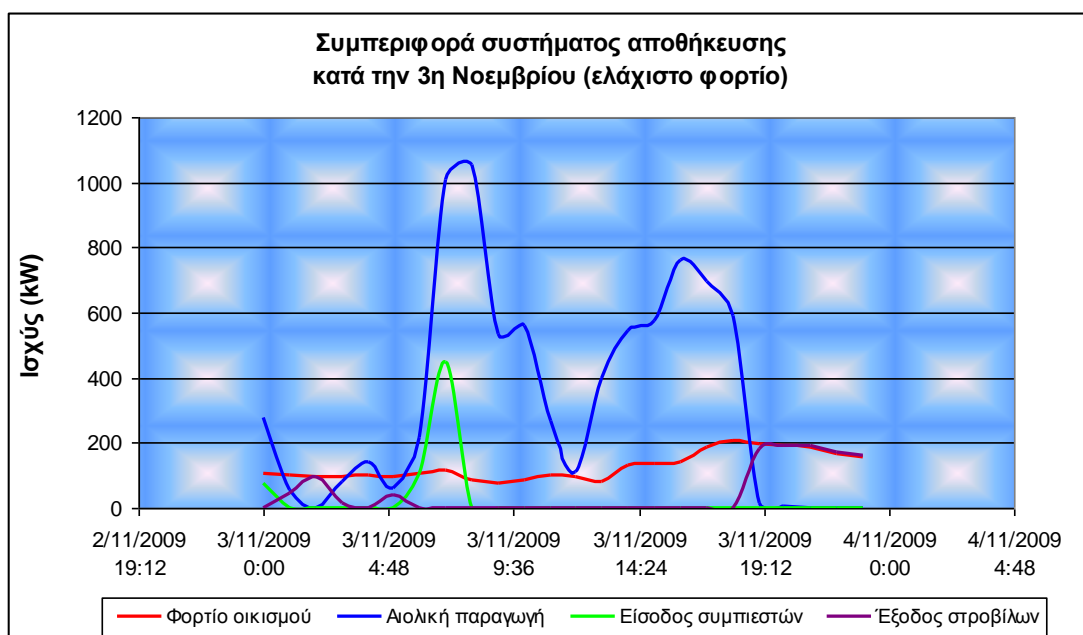
ημέρας. Ως εκ τούτου, η περίσσεια της ηλεκτρικής ενέργειας που ανέρχεται στις 16.864,99 kWh για τη συγκεκριμένη ημέρα απορρίπτεται, ενώ οι στρόβιλοι, όπως αναμένεται, δεν λειτουργούν για όλο το διάστημα της ημέρας.



Σχήμα 7.3. Σχηματική απεικόνιση συμπεριφοράς συστήματος αποθήκευσης κατά την 1<sup>η</sup> Αυγούστου.

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 7.3, όπου απεικονίζεται η συμπεριφορά του συστήματος κατά την 1<sup>η</sup> ημέρα του Αυγούστου οπότε και εμφανίζεται η αιχμή ζήτησης, κατά τις δύο πρώτες πρωινές ώρες η αιολική παραγωγή καλύπτει πλήρως τη ζήτηση ωστόσο η περίσσεια της ενέργειας απορρίπτεται καθώς δεν ξεπερνά το 10% του αθροίσματος των ονομαστικών τιμών της ισχύος των συμπιεστών. Εν συνεχεία και μέχρι και τις 8:00, η αιολική παραγωγή αυξάνεται κατακόρυφα με αποτέλεσμα οι συμπιεστές να τίθενται σε λειτουργία. Συγκεκριμένα, μέχρι τις 7:00 η περίσσεια ξεπερνά την ονομαστική ισχύ των συμπιεστών με αποτέλεσμα την απόρριψη ποσού ενέργειας, ενώ στις 8:00 οι συμπιεστές λειτουργούν σε μερικό φορτίο. Από την άλλη πλευρά, στις 9:00 παρουσιάζεται έλλειμμα 267,43 kWh το οποίο καλύπτεται με ενεργοποίηση των στρόβιλων και χρήση 5.041,96 kg συμπιεσμένου αέρα. Στη συνέχεια, και μέχρι τις 19:00 παρατηρείται περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία διατίθεται για τη λειτουργία των συμπιεστών και τη γόμωση της δεξαμενής με αέρα. Στο σημείο αυτό, ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι στις 19:00 αν και παρατηρείται περίσσεια μεγαλύτερη του 10% της ονομαστικής ισχύος των συμπιεστών ενώ παράλληλα η δεξαμενή αποθήκευσης δεν είναι πλήρης, οι συμπιεστές βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει, διότι η

στάθμη της δεξαμενής βρίσκεται κοντά στη μέγιστη τιμή της και η συμπίεση της ποσότητας αέρα που απαιτείται για την πλήρωση της δεξαμενής αντιστοιχεί σε λειτουργία των συμπιεστών σε ισχύ χαμηλότερη του 10% της ονομαστικής τους τιμής. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και κατά τις 21:00, ενώ στη συνέχεια η διατιθέμενη περίσσεια δεν επαρκεί, ώστε να τεθούν οι συμπιεστές σε λειτουργία.

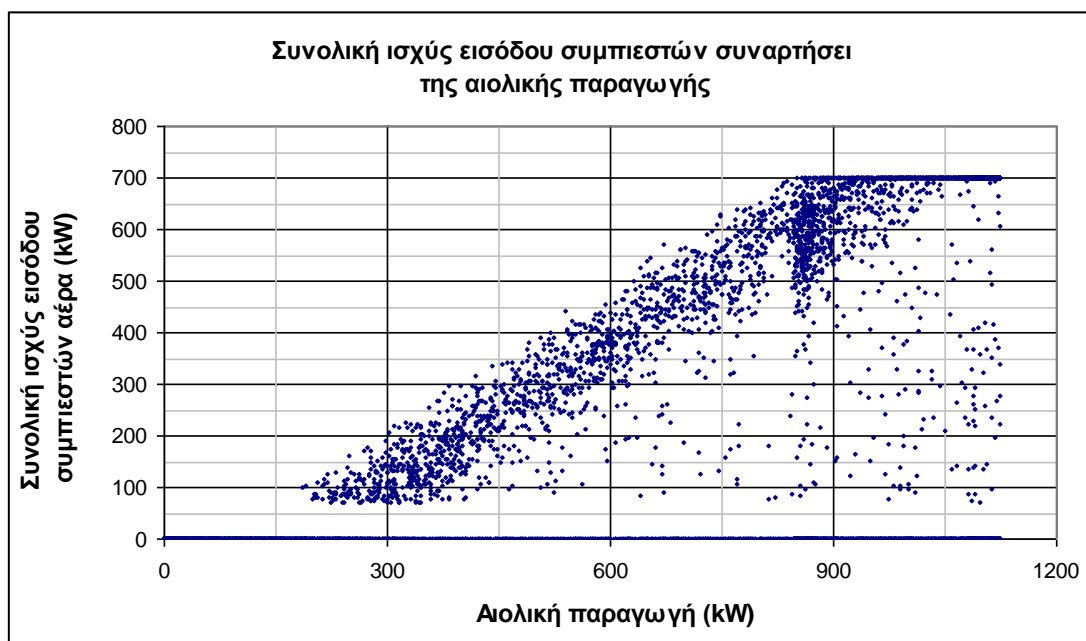


Σχήμα 7.4. Σχηματική απεικόνιση συμπεριφοράς συστήματος αποθήκευσης κατά την 3<sup>η</sup> Νοεμβρίου.

Τέλος, στο σχήμα 7.4 απεικονίζεται η συμπεριφορά του συστήματος κατά την ημέρα εμφάνισης του ελαχίστου φορτίου του έτους (3<sup>η</sup> Νοεμβρίου). Αρχικά και μέχρι τις 7:00 παρατηρούνται συνεχείς εναλλαγές στον τρόπο κάλυψης του φορτίου (πλήρης κάλυψη φορτίου από το αιολικό πάρκο ή τους στροβίλους είτε κάλυψη αυτού κατά μέρος από τη μία και κατά το υπόλοιπο μέρος από την άλλη συνιστώσα). Ωστόσο, στις 0:00 και τις 7:00 παρά το γεγονός ότι παρατηρείται περίσσεια ενέργειας, οι συμπιεστές δεν δέχονται ως είσοδο την τιμή αυτή αλλά λειτουργούν με μειωμένη ισχύ με σκοπό της απαιτούμενης μόνο ποσότητας μάζας αέρα για την πλήρωση της δεξαμενής. Όσον αφορά στις 4:00, η περίσσεια που προκύπτει από τη διαφορά αιολικής παραγωγής και φορτίου, δεν επαρκεί για τη λειτουργία των συμπιεστών με αποτέλεσμα η ποσότητα του αποθηκευμένου αέρα να παραμένει αμετάβλητη. Από τις 7:00 μέχρι και τις 18:00 το φορτίο καλύπτεται στο σύνολό του από την παραγωγή του αιολικού πάρκου με την ισχύ εισόδου στους συμπιεστές να είναι μηδενική λόγω πληρότητας της μονάδας αποθήκευσης. Τέλος, μέχρι το τέλος της

ημέρας η παραγόμενη ενέργεια ελαττώνεται αισθητά και στο χρονικό διάστημα 21:00-23:00 εκμηδενίζεται, γεγονός το οποίο συνεπάγεται τη μερική και εν συνεχεία πλήρη κάλυψη του φορτίου με εκτόνωση του συμπιεσμένου αέρα στους στροβίλους.

Όσον αφορά στη λειτουργία των συμπιεστών κατά τη διάρκεια του έτους, αυτή υπολογίσθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω και κατασκευάσθηκε το διάγραμμα της συνολικής ισχύος εισόδου των συμπιεστών συναρτήσει της αιολικής παραγωγής:



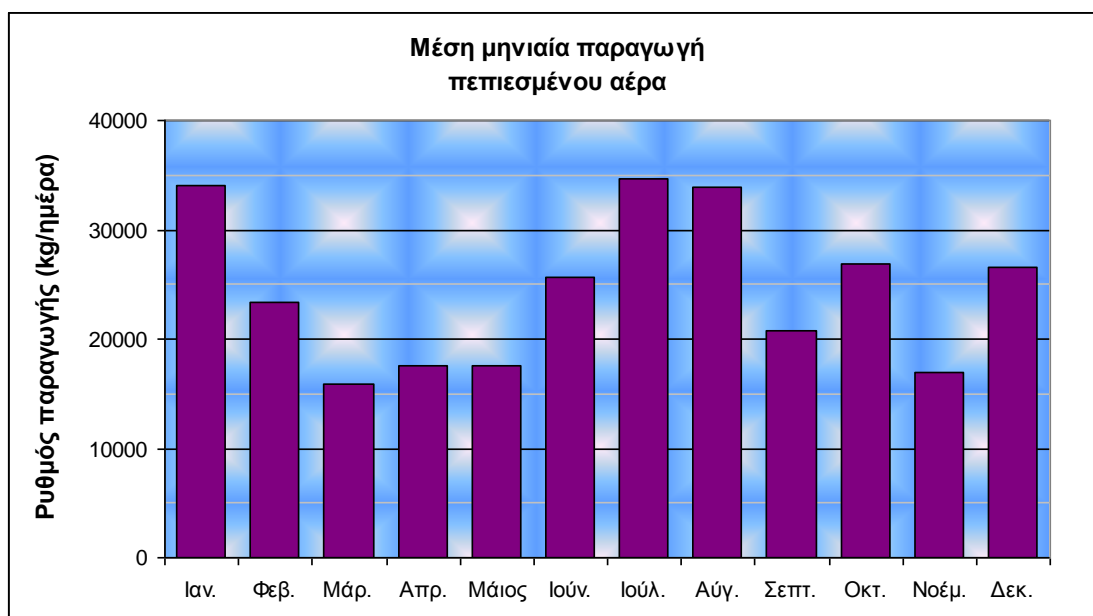
Σχήμα 7.5. Διάγραμμα συνολικής ισχύος συμπιεστών συναρτήσει της αιολικής παραγωγής.

Στο σχήμα 7.5 παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση της συνολικής ισχύος των συμπιεστών με την αύξηση της αιολικής παραγωγής, ενώ όταν η ισχύς εξόδου των ανεμογεννητριών ξεπερνά τα 850 kW παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση των τιμών της ισχύος των συμπιεστών στα 700 kW. Στα σημεία αυτά, η περίσσεια της ηλεκτρικής ισχύος ξεπερνά το άθροισμα των τιμών της ονομαστικής ισχύος των συμπιεστών με αποτέλεσμα τη λειτουργία αυτών στο ονομαστική τους τιμή και την απόρριψη της υπόλοιπης ενέργειας. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η συνολική ισχύς εισόδου στους συμπιεστές λαμβάνει τη μηδενική τιμή σε όλο το εύρος τιμών της αιολικής παραγωγής. Αυτό συμβαίνει, γιατί σε περίπτωση χαμηλής αιολικής παραγωγής δεν προκύπτει περίσσεια ισχύος που θα διατεθεί για την τροφοδοσία των συμπιεστών, ενώ σε περίπτωση που η τιμή της δεν ξεπερνά τα 70 kW, οι συμπιεστές τίθενται



εκτός λειτουργίας. Αντιθέτως, όταν εμφανίζεται αυξημένη αιολική παραγωγή, η συνολική ισχύς εισόδου των συμπιεστών λαμβάνει τη μηδενική τιμή σε περίπτωση πληρότητας της δεξαμενής αποθήκευσης.

Η μέση τιμή της συνολικής ισχύος εισόδου των συμπιεστών υπολογίσθηκε στα 160,23 kW και η μέγιστη στα 700 kW με βαθμό εκμεταλλευσιμότητας της τάξεως του 22,9%. Όσον αφορά στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας, αυτή βρέθηκε ίση με 1.403.574,54 kWh/έτος με ειδική κατανάλωση 0,1613 kWh/kg πεπιεσμένου αέρα, ενώ οι ώρες λειτουργίας υπολογίσθηκαν ότι ανέρχονται στις 2.955 ανά έτος. Αντίστοιχα, ο μέσος ρυθμός παραγωγής αέρα ανέρχεται στα 1.023,58 kg/h, ο αντίστοιχος μέγιστος στα 4.473,53 kg/h, ενώ η συνολική ετήσια παραγωγή είναι ίση με 8.966.595,24 kg/έτος. Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται ο μέσος μηνιαίος ρυθμός παραγωγής πεπιεσμένου αέρα σε kg/ημέρα.

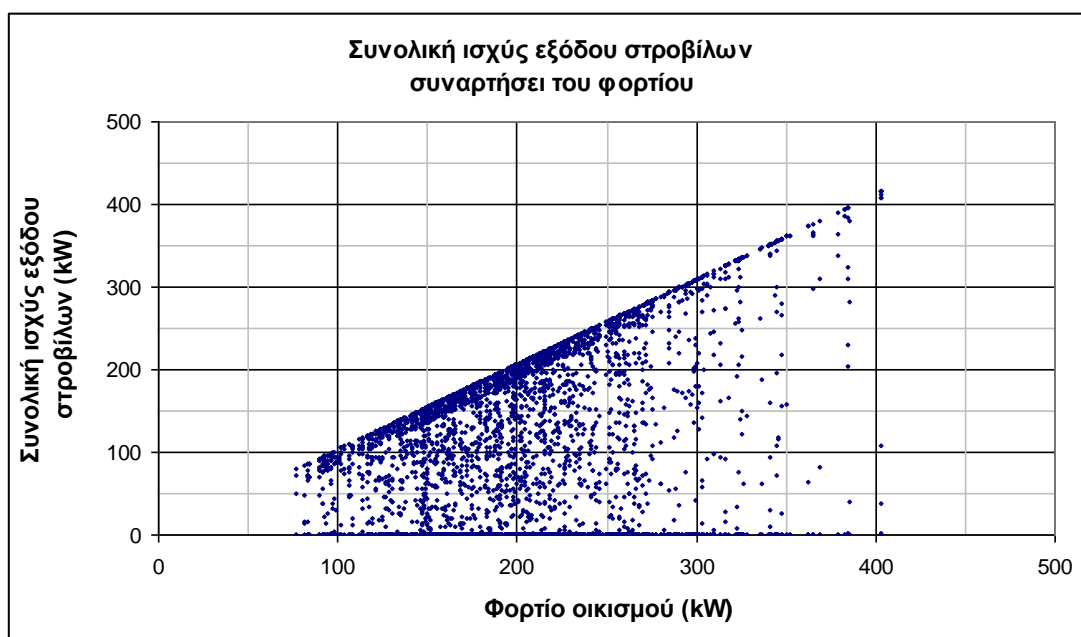


Σχήμα 7.6. Διάγραμμα μέσου μηνιαίου ρυθμού παραγωγής πεπιεσμένου αέρα κατά τη διάρκεια του έτους.

Η μορφή του παραπάνω διαγράμματος είναι, όπως ήταν αναμενόμενο, παρόμοια με αυτήν του σχήματος 6.26 που απεικονίζει τη μέση μηνιαία παραγωγή υδρογόνου. Συγκεκριμένα, η παραγωγή πεπιεσμένου αέρα είναι ιδιαίτερα αυξημένη κατά τον Ιανουάριο λόγω της μη πληρότητας της δεξαμενής και της πνοής ισχυρών ανέμων και της εμφάνισης περίσσειας κυρίως κατά τις μεσημεριανές ώρες. Στους επόμενους μήνες και μέχρι το Μάιο, κατά τους οποίους εμφανίζεται αυξημένη αιολική παραγωγή, η παραγωγή και αποθήκευση αέρα είναι ιδιαίτερα μειωμένη σχετικά με τον

Ιανουάριο λόγω της πληρότητας της δεξαμενής αποθήκευσης για σημαντικά χρονικά διαστήματα. Αντιθέτως, κατά τον Ιούνιο και κυρίως κατά τους μήνες αιχμής της ζήτησης (Ιούλιος και Αύγουστος), η παρουσία ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας σε κάποια διαστήματα συνεπάγεται την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων αποθηκευμένου αέρα. Οι ποσότητες αυτές, ωστόσο, αναπληρώνονται σε διαστήματα υψηλής αιολικής παραγωγής με αποτέλεσμα η παραγωγή πεπιεσμένου αέρα αυτών των μηνών να παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένη. Κατά το Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο, η παραγωγή υδρογόνου είναι σημαντική μειωμένη λόγω της σταδιακής μείωσης της ταχύτητας του ανέμου και της σημαντικής ελάττωσης του φορτίου με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της στάθμης της δεξαμενής περί τη μέγιστη τιμή της και την εμφάνιση μικρότερης περίσσειας και ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας, που οδηγούν σε μικρότερη παραγωγή και κατανάλωση υδρογόνου αντίστοιχα. Όσον αφορά στο μήνα Νοέμβριο, η μέση μηνιαία παραγωγή πεπιεσμένου αέρα ελαττώνεται σημαντικά λόγω της μειωμένης αιολικής παραγωγής, η οποία, ωστόσο, κατά μείζονα λόγο επαρκεί για την κάλυψη του κατακόρυφα μειωμένου φορτίου, με την προκύπτουσα περίσσεια διατίθεται για την παραγωγή αέρα. Τέλος, τον Δεκέμβριο παρουσιάζεται αύξηση της εξεταζόμενης ποσότητας λόγω της αυξημένης αιολικής παραγωγής κατά τη δεύτερη και τελευταία εβδομάδα του μήνα.

Βάσει της μεθοδολογία επίλυσης που προηγήθηκε, υπολογίζονται τα στοιχεία που αφορούν στη λειτουργία των στροβίλων κατά τη διάρκεια του έτους και κατασκευάζεται το διάγραμμα της συνολικής ισχύος εξόδου των στροβίλων συναρτήσει του φορτίου του οικισμού:

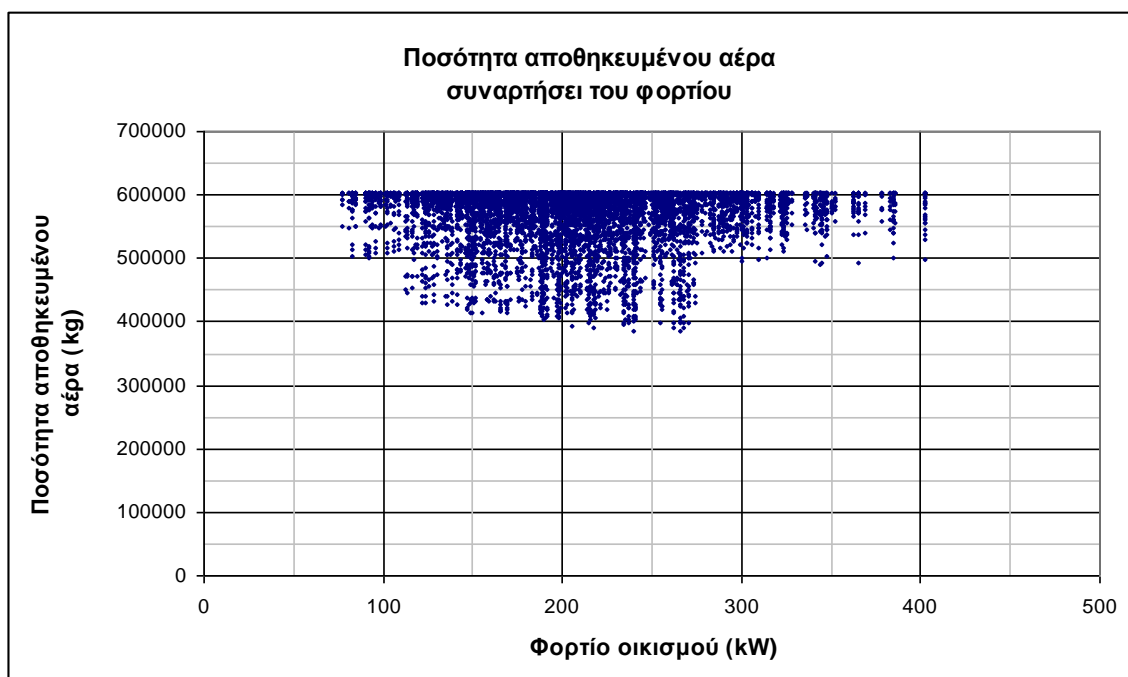


Σχήμα 7.7. Διάγραμμα συνολικής ισχύος εξόδου στροβίλων συναρτήσει του φορτίου.

Στο σχήμα 7.7 απεικονίζεται αύξηση της συνολικής ισχύος εξόδου των στροβίλων με την αύξηση του φορτίου του οικισμού. Συγκεκριμένα, η έντονη γραμμή που σχηματίζεται από τα ζεύγη τιμών των δύο μεταβλητών φανερώνει τη σχεδόν γραμμική σχέση που υπάρχει μεταξύ αυτών κατά τα χρονικά διαστήματα μηδενικής αιολικής παραγωγής. Παράλληλα, τα σημεία λειτουργίας μεταξύ της γραμμής και του οριζοντίου άξονα αντιπροσωπεύουν καταστάσεις κάλυψης του φορτίου και από τις δύο συνιστώσες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τα σημεία που βρίσκονται πάνω στον οριζόντιο άξονα απεικονίζουν τα χρονικά σημεία κατά τα οποία η ζήτηση καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από το αιολικό πάρκο.

Η μέση τιμή της συνολικής ισχύος εξόδου των συμπιεστών υπολογίσθηκε στα 55,78 kW με βαθμό εκμεταλλευσιμότητας της τάξεως του 12,39% και ετήσια παραγωγή ενέργειας ίση με 488.608,42 kWh/έτος. Η συνολική ετήσια κατανάλωση πετρευσμένου βρέθηκε ίση με 8.937.413,96 kg/έτος με την ειδική κατανάλωση να ανέρχεται στα 18,85 kg αέρα/kWh, ενώ οι ώρες λειτουργίας των στροβίλων υπολογίσθηκαν ίσες με 3.023 h/έτος.

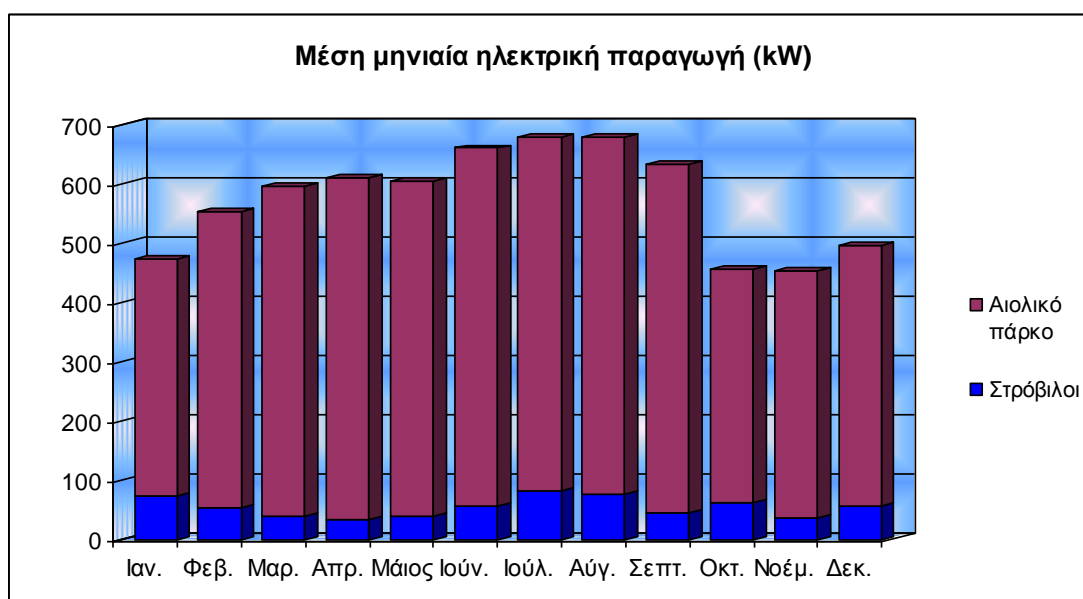
Χρησιμοποιώντας, πλέον, ως δεδομένα την παραγωγή πετρευσμένου αέρα από τους συμπιεστές και την κατανάλωσή του από τους στροβίλους καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, υπολογίζεται το περιεχόμενο της δεξαμενής σε πετρευσμένο αέρα και κατασκευάζεται το διάγραμμα της αποθηκευμένης ποσότητας αέρα συναρτήσεως του φορτίου του οικισμού:



Σχήμα 7.8. Διάγραμμα αποθηκευμένης ποσότητας πετρευσμένου αέρα συναρτήσεως του φορτίου.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πληρότητα της μονάδας αποθήκευσης κατά μεγάλα χρονικά διαστήματα του έτους, τα οποία συνεπάγονται την απόρριψη σημαντικής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε αυξημένα φορτία (καλοκαιρινοί μήνες), η στάθμη της δεξαμενής ελαττώνεται λόγω της εκτόνωσης μεγάλων ποσοτήτων αέρα στους στρόβιλους με σκοπό την κάλυψη του φορτίου σε διαστήματα μειωμένης αιολικής παραγωγής. Τέλος, παρατηρείται ότι η ελάχιστη ποσότητα του περιεχόμενου αέρα στη μονάδα αποθήκευσης είναι τα 384.811,07 kg, τιμή που βρίσκεται πολύ μακριά από τη μηδενική στάθμη. Το γεγονός αυτό προκαλεί ερωτήματα σχετικά με την επιλογή του μεγέθους της δεξαμενής, ωστόσο η χωρητικότητά της επιλέχθηκε ούτως ώστε να αντιστοιχεί σε 33.333,4 kWh και να παρέχει αυτονομία 161 ωρών.

Τέλος, υπολογίσθηκε η μέση μηνιαία συνολική παραγωγή ισχύος κατά τη διάρκεια του έτους και η κατανομή αυτής στο αιολικό πάρκο και τους στρόβιλους αέρα για κάθε μήνα με τα αποτελέσματα των υπολογισμών να φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 7.9. Διάγραμμα μέσης μηνιαίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους.

Η συνολική παραγωγή ενέργειας βρέθηκε ίση με 5.043.225,76 kWh/έτος με το 90,3% της παραπάνω ποσότητας να αντιστοιχεί στην παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο και το 9,7% σε παραγωγή των στρόβιλων. Με την επιλογή του συστήματος αυτού επιτυγχάνεται πλήρης ικανοποίηση του φορτίου στο σύνολο του έτους, ενώ σημαντικό ποσό της παραχθείσας

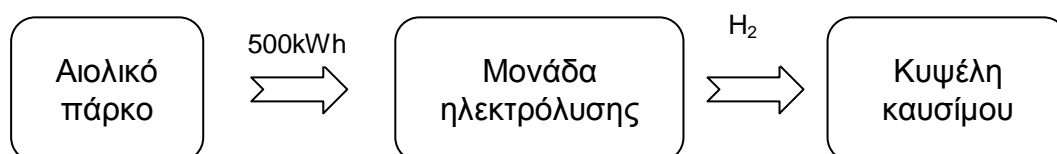
ενέργειας απορρίπτεται λόγω πληρότητας της δεξαμενής πεπιεσμένου αέρα, όπως προέκυψε και από το σχήμα 7.8. Συγκεκριμένα, το ποσό αυτό ανέρχεται στις 1.669.579,2 kWh/έτος και αντιστοιχεί στο 33,1% της συνολικής παραγωγής. Η απορριπτόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου σε ηλεκτρολυτική μονάδα με σκοπό την ικανοποίηση μέρους του ηλεκτρικού φορτίου άλλων οικισμών ή τη χρήση αυτού στον τομέα των μεταφορών ως καύσιμο. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στην παραπάνω ανάλυση δεν ελήφθη υπόψη το έργο που πρέπει να προσδοθεί στις αντλίες για τη συμπίεση του νερού των εναλλακτών. Η απαιτούμενη ενέργεια για τη λειτουργία των αντλιών αντιστοιχεί σε πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας και μπορεί να θεωρηθεί ότι έγινε εκμετάλλευση μέρους της απορριπτόμενης ενέργειας για το σκοπό αυτό.

## 7.2 Σύγκριση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υδρογόνου και πεπιεσμένου αέρα

Στην ενότητα αυτή θα εξετασθούν και θα συγκριθούν ως προς την αποδοτικότητά τους τρία συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου και δύο συστήματα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα (διβάθμιο χωρίς προθέρμανση αέρα και μονοβάθμιο με προθέρμανση αέρα), τα οποία όπως προέκυψε στην πέμπτη ενότητα είναι πιο αποδοτικά τόσο ενεργειακά όσο και εξεργειακά.

### 7.2.1 Βαθμός απόδοσης

Όσον αφορά στο σύστημα αποθήκευσης  $H_2$ , η κατανάλωση της μονάδας ηλεκτρόλυσης βρέθηκε στην ενότητα 6.5.7 ίση με 47 kWh/kg  $H_2$  με την κατανάλωση της κυψέλης καυσίμου να ανέρχεται στα 0,071 kg  $H_2$ /kWh. Εξετάζοντας το σύστημα ως ένα μαύρο κουτί και υποθέτοντας ότι η κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί ακριβώς την ποσότητα υδρογόνου που παράγεται από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης αποθήκευσης της ενέργειας. Συνεπώς, υποθέτοντας ότι σε κάποια ώρα του έτους παρουσιάζεται περίσσεια ενέργειας της τάξεως των 500 kWh, έχουμε:



Σχήμα 7.10. Διάγραμμα ροής συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου.

- παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου:

$$m = \frac{E}{f_{elect.}} = \frac{500kWh}{47 \frac{kWh}{kg}} = 10,64 \text{ kg H}_2$$

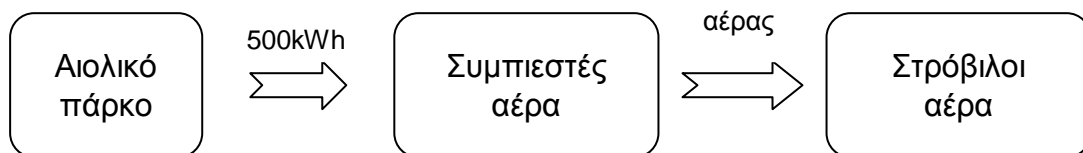
- παραγόμενη ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου:

$$E_{f.c.} = \frac{m}{f_{f.c.}} = \frac{10,64kg}{0,071 \frac{kg}{kWh}} = 149,83kWh$$

- βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας:

$$n_{H_2} = \frac{E_{f.c.}}{E} = \frac{149,83kWh}{500kWh} = 0,2997 = 29,97\%$$

Αναφορικά με το διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση, η κατανάλωση ενέργειας από τους συμπιεστές όπως υπολογίστηκε στην ενότητα 7.1.6 ανέρχεται στις 0,1613 kWh/kg αέρα με την κατανάλωση των στροβίλων να είναι ίση με 18,85 kg αέρα/kWh. Εξετάζοντας το σύστημα ως ένα μαύρο κουτί με την υπόθεση ότι στους στροβίλους καταναλώνεται η παραγόμενη ποσότητα πεπιεσμένου αέρα και λαμβάνοντας υπόψη την απαιτούμενη ενέργεια για τη συμπίεση του νερού των εναλλακτών, θα υπολογισθεί ο βαθμός απόδοσης αποθήκευσης της ενέργειας. Κατά συνέπεια, υποθέτοντας ότι σε κάποια ώρα του έτους παρουσιάζεται περίσσεια ενέργειας της τάξεως των 500 kWh, έχουμε:



Σχήμα 7.11. Διάγραμμα ροής διβάθμιου συστήματος αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση.

- παραγόμενη ποσότητα αέρα:

$$m = \frac{E}{f_{elect.}} = \frac{500kWh}{0,1613 \frac{kWh}{kg}} = 3.100,2 \text{ kg αέρα}$$

- παραγόμενη ενέργεια από τους στροβίλους υψηλής και χαμηλής πίεσης:

$$E_{turb.} = \frac{m}{f_{turb.}} = \frac{3.100,2kg}{18,85 \frac{kg}{kWh}} = 164,44kWh$$

- βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας:

$$n = \frac{E_{turb.}}{E + E_{pump}} = \frac{149,83 kWh}{(500 + 6,475) kWh} = 0,3247 = 32,47\%$$

Τέλος, θα εξετασθεί το μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης αέρα με προθέρμανση, για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του οποίου θα χρησιμοποιηθούν οι εξής σχέσεις:

- υπολογισμός της παραγόμενης ποσότητας πεπιεσμένου αέρα:

$$P_{comp} = P_{el} \cdot n_{el,M} \cdot n_{m,M} \quad (kW)$$

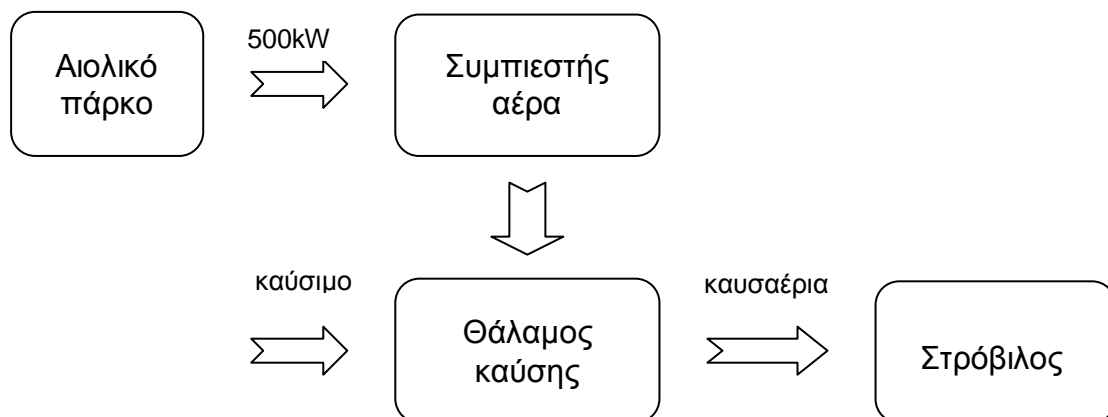
$$\dot{m} = \frac{P_{comp} \cdot n_{m,comp}}{\Delta h} \quad (kg/sec)$$

- υπολογισμός της παραγόμενης ποσότητας πεπιεσμένου αέρα:

$$P_{turb} = \frac{P_{el}}{n_{el,G} \cdot n_{m,G}} \quad (kW)$$

$$\dot{m} = \frac{P_{turb}}{n_{m,turb} \cdot \Delta h} \quad (kg/sec)$$

Εξετάζοντας το σύστημα ως ένα μαύρο κουτί με την υπόθεση ότι στους στροβίλους καταναλώνεται η παραγόμενη ποσότητα πεπιεσμένου αέρα και λαμβάνοντας υπόψη την απαιτούμενη ενέργεια για τη συμπίεση του νερού του εναλλάκτη, θα υπολογισθεί ο βαθμός απόδοσης αποθήκευσης της ενέργειας. Υποθέτοντας, λοιπόν, ότι σε κάποια ώρα του έτους παρουσιάζεται μέση περίσσεια ισχύος της τάξεως των 500 kW, έχουμε:



Σχήμα 7.12. Διάγραμμα ροής μονοβάθμιου συστήματος αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα με προθέρμανση.

- παραγόμενη ποσότητα αέρα:

$$\dot{m} = \frac{P_{el} \cdot n_{el,M} \cdot n_{m,M} \cdot n_{m,comp}}{\Delta h_{comp.}} = \frac{500 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,98 kW}{(657,02 - 20,1) \frac{kJ}{kg}} = 0,75 \frac{kg}{sec} = 2.714,46 \frac{kg}{h}$$

- παραγόμενη ενέργεια από το στρόβιλο:

$$P_{el} = \dot{m} \cdot \Delta h_{turb.} \cdot n_{el,G} \cdot n_{m,G} \cdot n_{m,turb} \quad (kW)$$

$$P_{el.} = 0,75 \frac{kg}{sec} \cdot (1055,4 - 351,78) \frac{kJ}{kg} \cdot 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,99 = 509,58 kW$$

όπου  $\Delta h_{comp.}$  και  $\Delta h_{turb.}$  οι διαφορές ενθαλπίας στο συμπιεστή και το στρόβιλο όπως αυτές υπολογίσθηκαν στην ενότητα 5.3.

- βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας:

$$n = \frac{P_T - Q \cdot n_p}{P_C + P_{pump}} = \frac{(509,58 - 47897 \cdot 0,01198 \cdot 0,4) kW}{(500 + 4,163) kW} = 0,5555 = 55,55\%$$

όπου  $Q$  η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου και  $n_p$  ο θερμικός βαθμός απόδοσης ενός συμβατικού σταθμού παραγωγής ενέργειας, ο οποίος λαμβάνεται προσεγγιστικά ίσος με 0,40. Συγκεκριμένα, στην παραπάνω σχέση, η ποσότητα  $Q \cdot n_p$  παριστά την ηλεκτρική ενέργεια που θα παραγόταν σε περίπτωση που η εν λόγω ποσότητα καυσίμου χρησιμοποιείτο για την παραγωγή ενέργειας σε συμβατικό σταθμό.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των βαθμών απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης αέρα αυτής της ενότητας και των ενότητων 5.2 και 5.3 οφείλονται στο γεγονός ότι ελήφθησαν υπόψη οι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες των κινητήρων και των γεννητριών για λόγους σύγκρισης με το σύστημα υδρογόνου.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για την εξεταζόμενη περίπτωση του οικισμού της Καρπάθου και για τα επιλεχθέντα συστήματα προτιμότερη από πλευράς απόδοσης είναι η εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα. Συγκεκριμένα, το σύστημα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση του αποθηκευμένου αέρα παρουσιάζει βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο κατά 2,5% σε σύγκριση με το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου. Όσον αφορά στο σύστημα με προθέρμανση του αποθηκευμένου αέρα, αυτό βέβαια παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, αλλά προϋποθέτει διαθεσιμότητα της απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου και συνεπάγεται μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος. Για καλύτερη εποπτεία παρατίθεται πίνακας



με τις τιμές του βαθμού απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας για τα παραπάνω συστήματα:

	Σύστημα υδρογόνου	Διβάθμιο σύστημα αέρα χωρίς προθέρμανση	Μονοβάθμιο σύστημα αέρα με προθέρμανση
<b>Βαθμός απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας</b>	29,97%	32,47%	55,55%

### 7.2.2 Στοιχεία κόστους

Σύμφωνα με τα στοιχεία κόστους που δόθηκαν στην τρίτη και την έκτη ενότητα της παρούσας εργασίας για τις συνιστώσες του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου, προέκυψε ο παρακάτω πίνακας όπου παρουσιάζεται η καθαρή παρούσα αξία (NPV) του επενδυτικού σχεδίου και το αντίστοιχο διάγραμμα.

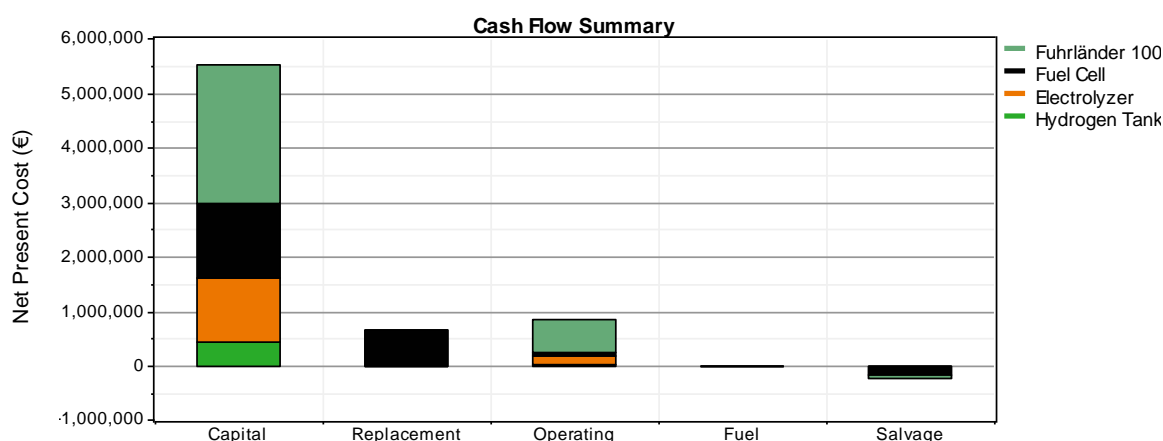
Συνιστώσα	Κόστος επένδυσης (€)	Κόστος Αντικατάστασης (€)	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας (€)	Υπολειμματική αξία (€)	Σύνολο (€)
Α/Γ	2.550.000	0	585.000	-79.500	3.055.500
Κυψέλη καυσίμου	1.350.000	656.500	85.200	-161.400	1.930.300
Μονάδα ηλεκτρόλυσης	1.200.000	0	137.600	0	1.337.600
Μονάδα αποθήκευσης	422.700	0	24.200	0	446.900
Σύστημα	5.522.700	656.500	832.000	-240.900	6.770.300

Η καθαρή παρούσα αξία εκφράζει την αξία σε χρηματικές μονάδες, που προκύπτει από την προεξόφληση στο παρόν όλων των καθαρών

χρηματοροών κάθε έτους (διαφορά των μελλοντικών ταμειακών εισροών και εκροών) για ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα του σχεδίου επένδυσης. Συγκεκριμένα, η NPV υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NPV = \sum_{i=1}^n C_i \cdot (1+i)^{-t},$$

όπου  $i$  το επιτόκιο προεξόφλησης,  $t$  η περίοδος προεξόφλησης και  $n$  το σύνολο των χρονοσειρών ή ροών. [55] Το επιτόκιο προεξόφλησης ελήφθη ίσο με 6% με το χρονικό ορίζοντα της εγκατάστασης να ανέρχεται στα 20 έτη. Ως εκ τούτου, επειδή ο χρήσιμος χρόνος ζωής του αιολικού πάρκου έχει ορισθεί στα 25 χρόνια και η διάρκεια ζωής της κυψέλης καυσίμου στις 40.000 ώρες λειτουργίας, λαμβάνεται υπόψη η υπολειμματική αξία της επένδυσης. Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα που απεικονίζει την καθαρή παρούσα αξία του συστήματος, την οποία και καταμερίζει σε κάθε συνιστώσα και ανάλογα με το είδος του κόστους (κόστος επένδυσης, αντικατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας, καυσίμου και υπολειμματική αξία):



Σχήμα 7.13. Διάγραμμα καθαρής παρούσας αξίας για το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το αρχικό κόστος επένδυσης του συστήματος αποθήκευσης ανέρχεται σε 5.522.700€ με το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας να είναι ίσο με 108.780 €/έτος.

Στα παραπάνω αποτελέσματα εμπεριέχεται σημαντική αβεβαιότητα, και ειδικότερα όσον αφορά στο κόστος συντήρησης και λειτουργίας, καθώς οι επιμέρους συνιστώσες του συστήματος είναι μη ώριμες τεχνολογικά. Παρά το γεγονός ότι οι PEM ηλεκτρολύτες είναι πιο αποτελεσματικοί στην αποτροπή της ανάμιξης των αερίων προϊόντων της ηλεκτρόλυσης, ενώ επιπρόσθετα παρουσιάζουν τη δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλότερες τιμές πυκνότητας ρεύματος και χαρακτηρίζονται από ευκολότερη συντήρηση (αλλαγή

μεμβράνης μετά το πέρας συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος), η χρήση τέτοιου είδους ηλεκτρολυτών απαιτεί υψηλή καθαρότητα του νερού (1μSiemens με 5μSiemens να είναι η απαιτούμενη καθαρότητα του νερού για αλκαλικούς ηλεκτρολύτες) και παρουσιάζει το επιπλέον μειονέκτημα ότι δεν υπάρχει μεγάλη εμπειρία εφαρμογών.

Όσον αφορά στη μονάδα αποθήκευσης, εάν αυτή γίνεται σε αέρια μορφή, απαιτείται τακτική συντήρηση του συμπιεστή με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου διαθεσιμότητας της μονάδας, ενώ η ύπαρξη συμπιεστή επηρεάζει αρνητικά τη διάρκεια ζωής της. Από την άλλη πλευρά, η διάρκεια ζωής των δοχείων αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα διότι μετά από 2.500 ώρες λειτουργία απαιτείται ανατροφοδότηση αυτών με θέρμανση στους 200°C, διαδικασία κατά την οποία η μονάδα δεν είναι διαθέσιμη. Συγκεκριμένα, η διάρκεια ζωής των δοχείων είναι πλήρως εξαρτώμενη από την καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου, καθότι η αποθηκευτική τους ικανότητα ελαττώνεται σημαντικά λόγω παραμονής ρύπων στο εσωτερικό και πλήρωσης των κενών που κατείχε σε προγενέστερο στάδιο το υδρογόνο.

Αναφορικά με την κυψέλη καυσίμου, οι κατασκευαστές κυψελών παρέχουν εγγυήσεις αρκετά μικρής διάρκειας ζωής, ενώ συνήθως είναι η χρήση μπαταριών για την κάλυψη του φορτίου μέχρι η κυψέλη να επιτύχει τη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας της. Επιπλέον, αν και οι κυψέλες καυσίμου δεν περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη με αποτέλεσμα τον περιορισμό του κόστους συντήρησης, η συντήρηση της νέας αυτής τεχνολογίας απαιτεί ειδικά εκπαιδευμένους τεχνικούς και εξειδικευμένα μηχανήματα. Τέλος, άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι ο βαθμός απόδοσης των κυψελών δεν παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους, αλλά μειώνεται κατά την προσέγγιση προς τη χρονική στιγμή της αντικατάστασης της μεμβράνης.

Όσον αφορά στα συστήματα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα, λόγω ελλιπών στοιχείων κόστους, θα εκτελεσθούν κάποιοι προσεγγιστικοί υπολογισμοί σύμφωνα με στοιχεία που αναφέρθηκαν στη θεωρία και συγκεκριμένα στην ενότητα 3.4 με σκοπό να δοθούν κάποιες ενδεικτικές τιμές. Ωστόσο, στους παρακάτω υπολογισμούς εμπεριέχεται σημαντική αβεβαιότητα και αποσκοπούν στην προσεγγιστική εκτίμηση της τάξης μεγέθους του κόστους ενός τέτοιου συστήματος. Συγκεκριμένα, το κόστος επένδυσης για τους συμπιεστές, τους στροβίλους και τις γεννήτριες παραγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος θα ληφθεί όπως δίδεται από τη κατασκευάστρια εταιρεία του T-CAES και ίσο με 2.600 €/kW καθότι το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τη χρήση μηχανών ονομαστικής ισχύος κοντά σε αυτήν που μελετάται. Από την άλλη πλευρά, το κόστος της αποθηκευτικής διάταξης θα

ληφθεί ίσο με 40 €/kWh, τιμή που βρίσκεται μέσα στο εύρος που δίνει η κατασκευάστρια εταιρεία του SCAES. Ο τρόπος αποθήκευσης που προτείνει η εταιρεία αυτή είναι σε υπόγειες σωληνώσεις και προτιμάται από τη διάταξη συστήματος T-CAES καθότι δεν περιέχει ειδικό εξοπλισμό για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας. Τέλος, το κόστος επένδυσης του αιολικού πάρκου θα ληφθεί όπως περιγράφηκε στην ενότητα 6.5.2 και θα ανέρχεται στα 2.550.000 €. Σύμφωνα, λοιπόν με τα παραπάνω, υπολογίζεται το κόστος επένδυσης για το διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης χωρίς προθέρμανση αέρα:

Συνιστώσα	Συμπιεστές	Στρόβιλοι	Γεννήτριες	Αποθηκευτική διάταξη	Α/Γ	Σύνολο
Κόστος επένδυσης (€)	1.820.000	1.170.000	1.170.000	1.330.000	2.550.000	8.040.000

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το κόστος επένδυσης του συστήματος αποθήκευσης αέρα είναι μεγαλύτερο του αντίστοιχου κόστους του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου. Αναφορικά με το κόστος συντήρησης και λειτουργίας μίας τέτοιας εγκατάστασης, δεν διατίθενται επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό.

Κατά τον υπολογισμό του κόστους ενός τέτοιου συστήματος πρέπει να ληφθεί υπόψη το πλεονέκτημα ότι αποτελείται από συνιστώσες τεχνολογικά ώριμες και με πλήθος εφαρμογών στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την ύπαρξη της απαραίτητης τεχνογνωσίας όσον αφορά στον τρόπο συντήρησης του συστήματος. Ωστόσο, η ύπαρξη κινουμένων μερών επιδρά αρνητικά στο κόστος συντήρησης του συστήματος, ενώ η διάταξη κατά της περιόδους συντήρησης τίθεται εκτός διαθεσιμότητας. Επιπλέον, κατά τον υπολογισμό του κόστους επένδυσης πρέπει να συμπεριληφθούν κάποιες πρόσθετες εργασίες πολιτικού μηχανικού που πρέπει να διενεργηθούν για την κατασκευή των υπόγειων σωληνώσεων για την αποθήκευση του αέρα, εκτός και αν γίνει χρήση ήδη υπαρχουσών σωληνώσεων. Τέλος, όσον αφορά στο σύστημα αποθήκευσης με προθέρμανση του αέρα, υπάρχει η επιπλέον επιβάρυνση του κόστους λειτουργίας με το κόστος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Ωστόσο, λόγω της προσθήκης καυσίμου, η ίδια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να παραχθεί με εκτόνωση σχεδόν της μισής ποσότητας πετρευσμένου αέρα σε σχέση με το διβάθμιο σύστημα χωρίς προθέρμανση, γεγονός το οποίο οδηγεί σε επιλογή συμπιεστή χαμηλότερης ονομαστικής ισχύος και αποθηκευτικής διάταξης μικρότερης χωρητικότητας με συνέπεια τη σημαντική μείωση του κόστους επένδυσης για τις συνιστώσες αυτές.

Συνοψίζοντας, ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας που καταγράφει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε συστήματος:

	<b>Σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου</b>	<b>Διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης αέρα χωρίς προθέρμανση</b>	<b>Μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης αέρα με προθέρμανση</b>
Στάδιο ανάπτυξης	Μη ώριμη τεχνολογία	Ώριμη τεχνολογία	Ώριμη τεχνολογία
Κόστος επένδυσης	Ανάγκη για μείωση του κόστους επένδυσης των κυψελών καυσίμου (στόχος 400-750 € / kW) και της αποθήκευσης σε μεταλλικά υδρίδια	Υψηλό κόστος – σε περίπτωση υπόγειας αποθήκευσης σε σωληνώσεις αυξάνεται το κόστος λόγω εργασιών πολιτικού μηχανικού και έργων υποδομής	Μειωμένο κόστος συγκριτικά με το διβάθμιο σύστημα χωρίς προθέρμανση λόγω μικρότερης ονομαστικής ισχύος συμπιεστή και μικρότερης αποθηκευτικής διάταξης
Κόστος συντήρησης και λειτουργίας	Σημαντικά υψηλό (συντήρηση μονάδων και εκπαίδευση ειδικευμένου προσωπικού)	Υψηλό λόγω ύπαρξης κινουμένων μερών	Υψηλότερο συγκριτικά με το διβάθμιο σύστημα χωρίς προθέρμανση λόγω προσαύξησης αυτού κατά το κόστος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου
Χρόνος απόκρισης	Ανάγκη για επίτευξη μικρότερων χρόνων απόκρισης (χρήση μπαταριών για την κάλυψη του φορτίου μέχρι την επίτευξη της βέλτιστης θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης)	Ικανοποιητικός χρόνος απόκρισης	Ικανοποιητικός χρόνος απόκρισης
Βαθμός απόδοσης	Μείωση του βαθμού απόδοσης του συστήματος κατά την προσέγγιση προς το χρονικό σημείο αντικατάστασης των μεμβρανών ή τον καθαρισμό της μονάδας αποθήκευσης	Βαθμός απόδοσης κατά προσέγγιση σταθερός (ανάγκη για αλλαγή φίλτρων αέρα)	Βαθμός απόδοσης κατά προσέγγιση σταθερός (ανάγκη για αλλαγή φίλτρων αέρα και καθαρισμό επικαθίσεων του στροβίλου που προέρχονται από τη χρήση καυσίμου)



## **8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα εργασία έγινε ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση τεσσάρων υπέργειων συστημάτων αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα με σκοπό την εξέταση της συμπεριφοράς αυτών και την εύρεση του βέλτιστου συστήματος χωρίς και με προθέρμανση αέρα. Από τα συστήματα χωρίς προθέρμανση επελέγη το διβάθμιο σύστημα, ενώ από τα συστήματα με καύση συμπληρωματικού καυσίμου κρίθηκε το μονοβάθμιο ως πιο αποδοτικό.

Εν συνεχεία, έγινε προσομοίωση του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου στο υπολογιστικό σύστημα HOMER για τη νήσο Κάρπαθο, από όπου και εξήχθη συμπέρασμα ότι η ικανοποίηση του φορτίου της νήσου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους απαιτεί εγκατάσταση συστημάτων μεγάλου όγκου και κόστους, τα οποία επιπλέον δεν είναι εμπορικά διαθέσιμα. Ως εκ τούτου, εξετάστηκε το πιο ρεαλιστικό σενάριο της ικανοποίησης του φορτίου οικισμού της νήσου με εγκατάσταση συστήματος μικρότερης κλίμακας με το οποίο επετεύχθη πλήρης ικανοποίηση της ζήτησης με παράλληλη απόρριψη μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας.

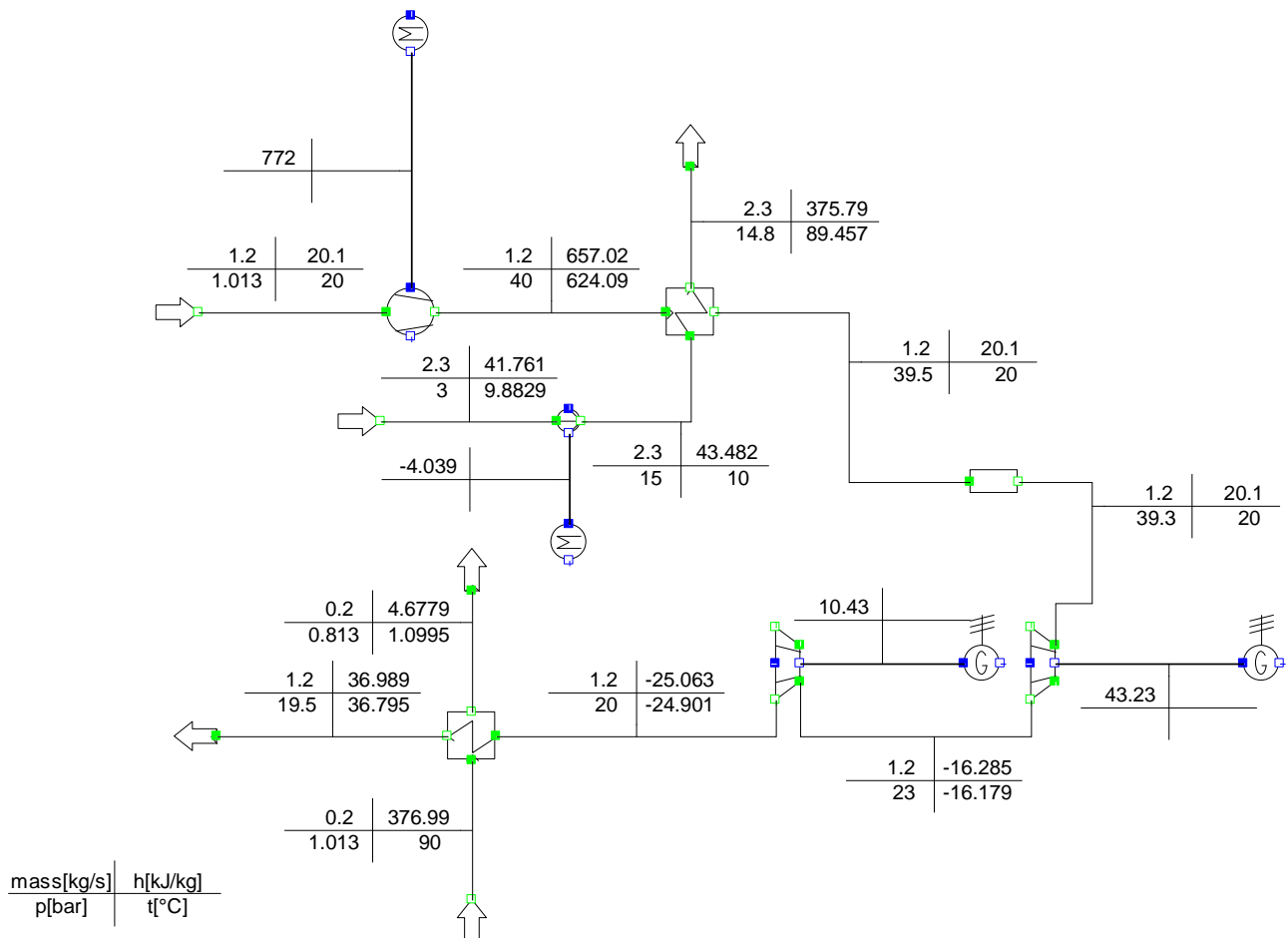
Ακολούθησε δυναμική ανάλυση του συστήματος πεπιεσμένου αέρα με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς αυτού κατά τη διάρκεια του έτους. Ως σύστημα επιλέχθηκε το διβάθμιο χωρίς προθέρμανση αέρα λόγω των υψηλών βαθμών απόδοσης που αυτό παρουσιάζει και της έλλειψης καυσίμου. Από την ανάλυση αυτή βρέθηκαν αποτελέσματα, τα οποία προσεγγίζουν αυτά του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου. Στη συνέχεια συγκρίθηκαν τα συστήματα αποθήκευσης υπό τη μορφή υδρογόνου και πεπιεσμένου αέρα από όπου το διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης αέρα αποδείχθηκε κατά 2,5% πιο αποδοτικό από το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου. Όσον αφορά στο μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης αέρα με προθέρμανση, αυτό υπολογίστηκε ότι είναι σαφώς πιο αποδοτικό, ωστόσο περιλαμβάνει καύση συμπληρωματικού καυσίμου με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους. Τέλος, δόθηκαν κάποιοι ενδεικτικοί υπολογισμοί κόστους για τα συστήματα μέσω των οποίων το κόστος επένδυσης του συστήματος αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα βρέθηκε μεγαλύτερο του αντίστοιχου κόστους του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου, ενώ το σύστημα υδρογόνου ως μη ώριμη τεχνολογικά λύση παρουσιάζει μεγαλύτερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας.



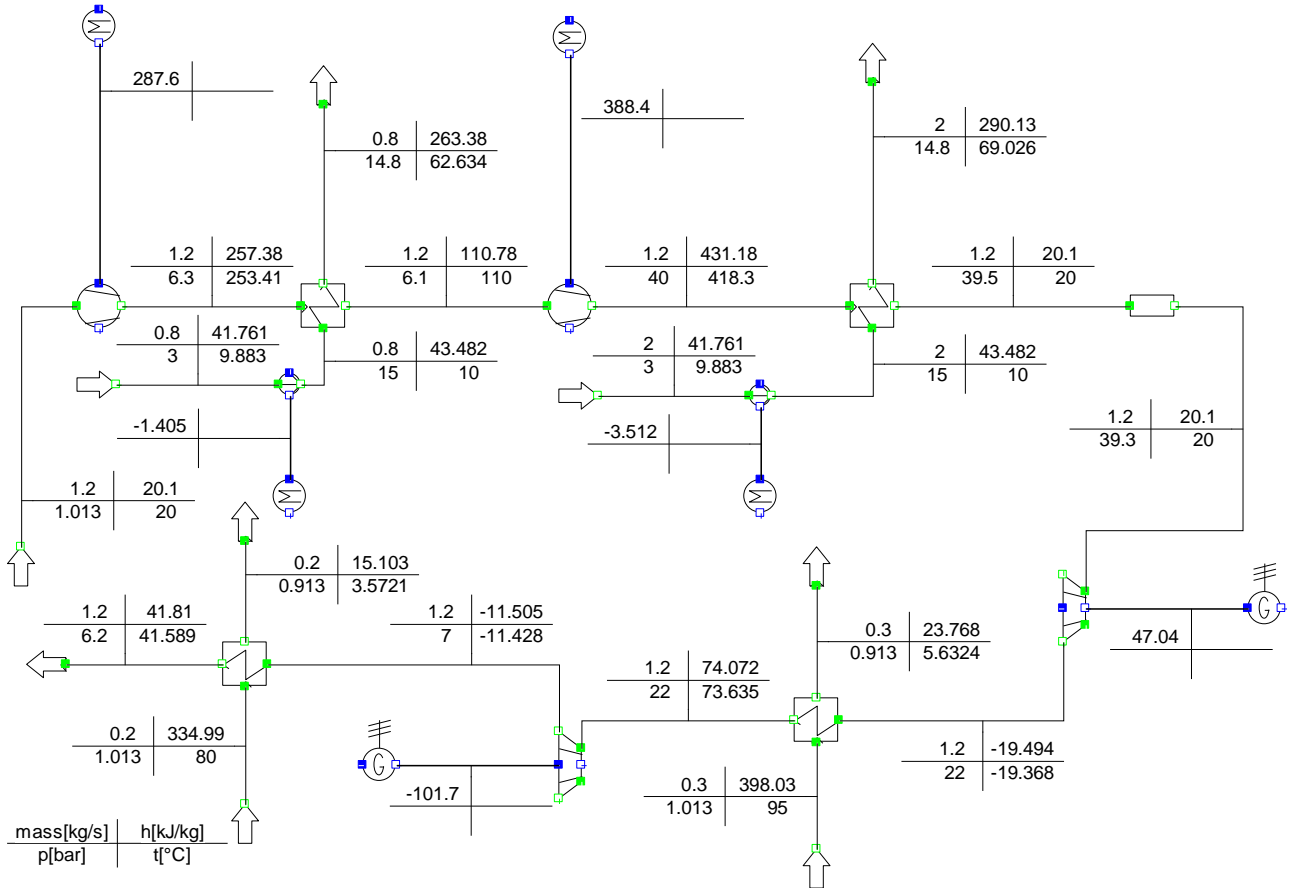


# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

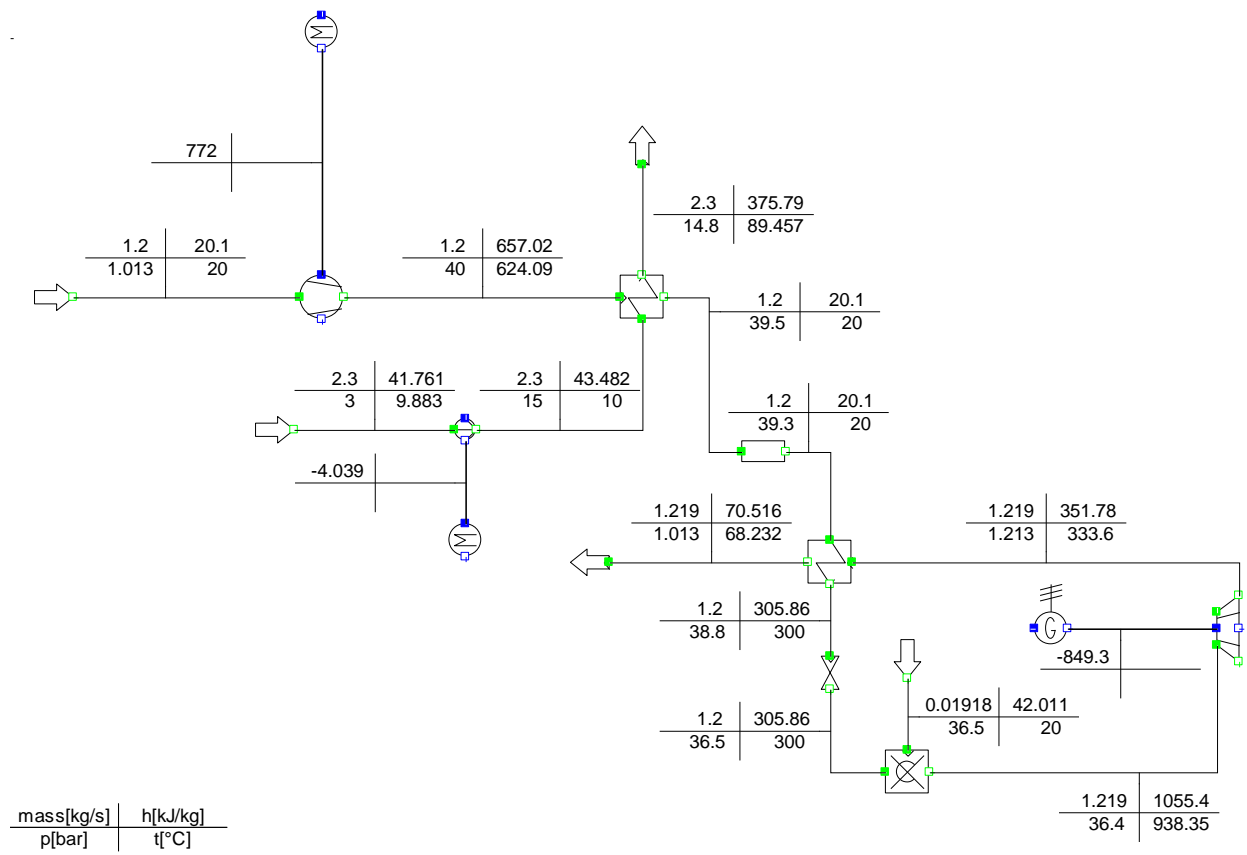
## Π1. Μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση



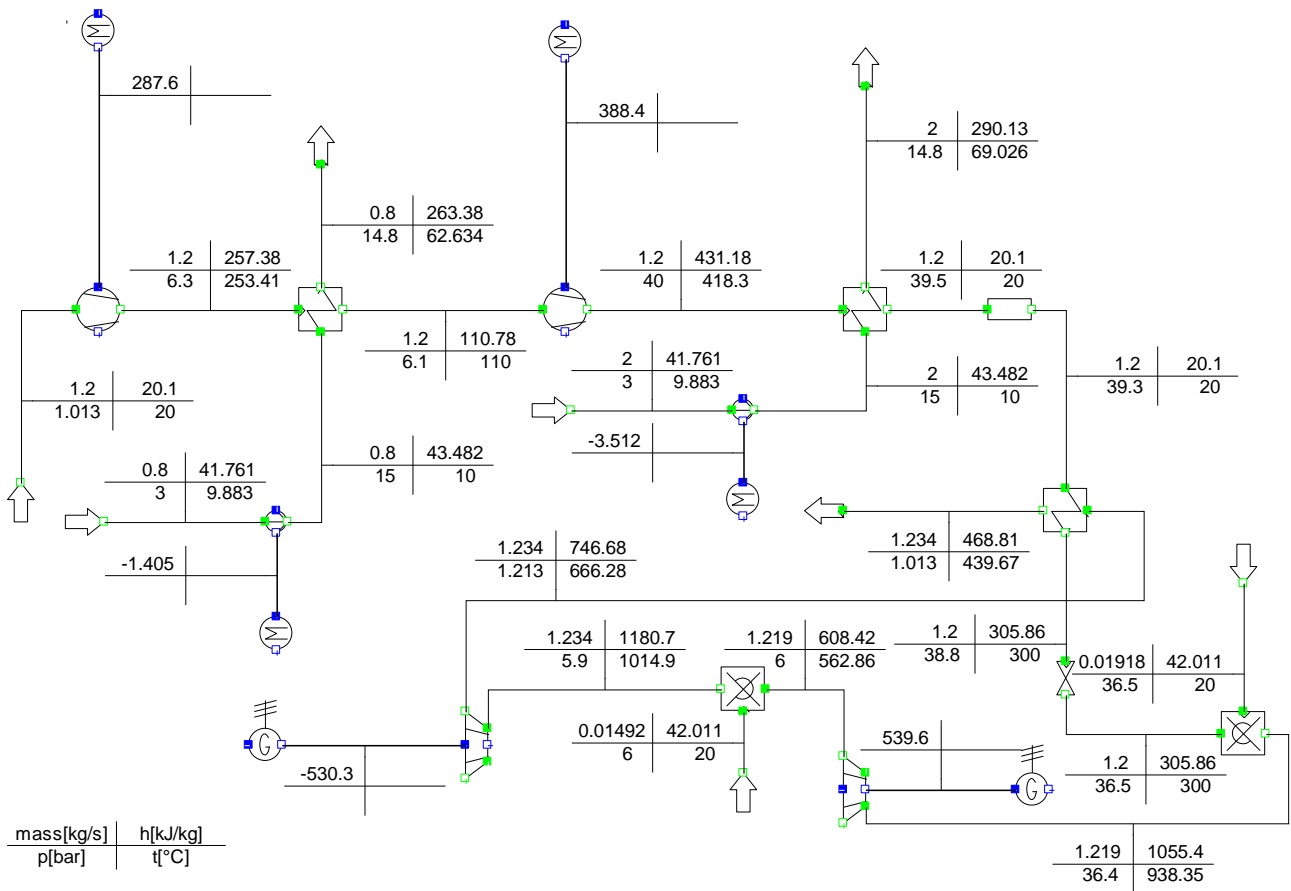
Π2. Διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα χωρίς προθέρμανση



Π3. Μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα με προθέρμανση



Π4. Διβάθμιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα με προθέρμανση



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] [http://www.storiesproject.eu/docs/energystorage\\_greek.pdf](http://www.storiesproject.eu/docs/energystorage_greek.pdf)
- [2] H. Ibrahim, A. Ilinca and J. Perron, Energy storage systems - Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, No. 5, (2008): 1221-1250
- [3] Electricity Storage Association (ESA)  
(<http://www.electricitystorage.org/ESA/technologies/>)
- [4] Meyer F., Integration von regenerativen Stromerzeugern. Druckluft-Speicherkraftwerke, Projektinfo 05/2007
- [5] Nölke M., Compressed Air Energy Storage (CAES) – Eine sinnvolle Ergänzung zur Energieversorgung?, Promotionsvortrag, 20. Oktober 2006
- [6] Zunft S., Diabate und diabate Druckluftspeicherkraftwerke, 5.dena-EnergieForum “Druckluftspeicherkraftwerke”, Berlin 8. September 2005
- [7] Jakiel C., Entwicklung von Großdampfturbinen, Wärmespeichern und Hochtemperatur-Kompressoren für diabate Druckluftspeicherkraftwerke, 5.dena-EnergieForum “Druckluftspeicherkraftwerke”, Berlin 8. September 2005
- [8] Zunft S., Tamme R., Nowi A., Jakiel C., Diabate Druckluftspeicherkraftwerke: Ein Element zur netzkonformen Integration von Windenergie, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 55. Jg. (2005), Heft 7
- [9] Nowi A., Jakiel C., Moser P. Zunft S., Diabate Druckluftspeicherkraftwerke zur netzvertäglichen Windstromintegration, VDI-GET Fachtagung “Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung. Strom- und Wärmeerzeugung. Kommunale und industrielle Energieanwendungen”, Leverkusen, 09.-10. Mai 2006
- [10] Khammas A., Das Buch der Synergie, Teil C, Energiespeichern, Druckluft-Speicher (Pneumatische Speicher)
- [11] Crotagino F., KBB Underground Technologies GmbH, Hannover, Compressed Air Storage, Internationale Konferenz “Energieautonomie durch Speicherung Erneuerbarer Energien”, 30.-31. Oktober 2006
- [12] Kim Y. M., Favrat D., Energy and exergy analysis of a micro-compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system, Energy Vol. 35, No. 1 (2010): 213-220
- [13] EA Techology, Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK, 2004
- [14] Haubrich H. - J., Institut für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Forschungsgesellschaft Energie (FGE), RWTH Aachen, Verbesserte Integration großer Windstrommengen durch Zwischenspeicherung mittels

CAES, Wissenschaftliche Studie gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, Dezember, 2006

[15] Ecofys GmbH, Verbesserte Integration großer Windstrommengen durch Zwischenspeicherung mittels CAES, November, 2006

[16] Sigma-Aldrich Corporation, Hydrogen Storage Materials, Material Matters, Vol. 2, No. 2 (2007)

[17] Sherif S.A., Barbir F., Veziroglu T.N., Wind Energy and the hydrogen economy - review of the technology, Solar Energy, Vol. 78 (2005): 647–660

[18] Lymberopoulos N., Varkaraki E., Zoulias M., Vionis P., Chaviaropoulos P., Agoris D., First steps in Hydrogen production from wind energy in Greece, 2005

[19] Shanzbaatar A., Comparing Hydrogen Storage Methods for Efficient Hydrogen Power Backup Systems, 2007

[20] Cicconardi S. P., Jannelli E., Spazzafumo G, Hydrogen Energy Storage: Preliminary Analysis, International Journal of Hydrogen Energy Vol. 18, No. 11 (1993): 933-940

[21] Zoulias M., Glöckner R., Lymberopoulos N., Vosseler I., Tsoutsos T., Mydske HJ., Brodin M., Taylor P., Market potential analysis for the Introduction of hydrogen energy technology in stand-alone power systems, HSAPS Workshop, Pikermi, 22 January 2004

[22] Lymberopoulos N., Hydrogen Production from Renewables, Project Technical Assistant Framework Contact, Centre for Renewable Energy Sources (C.R.E.S.), September 2005

[23] Ulleberg O., Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28 (2003) 21-33

[24] Utgikar V., Hydrogen Production: Electrolysis of Water, 2006

[25] Organization for Economic Co-operation and Development, International Energy Agency, Prospects for Hydrogen and Fuel Cells, 2005

[26] Barbir F., PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, Solar Energy, Vol. 78 (2005): 661–669

[27] Φούντη Μ., Βουρλιωτάκης Γ., Οικονομία και Τεχνολογία Υδρογόνου - μία εισαγωγή στο πλαίσιο του μαθήματος «Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης», 2007

([http://courseware.mech.ntua.gr/ml22058/pdfs/M12b-Hydrogen\\_Combustion.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml22058/pdfs/M12b-Hydrogen_Combustion.pdf))

- [28] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, Fuel Cells Technologies Program - Hydrogen Storage, Gaseous and Liquid Hydrogen Storage  
(<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/>)
- [29] Züttel A., Materials for Hydrogen Storage, Materials Today, Vol.6, No.9 (2003): 24-33
- [30] Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow, Hydrogen Storage  
([http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/99-00/hybrid\\_PV\\_FC/hydrogenstorage.html](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/99-00/hybrid_PV_FC/hydrogenstorage.html))
- [31] International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE), Hydrogen Storage  
([http://www.iphe.net/docs/Fact\\_Sheets/Hydrogen\\_Storage.pdf](http://www.iphe.net/docs/Fact_Sheets/Hydrogen_Storage.pdf))
- [32] Zhou L., Progress and problems in hydrogen storage methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 9, No. 4 (2005): 395–408
- [33] Liu B.-H., Hydrogen–Metal Systems: Hydride Forming Alloys (Properties and Characteristics, Database Information), Encyclopedia of Materials: Science and Technology: 3953-3969
- [34] Conte M, Proisini P. P., Passerini S, Overview of energy / hydrogen storage: state-of-the-art of the technologies and prospects for nanomaterials, Materials Science and Engineering B, Vol. 108, No. 1-2 (2004): 2-8
- [35] Yang F. S., Wang G. X., Zhang Z. X., Meng X. Y., Rudolph V., Design of the metal hydride reactors - A review on the key technical issues, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 8 (2010): 3832-3840
- [36] Veerraju Ch., Ram Gopal M., Heat and mass transfer studies on elliptical metal hydride tubes and tube banks, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No. 10 (2009): 4340–4350
- [37] Mohan G., Prakash Maiya M., Srinivasa Murthy S., Performance simulation of metal hydride hydrogen storage device with embedded filters and heat exchanger tubes, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.32, No.18 (2007): 4978–4987
- [38] Dehouche Z., Peretti H. A., Yoo Y., Belkacemi K., Goyette J., Catalyzed light hydride nanomaterials embedded in a micro-channels hydrogen storage container, Recent Patents on Nanotechnology, Vol. 3, No. 2 (2009): 116-134
- [39] Meng X. Y., Yang F. S., Wang Y. Q., Deng J. Q., Zhang Z. X., Design and process simulation of a micro-channel chemical heat pump reactor, Proceedings of Chinese chemical engineering machinery conference 2008, Shanghai, China, July 18–22, 2008

- [40] Yartys V. A., Lototsky M., Glöckner R., Tranøy Y., Hydrogen storage and applications - an overview, Internal report - IFE (Institute for Energy Technology), Institute for Energy Technology, 2004
- [41] Institut für Kraftfahrzeuge (IKA), RWTH Aachen University, Large Hydrogen Underground Storage  
([http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Large Hydrogen Underground Storage](http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Large_Hydrogen_Underground_Storage))
- [42] Cleveland C. J., Fuel Cells, The Encyclopedia of Earth, 2006  
([http://www.eoearth.org/article/Fuel cells#Fuel Cell Systems](http://www.eoearth.org/article/Fuel_cells#Fuel_Cell_Systems))
- [43] National Fuel Cell Research Center, University of California, Irvine, What is a fuel cell and how does it work, 2009  
([http://www.nfcrc.uci.edu/2/FUEL\\_CELL\\_INFORMATION/FCexplained/FC\\_howItWorks.aspx](http://www.nfcrc.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_howItWorks.aspx))
- [44] National Fuel Cell Research Center, University of California, Irvine, Fuel Cells Explained, 2009  
([http://www.nfcrc.uci.edu/2/FUEL\\_CELL\\_INFORMATION/FCexplained/FC\\_Comp.aspx](http://www.nfcrc.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_Comp.aspx))
- [45] Yang C., Fuel Cell Fundamentals - Introduction to Fuel Cell Science and Engineering, Institute of Transportation Studies, UC Davis  
(<http://www.its.ucdavis.edu/education/classes/pathwaysclass/5-FuelCells%28Yang%29.pdf>)
- [46] Hi-Energy, E4tech, Element energy, Pure Energy Centre, Stationary and portable fuel cells information resource, Information Resource for Highlands & Islands Enterprise  
(<http://www.hi-energy.org.uk/Downloads/hydrogen/2-Stationary-and-portable-fuel-cells-information-resource.pdf>)
- [47] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, Fuel Cells Technologies Program - Fuel Cells, Types of Fuel Cells  
([http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html))
- [48] National Fuel Cell Research Center, University of California, Irvine, Fuel Cell Types, 2009  
([http://www.nfcrc.uci.edu/2/FUEL\\_CELL\\_INFORMATION/FCexplained/FC\\_Types.aspx](http://www.nfcrc.uci.edu/2/FUEL_CELL_INFORMATION/FCexplained/FC_Types.aspx))
- [49] International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE), Fuel Cells: A Hydrogen Enabling Technology  
([http://www.iphe.net/docs/Fact\\_Sheets/Fuel\\_Cells.pdf](http://www.iphe.net/docs/Fact_Sheets/Fuel_Cells.pdf))



[50] Institut für Kraftfahrzeuge (IKA), RWTH Aachen University, Hydrogen Internal Combustion Engine, 2008

([http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Hydrogen\\_Internal\\_Combustion\\_Engine](http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Hydrogen_Internal_Combustion_Engine))

[51] Gammon R., Roy A., Barton J., Little M., Hydrogen and Renewables Integration (HARI), Centre for Renewable Energy Systems Technology (CREST), Loughborough University, UK, March 2006

[52] Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., Thermal Design and Optimization, 1996

[53] Giatrakos G.P., Tsoutsos T.D., Mouchtaropoulos P.G., Naxakis G.D., Stavrakakis G., Sustainable energy planning based on a stand-alone hybrid renewable energy/hydrogen power system: Application in Karpathos island, Greece, Renewable Energy, Vol. 34, No. 12 (2009): 2562-2570

[54] Monthorst P. E., Costs & Prices, Wind Energy - The Facts, Vol. 2

([http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/WE\\_TF/Facts\\_Volume\\_2.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WE_TF/Facts_Volume_2.pdf)).

[55] Ζερβός Α., Κάραλης Γ., Σημειώσεις αιολικής ενέργειας, 2009