



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"**

***ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ,
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ
Α.Π.Ε.***

Θεόδωρος Ζαρογιάννης

Μεταπτυχιακή Εργασία η οποία υποβάλλεται
για μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
για το Διεπιστημονικό - Διατμηματικό
Δίπλωμα Ειδίκευσης
του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Πολυτεχνείου
"Περιβάλλον και Ανάπτυξη"

Αθήνα, Μάιος 2011

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρ. Κορωναίος

Επιτροπή Παρακολούθησης:

Επισκ. Καθηγητής Χρ. Κορωναίος
Καθηγητής Κ. Κουτσόπουλος
Καθηγητής Δ.. Καλιαμπάκος

**Περιβάλλον
και
Ανάπτυξη**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"**

***ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ,
ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ
Α.Π.Ε.***

Θεόδωρος Ζαρογιάννης

Μεταπτυχιακή Εργασία η οποία υποβάλλεται
για μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
για το Διεπιστημονικό - Διατμηματικό
Δίπλωμα Ειδίκευσης
του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Πολυτεχνείου
"Περιβάλλον και Ανάπτυξη"

Αθήνα, Μάιος 2011

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρ. Κορωναίος

Επιτροπή Παρακολούθησης:

Επισκ. Καθηγητής Χρ. Κορωναίος
Καθηγητής Κ. Κουτσόπουλος
Καθηγητής Δ. Καλιαμπάκος

**Περιβάλλον
και
Ανάπτυξη**

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**«ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ, ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ, ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΑΠΟ ΑΠΕ»**

Θεόδωρος Ζαρογιάννης
Μηχανολόγος Μηχανικός

Η παρούσα διπλωματική εξετάστηκε επιτυχώς.

Η τριμελής επιτροπή

.....
Κων/νος Κουτσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χριστ. Κορωνάιος
Επισκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτρ. Καλιαμπάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας εικόνων	vi
Πίνακας πινάκων.....	ix
Πίνακας σχημάτων.....	xi
Περίληψη	xii
Abstract.....	xiii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές.....	2
1.2 Τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα της αποθήκευσης ενέργειας	3
1.2.1 Μεταφορά ενέργειας	3
1.2.2 Εξοικονόμηση ενέργειας	4
1.2.3 Ευελιξία δικτύου.....	4
2. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	5
2.1 Άντληση και ταμίευση του νερού (Pumped Hydro Storage -PHS)	5
2.2 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage - TES).....	8
2.2.1 Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα	11
2.3 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES)	15
2.3.1 Τεχνολογία με έμβολο	17
2.4 Συνδυασμένη αποθήκευση φυσικού αερίου (Natural Gas Storage - NGS) ..	18
2.5 Αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες ροής (Flow Battery Energy Storage -	19
FBES).....	19
2.5.1 Ιδιότητες των οξειδοαναγωγικών κελιών ροής	20
2.5.2 Οι κυριότεροι τύποι κυψελών ροής οξειδοαναγωγής.....	21
2.5.3 Κυψέλη καυσίμου μικροροής.....	26
2.6 Κυψέλες καυσίμου-αρχή λειτουργίας	27
2.6.1 Βασικοί τύποι κυψελών καυσίμου	31
2.7 Αποθήκευση χημικής ενέργειας.....	34
2.7.1 Μπαταρίες ιόντων λιθίου.....	34
2.7.2 Μπαταρίες λιθίου – πολυμερούς	36
2.7.3 Μπαταρίες μολύβδου – οξέως.....	36
2.7.4 Μπαταρίες νικελίου καδμίου.....	37
2.7.5 Μπαταρίες νικελίου – υδρογονωμένου μετάλλου.....	37
2.7.6 Μπαταρίες Zebra (Νατρίου-χλωριούχου νικελίου).....	38
2.7.7 Μπαταρίες Νατρίου - Θείου	38
2.8 Αποθήκευση ενέργειας μέσω σφονδύλου (Flywheel Energy Storage - FES)	39
2.8.1 Εφαρμογή της τεχνολογίας αποθήκευσης (FES).....	41
2.9 Αποθήκευση ενέργειας μέσω μαγνητικών υπεραγωγών (Superconducting	42
Magnetic Energy Storage - SMES).....	42
2.10 Αποθήκευση ενέργειας μέσω υπερπυκνωτών	43
3. Χαρακτηριστικά τεχνικών αποθήκευσης ενέργειας	49
3.1 Αποθηκευτική ικανότητα	49
3.2 Διαθέσιμη ισχύς	49
3.3 Βάθος αποφόρτισης ή ρυθμός μετάδοσης ενέργειας	49
3.4 Χρόνος αποφόρτισης.....	50
3.5 Αποδοτικότητα	50

3.6	Ανθεκτικότητα	51
3.7	Αυτονομία	51
3.8	Κόστη	52
3.9	Προσαρμοστικότητα στην πηγή ενέργειας	52
3.10	Ενεργειακή πυκνότητα	53
3.11	Αξιοπιστία	53
3.12	Άλλα χαρακτηριστικά.....	53
4.	Σύγκριση των διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.....	54
4.1	Σύγκριση ισχύος σαν συνάρτηση του πεδίου εφαρμογής.....	55
4.2	Σύγκριση ενεργειακής απόδοσης ανά κύκλο	55
4.3	Σύγκριση κόστους επένδυσης	56
4.3.1	Σύγκριση του κόστους επένδυσης ανά κύκλο φόρτισης εκφόρτισης.....	57
4.4	Σύγκριση ενεργειακής πυκνότητας	58
5.	Ανάλυση Κύκλου Ζωής	61
5.1	Στάδια κύκλου ζωής.....	62
5.2	Μεθοδολογία.....	62
5.3	Προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης	62
5.3.1	Ο Σκοπός της μελέτης	63
5.3.2	Το Αντικείμενο της Α.Κ.Ζ.	63
5.4	Η Λειτουργική μονάδα.....	63
5.5	Μοντελοποίηση.....	63
5.5.1	Μονάδα συναρμολόγησης και συναρμολόγησης της μπαταρίας.....	65
5.5.2	Φάση χρήσης	65
5.5.3	Φάση ανακύκλωσης.....	66
5.5.4	Αποτελέσματα	67
5.5.5	Ανάλυση ευαισθησίας	70
5.6	Περιγραφή της Μονάδας Διεργασιών.....	73
5.7	Ανάλυση κύκλου Ζωής PEM.....	74
5.7.1	Εισαγωγή	74
5.7.2	Χαρακτηρισμός συστημάτων	74
5.7.3	Φυσικό αέριο, που καίγεται σε PEM 2 kW _{el}	75
5.7.4	Βιοαέριο, που καίγεται σε PEM 2 kW _{el}	77
5.7.5	Κατασκευή κυψέλης PEM 2 kW.....	78
5.7.6	Κατασκευή σειράς PEM 2 kW	79
5.8	Η ανάλυση κύκλου ζωής ενός SOFC με βάση APU.....	80
5.8.1	Σύστημα παραγωγής.....	81
5.9	Ανάλυση κύκλου ζωής συμπίεστη	87
5.9.1	Λειτουργία ενός δικτύου παροχής συμπιεσμένου αέρα	88
5.10	Ανάλυση κύκλου ζωής υπερπυκνωτή.....	92
5.10.1	Πυκνωτής τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση (Capacitor, film, through-hole mounting).....	93
5.10.2	Πυκνωτής τύπου SMD	94
5.10.3	Πυκνωτής τύπου ηλεκτρολύτη	95
5.10.4	Πυκνωτής τανταλίου ενδιάμεσης οπής	97
6.	ΕΞΕΡΓΕΙΑ.....	99
6.1	Εξεργειακή ανάλυση CTES	100
6.2	Εξεργειακή ανάλυση συστήματος CAES και TES	106
6.3	Εξεργειακή ανάλυση κυψέλης καυσίμου	109
7.	Συμπεράσματα	118
	Βιβλιογραφία.....	122

Παράρτημα.....	126
----------------	-----

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: Διακύμανση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού στη Γαλλία [1]	4
Εικόνα 2: Σύστημα αντλιοσταμείωσης [1]	6
Εικόνα 3: Απαιτητός όγκος νερού για αποθήκευση ενέργειας 6 kWh. [1].....	6
Εικόνα 4: Αποθήκευση θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας με τη βοήθεια στροβίλου [1] ...	10
Εικόνα 5: Η λειτουργία του κλειστού συστήματος προσρόφησης [5]	13
Εικόνα 6: Ανοικτό σύστημα προσρόφησης που χρησιμοποιείται σαν ρυθμιστής σε ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης [5]	14
Εικόνα 7: Το σχηματικό διάγραμμα MCES (Modular Chemical Energy Storage) [5].....	15
Εικόνα 8: Σχηματική παράσταση συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα [1]	16
Εικόνα 9: Σύστημα τεχνολογίας με έμβολο [8]	18
Εικόνα 10: Κυψέλη ροής οξειδοαναγωγής για αποθήκευση ενέργειας [9]	21
Εικόνα 11: Διατάξεις κυψελών μικροροής [11].....	26
Εικόνα 12: Σχηματική απεικόνιση κυψέλης καυσίμου [1]	30
Εικόνα 13: Κυψέλη καυσίμου αλκαλίων [12]	32
Εικόνα 14: Κατανομή των διαφορετικών ηλεκτροχημικών συσσωρευτών ανάλογα με την ενεργειακή πυκνότητα και την ισχύ τους [14]	39
Εικόνα 15: Συσσωρευτές ενέργειας μέσω σφονδύλου [1]	42
Εικόνα 16: Γενικό διάγραμμα SMES συστήματος [3]	43
Εικόνα 17: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός υπερπυκνωτή [22]	45
Εικόνα 18: Διάγραμμα φόρτισης/αποφόρτισης για ένα σύστημα που περιέχει υπερπυκνωτή και 100 κυψέλες [23].....	48
Εικόνα 19: Αποδοτικότητα και κατάσταση λειτουργίας [1]	51
Εικόνα 20: Τομείς εφαρμογής των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ανάλογα με την αποθηκευμένη ενέργεια και την παραγόμενη ισχύ [1].....	53
Εικόνα 21: Δείκτης απόδοσης των εναλλακτικών τεχνολογιών αποθήκευσης για τις τέσσερις κατηγορίες εφαρμογών [1]	54

Εικόνα 22: Κατανομή των τεχνολογιών αποθήκευσης σαν συνάρτηση του τομέα εφαρμογής [1]	55
Εικόνα 23: Κατανομή εναλλακτικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας σαν συνάρτηση της ενεργειακής απόδοσης και της προσδοκώμενης διάρκειας ζωής [1]	56
Εικόνα 24: Κατανομή των τεχνολογιών αποθήκευσης σαν συνάρτηση του κόστους επένδυσης ανά μονάδα ισχύος και ενέργειας	57
Εικόνα 25: Κόστος ανά κύκλο, λαμβάνοντας υπόψη την ανθεκτικότητα και την αποδοτικότητα [1].....	58
Εικόνα 26: Κατανομή των τεχνολογιών αποθήκευσης σαν συνάρτηση της πυκνότητας όγκου και μάζας της αποθηκευμένης ενέργειας για εφαρμογές μικρής κλίμακας [1]	59
Εικόνα 27: Ειδική ενεργειακή και ογκομετρική πυκνότητα για διαφορετικά συστήματα μπαταριών [9]	60
Εικόνα 28: Επιδράσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου των 2 μπαταριών λιθίου-ιόντος. [25]	67
Εικόνα 29: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανάλογα με τα στάδια του κύκλου ζωής μιας 10 kWh μπαταρίας plug-in hybrid electric vehicle (PHEV). [25]	67
Εικόνα 30: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη φάση χρήσης μιας 10 kWh μπαταρίας PHEV. [25]	68
Εικόνα 31: Οι γενικές επιπτώσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μιας kWh 10 μπαταρία PHEV - φάση της παραγωγής [25]	69
Εικόνα 32: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανάλογα με τα στάδια του κύκλου ζωής μιας 10 kWh μπαταρίας PHEV, στην Κίνα. [25].....	70
Εικόνα 33 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανάλογα με τα στάδια του κύκλου ζωής μιας 10 kWh μπαταρίας PHEV, στην Σκανδιναβία. [25]	71
Εικόνα 34 : Διαμορφωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου PEM. [28]	75
Εικόνα 35: Ποσότητες υλικών SOFC [29]	82
Εικόνα 36: Ενέργειες για την κατασκευή SOFC σε ποσοστό επί του συνόλου (MJ/kW) [29] .	82
Εικόνα 37: Υλικά συμπιεστή 4 KW και 300 KW [31]	87
Εικόνα 38: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση [33]	93
Εικόνα 39: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου SMD [33]	94
Εικόνα 40: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη <2 cm σε ύψος [33].....	95

Εικόνα 41: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη >2 cm σε ύψος [33]	96
Εικόνα 42: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου τανταλίου ενδιάμεσης οπής [33]	97
Εικόνα 43: Φόρτιση (αριστερά), αποθήκευση (μέση), αποφόρτιση (δεξιά) [34]	100
Εικόνα 44: Διάγραμμα απόδοσης εξέργειας	105
Εικόνα 45: Αποθηκευμένη ενέργεια ανά μονάδα μάζας δεξαμενής σαν συνάρτηση της αντοχής του υλικού [35]	106
Εικόνα 46: Απόδοση εξέργειας κυψέλης PEM σε μεταβλητή πίεση και θερμοκρασία και τάση $V=0,5V$ [37]	111
Εικόνα 47: Απόδοση εξέργειας κυψέλης PEM σε τάση $V=0,5V$ και $V=0,6 V$ [37]	111
Εικόνα 48: Απόδοση εξέργειας κυψέλης PEM σε διαφορετικό λόγο αέρα λ [37]	112
Εικόνα 49: διάγραμμα ισοζυγίου εξέργειας ενός κελιού καυσίμου τύπου PEM [36]	113
Εικόνα 50: Απόδοση, καταστροφή εξέργειας και επιθυμητό ηλεκτρικό ρεύμα. [36]	117
Εικόνα 51: Μεταβολή του λόγου των αποβαλλόμενων εξεργειών και την εξεργειακή απόδοση σε συνάρτηση με την πυκνότητα ρεύματος [37]	117

Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1: Συστήματα αντλησιοταμίευσης στο Ηνωμένο Βασίλειο [2].....	7
Πίνακας 2: Υδροστρόβιλοι και αντίστοιχο n_s [3].....	8
Πίνακας 3: Σύγκριση μεταξύ διαφόρων υλικών αποθήκευσης της θερμότητας [4]	9
Πίνακας 4: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες υλοποίησης [5].....	12
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά κυριότερων τύπων κυψελών ροής οξειδοαναγωγής [9]	25
Πίνακας 6: Τα μετρημένα χαρακτηριστικά απόδοσης της κυψέλης καυσίμου μικροροής [11]	27
Πίνακας 7: Επιδόσεις μπαταριών [17].....	38
Πίνακας 8: Ιδιότητες μετάλλων και σύνθετων υλικών [20]	40
Πίνακας 9: Συγκρίσεις πυκνωτών και υπερπυκνωτών [32]	45
Πίνακας 10: Βάρος των υλικών [25]	64
Πίνακας 11: Σχέση μεταξύ των επιδράσεων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από τις απώλειες λόγω της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας σε σχέση με αυτές λόγω του βάρους της μπαταρίας για την Δυτική Ευρώπη, την Σκανδιναβία και την Κίνα. [25]	71
Πίνακας 12: Σχέση μεταξύ των επιδράσεων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από τις απώλειες λόγω της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας έναντι λόγω του βάρους της μπαταρίας για διαφορετικές υποθέσεις βάρους-ενέργειας στη Δυτική Ευρώπη [25].....	71
Πίνακας 13: Ηλεκτρικές , θερμικές αποδόσεις και απώλειες [28]	75
Πίνακας 14: Εξοπλισμός και συντήρηση κυψέλης PEM που λειτουργεί με φυσικό αέριο [28]	76
Πίνακας 15: Πολλαπλά αποτελέσματα φυσικού αερίου που καίγεται σε PEM 2 kW[28]	76
Πίνακας 16: Πολλαπλά αποτελέσματα βιοαερίου που καίγεται σε PEM 2 kW[28].....	77
Πίνακας 17: Πρώτες ύλες, ενέργεια και απαιτήσεις κατασκευής της κυψέλης PEM 2 kW [28]	78
Πίνακας 18: Πρώτες ύλες, ενέργεια και απαιτήσεις κατασκευής σειράς κυψέλης PEM 2 kW [28]	79
Πίνακας 19: Συντήρηση συστήματος κυψέλης PEM 2 kW [28].....	80
Πίνακας 20: Συνολικές αέριες εκπομπές κύκλου ζωής από την κατασκευή ενός συστήματος SOFC 5 kW [29].....	83

Πίνακας 21: Συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής στο νερό από την κατασκευή ενός συστήματος SOFC 5 kW [29]	83
Πίνακας 22 : Συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής τους στο έδαφος από την κατασκευή ενός συστήματος SOFC 5 kW.....	84
Πίνακας 23: Υπολογισμός συμπιεσμένου αέρα που παράγεται από μια ενιαία μονάδα του συμπιεστή [31]	87
Πίνακας 24: Οικονομικά ανεκτό ποσοστό διαρροής [31]	88
Πίνακας 25: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και ποσοστό διαρροής που χρησιμοποιείται για τις εγκαταστάσεις συμπιεσμένου αέρα >30kW [31].....	88
Πίνακας 26: Δεδομένα για συμπιεστή αέρα τύπου screw-type [31].....	89
Πίνακας 27: Δεδομένα συμπιεστή, μέσης παραγωγής >30 kW στον συμπιεστή [31].....	89
Πίνακας 28: Δεδομένα συμπιεστή, βελτιστοποιημένης παραγωγής >30 kW στον συμπιεστή [31].....	89
Πίνακας 29: Δεδομένα συμπιεστή, βέλτιστης παραγωγής >30 kW στον συμπιεστή [31].....	90
Πίνακας 30: Δεδομένα μέσης εγκατάστασης >30 kW παροχής δικτύου [31].....	90
Πίνακας 31: Δεδομένα βελτιστοποιημένης εγκατάστασης >30 kW παροχής δικτύου [31]	90
Πίνακας 32: Δεδομένα βέλτιστης εγκατάστασης >30 kW παροχής δικτύου [31]	91
Πίνακας 33: Δεδομένα παραγωγής πυκνωτή [33]	92
Πίνακας 34: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση [33].....	94
Πίνακας 35: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου SMD [33]	95
Πίνακας 36: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη <2 cm σε ύψος[33]	96
Πίνακας 37: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη >2 cm σε ύψος[33]	97
Πίνακας 38: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου τανταλίου ενδιάμεσης οπής (capacitor tantalum through- hole mounting) [33]	98
Πίνακας 39: Πίνακας δεδομένων [34].....	104
Πίνακας 40: Αποτελέσματα ενεργείας και εξέργειας [34]	104
Πίνακας 41: Ιδιότητες και τιμές κανονικών συνθηκών [37]	110
Πίνακας 42: Χημική εξέργεια και ρυθμός ροής μάζας στην τάση V=0,5V και V=0,6V σε αντιδρώντα και προϊόντα [37]	112
Πίνακας 43: Περίληψη των υλικών συμπιεστή 4 KW και 300 KW [31]	126

Πίνακας 44: Προσδιορισμός υλικών πυκνωτή τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση [32]	126
Πίνακας 45: Προσδιορισμός υλικών πυκνωτή τύπου SMD [32].....	127
Πίνακας 46: Προσδιορισμός υλικών πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη [32].....	127
Πίνακας 47: Προσδιορισμός υλικών πυκνωτή τύπου τανταλίου [32]	128

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1: Ενέργεια για τα στάδια της παραγωγής μπαταρίας Li-ιόντος [26].....	71
Σχήμα 2: Διάγραμμα κατασκευής PEN(positive- electrolyte-negative) και διασύνδεσης για SOFC [25].....	80
Σχήμα 3: Διάγραμμα κατασκευής SOFC- 24 kW [30].....	85

Περίληψη

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει παρουσιάσει αξιοπρόσεκτη αύξηση παγκοσμίως. Μπορεί σπάνια όμως να ανταποκριθεί άμεσα στις απαιτήσεις των καταναλωτών και στις αιχμές των φορτίων μιας και η ενέργεια που παράγεται δεν είναι σταθερή. Το πρόβλημα σταθερότητας φορτίων των δικτύων απαιτεί την ενεργειακή αποθήκευση, χρησιμοποιώντας γενικά τις μπαταρίες μολύβδου, οι οποίες όμως δεν μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε μικρό όγκο.

Γι' αυτό αναπτύσσονται και εφαρμόζονται άλλοι τύποι τεχνολογιών αποθήκευσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μεθόδων αποθήκευσης, μερικοί από τους οποίους είναι ήδη σε λειτουργία, ενώ άλλοι είναι ακόμα στην ανάπτυξη. Τέτοιες είναι η αντλησιοταμίευση, η μέθοδος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, η μέθοδος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, η αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες ροής, οι κυψέλες καυσίμου, η αποθήκευση χημικής ενέργειας, η αποθήκευση ενέργειας μέσω σφονδύλου, η αποθήκευση ενέργειας μέσω μαγνητικών υπεραγωγών και μέσω υπερπυκνωτών.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά των διαφορετικών τεχνικών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και του τομέα εφαρμογής τους (αποδοτικότητα, ανθεκτικότητα, αυτονομία, διαθέσιμη ισχύς, αποθηκευτική ικανότητα, ενεργειακή πυκνότητα). Αυτά τα χαρακτηριστικά θα χρησιμεύσουν για να γίνουν οι συγκρίσεις προκειμένου να καθοριστεί η πιο κατάλληλη τεχνική για κάθε τύπο εφαρμογής.

Ακολούθως γίνεται λόγος για την ανάλυση κύκλου ζωής, τα στάδιά της, τη μεθοδολογία της και αναλύονται η μπαταρία ιόντος λιθίου, η κυψέλη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell PEMFC) και κυψέλη στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell SOFC), ένας συμπιεστής και ακολουθεί η ανάλυση κύκλου ζωής υπερπυκνωτή.

Παρουσιάζεται στη συνέχεια η εξέργεια και γίνεται εξεργειακή ανάλυση συστήματος αποθήκευσης κρύας θερμικής ενέργειας, συστήματος συμπιεσμένου αέρα και θερμικής ενέργειας και ανάλυση κυψέλης καυσίμου. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν και γίνονται οι ανάλογες προτάσεις.

Abstract

Electricity produced from renewable sources has shown remarkable growth worldwide. However, these sources can rarely provide immediate response to consumer's demand and peak loads as the produced energy is intermittent. Thus, the electrical network load stability problem requires energy storage, generally via the use of lead batteries, which cannot store large amounts of energy in a small volume .

Various types of storage technologies are being developed and implemented in order to overcome the main disadvantage of lead batteries, some of which are already in use, while others are still in development. Such methods are the pumped hydro storage, the thermal energy storage, the compressed air energy storage, the energy storage through flow batteries, the fuel cells, the storage of chemical energy, the flywheel energy storage, the superconducting magnetic energy storage and the energy storage via the use of supercapacitors.

In addition, the main characteristics of the different electricity storage techniques and their field of application are discussed with regards to their efficiency, robustness, autonomy, available power, storage capacity as well as their energy density. These characteristics will be assessed in order to make comparisons for the determination of the most appropriate technique for each type of application.

Moreover, the basic stages and the methodology of a complete Life Cycle Analysis (LCA) are presented. For a better understanding, the LCA of a lithium-ion battery, a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), a compressor and a supercapacitor are demonstrated.

The next section of the specific study includes a fundamental investigation of exergy, where an exergetic analysis of a cold thermal energy storage system, a Compressed Air Energy Storage (CAES) system, a Thermal Energy Storage (TES) system and a fuel cell system are presented. Finally, the conclusions of the study as well as the relevant proposals are summarized.

1. Εισαγωγή

Σήμερα, η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί το 12% της συνολικής ενέργειας, ένα ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί μέσα στα επόμενα χρόνια, και προβλέπεται να φτάσει έως και το 34% για το έτος 2025. Όταν δε ληφθεί υπόψιν ότι είναι απαραίτητη η πραγματική ανάπτυξη για την βελτίωση της ζωής του ανθρώπου σε μεγαλύτερους πληθυσμούς και ότι για την πραγματοποίηση της απαιτούνται σαν προοπτική και μάλιστα άμεσα μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται επιτακτική ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας μεγαλύτερων ποσοτήτων με κατάλληλα χαρακτηριστικά.

Στην παρούσα ενεργειακή κατάσταση, η ηλεκτροπαραγωγή επικεντρώνεται σε μεγάλα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια τα οποία βρίσκονται συχνά σε μεγάλη απόσταση από τον καταναλωτή. Η εξισορρόπηση των φορτίων βασίζεται πρωταρχικά στην πρόβλεψη των ημερήσιων και εποχιακών αναγκών καθώς επίσης και στην συνεισφορά άλλων πηγών όπως είναι τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, όταν η κύρια παραγωγή δεν επαρκεί για την κάλυψη των αιχμών της ζήτησης χρησιμοποιώντας αποθηκευμένη ενέργεια με μορφή της υδραυλικής ενέργειας του αποθηκευμένου νερού.

Η εισαγωγή στο σύστημα ανανεώσιμων πηγών όπως είναι η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, εντείνουν την δύσκολη πρόκληση της σταθεροποίησης των δικτύων ηλεκτροδότησης, κυρίως εξαιτίας της αδυναμίας εξισορρόπησης μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης. Συνεπώς, είναι προτιμότερη η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, η μεταφορά, η μετατροπή καθώς και η αποθήκευση της αν υπάρξει ανάγκη. Επομένως, η ανάγκη αποθήκευσης της ενέργειας γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική. Από την άλλη μεριά, η ηλεκτρική ενέργεια εμφανίζει δυσκολίες όσον αφορά στην αποθήκευσή της, απαιτώντας ογκώδη και ακριβό εξοπλισμό.

Το 2007 η αποθηκευμένη ισχύς σε παγκόσμιο επίπεδο ανερχόταν σε μόλις 90 GW ηλεκτρικής ενέργειας από τα συνολικά παραγόμενα 3400 GW, ή σε ποσοστό περίπου 2,6%.

Ωστόσο, η ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων με υψηλή απόδοση και μικρό κόστος, ικανών να διαχειριστούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, έχει αλλάξει άρδην την κατάσταση που επικρατούσε. Μπορεί πλέον να βεβαιώσει κανείς ότι η ηλεκτρική ισχύς μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί, ακόμη και με έμμεσο τρόπο. Εντούτοις, αυτό απαιτεί τη διατήρηση των κοστών επένδυσης και λειτουργίας σε αποδεκτά επίπεδα, λαμβάνοντας υπόψη και τα περιβαλλοντικά ζητήματα.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια επισκόπηση των διαθέσιμων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Αρχικά γίνεται μια συσχέτιση της αποθήκευσης ενέργειας με

τις ανανεώσιμες πηγές, ενώ ακολουθεί ανάλυση των οικονομικοτεχνικών πλεονεκτημάτων της. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα μια αναφορά και συνοπτική επεξήγηση των εναλλακτικών τεχνολογιών αποθήκευσης και αφού παρατεθούν τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αυτών, η εργασία συνεχίζεται με μια σύγκριση μεταξύ των διαθέσιμων μεθόδων αποθήκευσης. Ακολουθεί αναφορά στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής που αποτελεί ένα εργαλείο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, μια διεργασία ή μια δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν η μπαταρία ιόντος λιθίου, η κυψέλη ανταλλαγής πρωτονίων, η κυψέλη στερεών οξειδίων, ένας συμπίεστης και ο υπερπυκνωτής. Για τα υπόλοιπα δεν βρεθήκαν αξιόλογες βιβλιογραφικές αναφορές. Για την ολοκλήρωση της εργασίας θεωρήθηκε σκόπιμο να αναλυθούν ορισμένα συστήματα και εξεργειακά, ώστε να γίνει αντιληπτή η χρησιμότητα της εξέργειας αλλά και το ωφέλιμο του έργου που τελικά δίνουν.

1.1 Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές

Η ανάπτυξη και χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχει εμφανίσει σημαντική αύξηση μέσα στα τελευταία χρόνια.

Η αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρισμού από ανανεώσιμες πηγές αποφέρει ικανοποίηση της ζήτησης με αξιοπιστία και με τον ελάχιστο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Εντούτοις, η απρόβλεπτη φύση των συγκεκριμένων ενεργειακών πηγών απαιτεί την ρύθμιση των απαραίτητων συστημάτων ελέγχου διανομής και χρήσης της ισχύος.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οι διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος και οι διαφορές μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης. Ωστόσο, ολοένα και περισσότερες τεχνολογίες μετατροπής και αποθήκευσης της ενέργειας αναπτύσσονται και βελτιστοποιούνται για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Συνεπώς, η συνεισφορά των εναλλακτικών τεχνολογιών αποθήκευσης της ενέργειας στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η εξεύρεση μεθόδων εξέλιξης και βελτίωσης της απόδοσης των τεχνολογιών αυτών, καθώς και η εκπόνηση μελετών με σκοπό την ανάπτυξη καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης, κρίνεται απαραίτητη για την

αποδοτική λειτουργία των διατάξεων εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια είναι ίσως η σημαντικότερη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη ισχύς, όμως, των διασυνδεδεμένων και μη αιολικών πάρκων παρουσιάζει έντονες και ξαφνικές διακυμάνσεις που οφείλονται στην μεταβαλλόμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

Οι διακυμάνσεις της παραγομένης ισχύος των στροβίλων ανέμου επιδεινώνουν το πρόβλημα που σχετίζεται με την ενσωμάτωση ενός μεγάλου πλήθους στροβίλων στα δίκτυα ηλεκτροδότησης, καθιστώντας δύσκολο τον έλεγχο της συνεισφοράς τους στην παραγωγή ισχύος κάνοντας για αυτό την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επιτακτική ανάγκη.

1.2 Τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα της αποθήκευσης ενέργειας

Παρακάτω περιγράφονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα τα οποία καθιστούν την αποθήκευση της ενέργειας αξιοσημείωτο εγχείρημα.

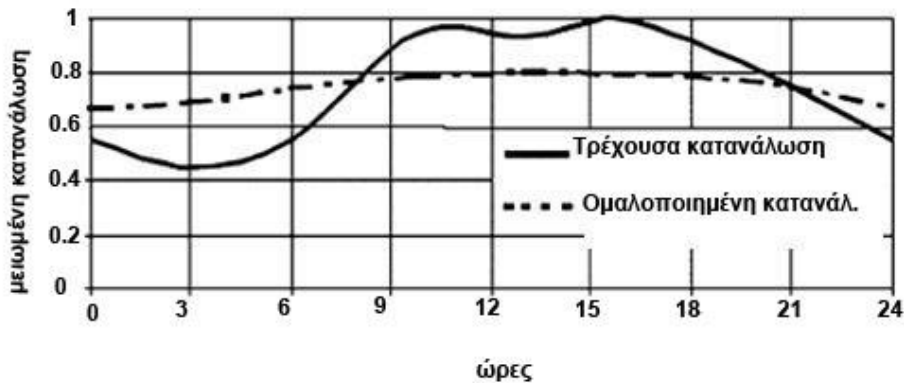
1.2.1 Μεταφορά ενέργειας

Η ενδιάμεση ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το μετασχηματισμό πρωτογενούς ενέργειας χαμηλού κόστους καθώς και η μετέπειτα χρησιμοποίησή της όποτε υπάρχει αυξημένη απαίτηση, είναι δυνατό να αντικαταστήσει την ακριβή ενέργεια που παράγεται από τους σταθμούς που μπαίνουν σε λειτουργία για την αναπλήρωση των αιχμών του φορτίου. Υπάρχουν δύο μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος για τους οποίους η αποθήκευση παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο:

- Η συμβατική παραγωγή ενέργειας, η αποθήκευση της οποίας θα είναι σε θέση να αποζημιώσει για τις προσωρινές ενεργειακές απώλειες της μονάδας παραγωγής καθώς και να εκπληρώσει την εμπορική υποχρέωση του προπληρωμένου ενεργειακού αποθέματος, με άμεση συνέπεια την αποφυγή ποινών.
- Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η αποθήκευση της οποίας συντελεί στην αντιμετώπιση του προβλήματος της απρόβλεπτης φύσης των συγκεκριμένων πηγών. [1]

1.2.2 Εξοικονόμηση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας από τους χρήστες χαρακτηρίζεται από διαφορές και διακυμάνσεις, υπό την έννοια ότι η ελάχιστη κατανάλωση κυμαίνεται περίπου στο μισό των αιχμών της ζήτησης. Στην εικόνα 1 παρατίθεται ενδεικτικά η διακύμανση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού στη Γαλλία, όπου παρατηρεί κανείς την μεγάλη αυξομείωση κατά τη διάρκεια της ημέρας.[1]



Εικόνα 1: Διακύμανση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού στη Γαλλία [1]

Η ενεργειακή απαίτηση του τελικού χρήστη, αναφορικά με το λόγο μεταξύ της μέγιστης και της μέσης ισχύος, συχνά παίρνει την τιμή του 10. Αυτό οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση του εξοπλισμού παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας, ο οποίος σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη τις αιχμές του φορτίου και όχι την μέση ημερησία κατανάλωση. Σε αυτό το σημείο εμφανίζεται η ανάγκη αποθήκευσης της ενέργειας.

1.2.3 Ευελιξία δικτύου

Η ευελιξία των συστημάτων αποθήκευσης και ανάκτησης της ενέργειας συντελεί στην άμεση απόκριση και κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Η αδυναμία εξισορρόπησης του δικτύου μπορεί να προκληθεί από προσωρινό έλλειμμα ενέργειας, το οποίο είναι εφικτό να προβλεφθεί. Επίσης, τυχούσες βλάβες της παραγωγικής μονάδας μπορούν να οδηγήσουν σε αδυναμία κάλυψης της ζήτησης. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό γιατί τα τελικά οφέλη που προκύπτουν από τα συστήματα αποθήκευσης απαιτείται να διασφαλίσουν την ανταπόδοση του κόστους της ακόλουθης διπλής αλυσίδας:

Ηλεκτρική ενέργεια \Rightarrow Αποθηκευμένη ενδιάμεση ενέργεια \Rightarrow Ηλεκτρική ενέργεια [1]

2. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια, προκειμένου να αποθηκευτεί, πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε μια άλλη μορφή ενέργειας, για παράδειγμα σε μηχανική, θερμική ή χημική, η οποία θα μετασχηματιστεί και πάλι σε ηλεκτρισμό όταν απαιτηθεί. Οι εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης που εφαρμόζονται είναι ποικίλες, ωστόσο μια συγκριτική μελέτη αυτών αποτελεί δύσκολο εγχείρημα λόγω των διαφορετικών επιπέδων εξέλιξης της κάθε μιας.

Οι τεχνικές αποθήκευσης ενέργειας χωρίζονται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες ανάλογα τις εφαρμογές τους:

1. Μικρής ισχύος εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές, κυρίως για την τροφοδοσία διατάξεων μετατροπής της ενέργειας
2. Μεσαίας ισχύος εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές (αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού, παροχή ηλεκτρισμού σε πόλεις).
3. Εφαρμογές σύνδεσης στο δίκτυο για τον έλεγχο των αιχμών του φορτίου.
4. Εφαρμογές ελέγχου της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος.[1]

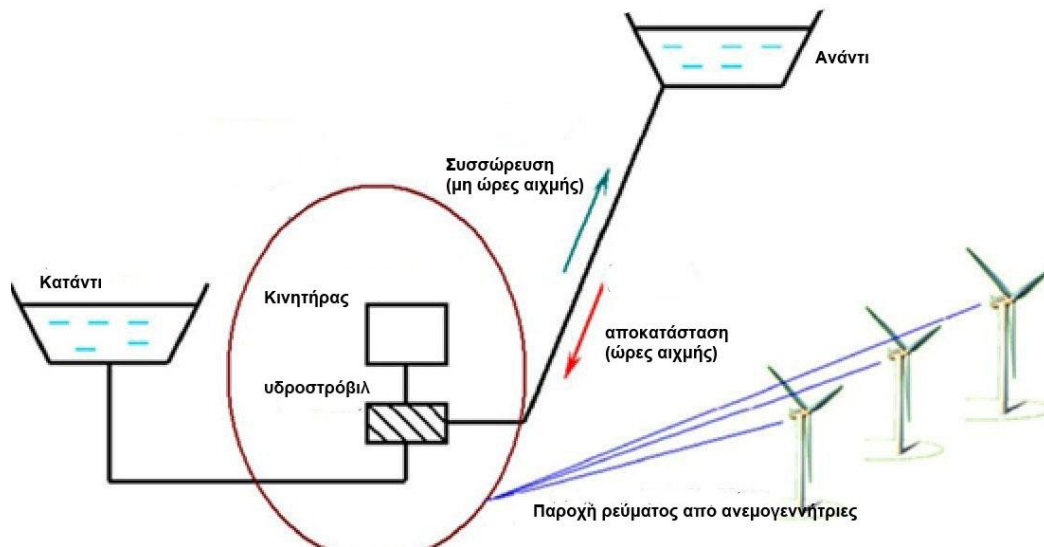
Οι δύο πρώτες κατηγορίες αφορούν συστήματα μικρής κλίμακας, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται ως κινητική ενέργεια (σφόνδυλοι), χημική ενέργεια, καθώς και μέσω συμπιεσμένου αέρα, υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου), ή ακόμα και σε υπερπυκνωτές και υπεραγωγούς. Οι δύο τελευταίες κατηγορίες αφορούν συστήματα μεγάλης κλίμακας, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται σαν ενέργεια λόγω βαρύτητας (υδραυλικά συστήματα), θερμική ενέργεια (αισθητή, λανθάνουσα), χημική ενέργεια (συσσωρευτές, μπαταρίες) ή μέσω συμπιεσμένου αέρα (σε συνδυασμό με αποθήκευση φυσικού αερίου).

2.1 Άντληση και ταμίευση του νερού (Pumped Hydro Storage - PHS)

Το βασικότερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι το γεγονός ότι είναι άμεσα διαθέσιμη. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο αποθήκευσης για εφαρμογές μεγάλης ισχύος.

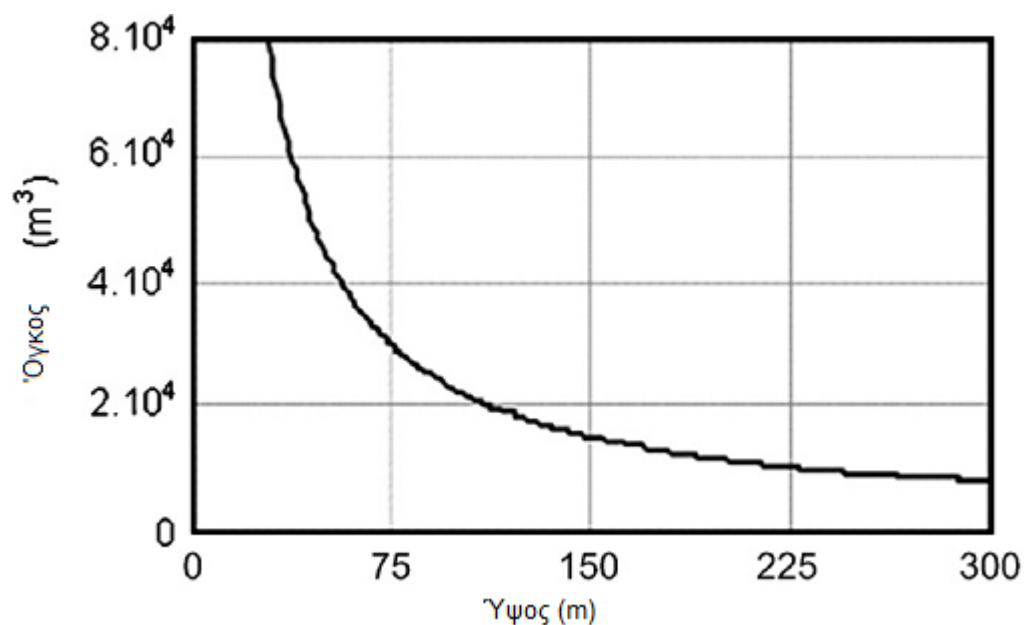
Η βασική αρχή λειτουργίας του εν λόγω συστήματος είναι η εξής: κατά τις περιόδους που η ενεργειακή ζήτηση είναι χαμηλή, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για την άντληση του νερού από μια χαμηλότερη σε μια υψηλότερα τοποθετημένη δεξαμενή. Όταν η ζήτηση είναι πολύ υψηλή, το νερό οδηγείται στους

υδροτροβίλους του σταθμού οι οποίοι παράγουν υψηλής ποιότητας ηλεκτρική ισχύ για τις ώρες αιχμής.



Εικόνα 2: Σύστημα αντλιοσταμείωσης [1]

Τα συστήματα αντλιοσταμείωσης εμφανίζουν βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται από 65 έως 80%, ο οποίος εξαρτάται από τα επιμέρους χαρακτηριστικά του εξοπλισμού. Η ικανότητα αποθήκευσης εξαρτάται από δύο παραμέτρους: το ύψος της υψηλότερα τοποθετημένης δεξαμενής καθώς και τον όγκο του νερού. Η μάζα ενός τόνου νερού που πέφτει από ύψος 100 m παράγει 0,272 kWh. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποθήκευσης, είναι η ανάγκη εξεύρεσης της κατάλληλης τοποθεσίας για την εγκατάστασή των δεξαμενών του εν λόγω υδροηλεκτρικού συστήματος.[1]



Εικόνα 3: Απαιτητός όγκος νερού για αποθήκευση ενέργειας 6 kWh. [1]

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης είναι η μεγαλύτερη αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας από τα συστήματα ανακύκλωσης εντός του Ηνωμένου Βασιλείου. Έχουν γίνει πιο ευέλικτα στις απαιτήσεις του συστήματος. Η ικανότητά τους φτάνει τα 27,6 GWh.

Πίνακας 1: Συστήματα αντλησιοταμίευσης στο Ηνωμένο Βασίλειο [2]

Όνομα	Αποθηκευτική χωρητικότητα (GWh)	Εξόδου (MW)	Τοποθεσία	Έτος
Ffestiniog	~1,3	360	Ουαλία	1963
Ben Cruachan	~10	440	Σκωτία	1966
Φουαγιέ	~6,3	305	Σκωτία	1974
Dinorwig	~10	1728	Ουαλία	1983

Η αποδοτικότητα της αντίστροφης αντλησιοταμίευσης φτάνει μεταξύ του 70-80% και θεωρείται μία ώριμη τεχνολογία για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας με περιορισμούς στη γεωλογία και την τοπογραφία.

Η μηχανή εκείνη η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική είναι ο υδροστρόβιλος. Αποτελεί το βασικότερο μέρος του μηχανολογικού τμήματος του σταθμού. Ο υδροστρόβιλος συνδέεται με τη γεννήτρια, η οποία μετατρέπει την μηχανική ενέργεια από την περιστροφή του υδροστροβίλου, σε ηλεκτρική.[2]

Οι υδροστρόβιλοι διαιρούνται σε δράσης και αντίδρασης.

Οι υδροστρόβιλοι δράσης έχουν τον άξονα περιστροφής τους οριζόντιο. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μικρών παροχών και μεγάλου ύψους. Στους υδροστρόβιλους αντίδρασης αντίθετα, ενεργεί κυρίως η πίεση του νερού. Έχουν τον άξονα τους κάθετο και μπορούν να λειτουργήσουν έξω από το νερό αλλά μέσα σε ειδικό περίβλημα ή βυθισμένοι μέσα σε αυτό. Είναι κατάλληλοι για μεγάλη παροχή και μικρό ύψος πτώσης.[2]

Είναι φυσικά αδύνατο να μετατραπεί όλη η ενέργεια σε ηλεκτρική καθώς ένα μέρος της ενέργειας ξοδεύεται σε παθητικές αντιστάσεις.

Λαμβάνοντας λοιπόν ένα βαθμό απόδοσης υδροστροβίλου n_{ydr} ο οποίος κυμαίνεται από 0,75 έως 0,85, η αποδιδόμενη ισχύς είναι:

$$P=Q h g n_{ydr} n_{yd} \quad (1)$$

Όπου:

Q = παροχή νερού σε m³/sec

h = ωφέλιμο ύψος σε m

n_{yd} = βαθμός απόδοσης υδατόπτωσης (περίπου 0,9)

Ένας ακόμα χαρακτηριστικός αριθμός των υδροστροβίλων είναι ο ειδικός αριθμός στροφών n_s . Ορίζεται ως ο αριθμός των στροφών του στροβίλου, ο οποίος σε ύψος $h = 1\text{m}$ δίνει $P = 1\text{hp}$ και δίνεται από τη σχέση:

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{P}}{h^{5/4}} \quad (2)$$

όπου $n = \eta$ ταχύτητα στροβίλου σε rpm [3]

Στον Πίνακα 2 φαίνονται τα σημαντικότερα είδη υδροστροβίλων και η ανάλογη ειδική τους ταχύτητα.

Πίνακας 2: Υδροστροβίλοι και αντίστοιχο n_s [3]

Υδροστροβίλοι	Ειδική ταχύτητα n_s σε rpm
Pelton	5 – 30
Banki	20 – 80
Francis	60 – 350
Kaplan	400 – 1000
ελικοφόρος	400 – 1000

2.2 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage - TES)

Δύο είναι οι εναλλακτικοί τύποι αποθήκευση θερμικής ενέργειας ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν αισθητή ή λανθάνουσα θερμότητα.

Η εφαρμογή αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στη μετάβαση ενός υλικού από την στερεή στην υγρή φάση υπό σταθερή θερμοκρασία. Κατά τη συσσώρευση, το μεγαλύτερο μέρος του υλικού μετατρέπεται από τη στερεή στην υγρή κατάσταση, ενώ κατά τη ανάκτηση επανέρχεται ξανά στην στερεή κατάσταση. Η θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ του θερμικού συσσωρευτή και του εξωτερικού περιβάλλοντος μέσω ενός υγρού. Η ενέργεια αποθηκεύεται σε μία δεδομένη θερμοκρασία. Όσο περισσότερη η θερμότητα τόσο υψηλότερη η συγκέντρωση. [1]

Παρά την ιδιαίτερα διαβρωτική φύση του, το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) αποτελεί ένα ικανοποιητικό ρευστό αποθήκευσης. Εμφανίζει υψηλή θερμοκρασία τήξης, αποδεκτό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς επίσης και πολύ χαμηλή πίεση ατμών. Μεταξύ 120 και 360 °C εμφανίζει μία ικανότητα αποθήκευσης 744 MJ/t.

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω της θέρμανσης υλικών όπως είναι το νάτριο, τα τηγμένα άλατα, το συμπιεσμένο νερό κ.α., τα οποία δεν αλλάζουν καταστάσεις κατά τη φάση της συσσώρευσης. Έπειτα γίνεται ανάκτηση της

θερμότητας ώστε να παραχθεί νερό σε μορφή ατμών, το οποίο κινεί ένα σύστημα εναλλάκτη-στροβίλου.[1]

Η χρησιμοποίηση του νερού σαν μέσο αποθήκευσης απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, πάνω από 200 °C, καθιστώντας μη δυνατή την αποθήκευσή του σε υπόγειες λεκάνες, μιας και δημιουργούνται διαβρώσεις στο έδαφος, γι' αυτό χρειάζονται μεγάλες υδατοστεγείς δεξαμενές πάνω στο βράχο. Στον πίνακα 3 απεικονίζεται η σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των υλικών αποθήκευσης της θερμότητας όπως ο βράχος, το νερό, το οργανικό PCM και το ανόργανο PCM.[4]

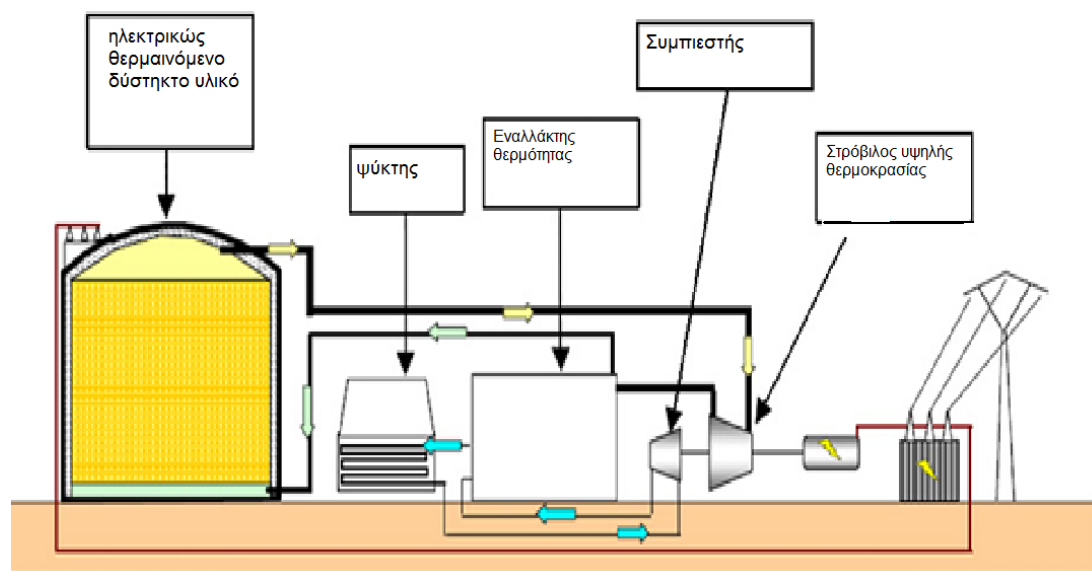
Πίνακας 3: Σύγκριση μεταξύ διαφόρων υλικών αποθήκευσης της θερμότητας [4]

Ιδιότητα	Βράχος	Νερό	Οργανικό PCM	Ανόργανο PCM
Πυκνότητα kg/m ³	2240	1000	800	1600
Ειδική θερμότητα kJ/kg	1,0	4,2	2,0	2,0
Λανθάνουσα θερμότητα kJ/kg	-	-	190	230
Λανθάνουσα θερμότητα kJ/m ³	-	-	152	368
Μάζα αποθήκευσης για 10 ⁶ J, kg	67000	16000	5300	4350
Όγκος αποθήκευσης για 10 ⁶ J, m ³	30	16	6,6	2,7
Σχετική μάζα αποθήκευσης	15	4	1,25	1,0
Σχετικός όγκος αποθήκευσης	11	6	2,5	1,0

Κατά τη διάρκεια των ωρών εκτός αιχμής, το ζεστό νερό για την αποθήκευση μπορεί να ληφθεί από θερμικές εγκαταστάσεις, παραδείγματος χάριν, από τη συμπύκνωση του υψηλής πίεσης ατμού από το λέβητα. Η παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής μπορεί να επιτευχθεί με τη θέρμανση της παροχής νερού κατά την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας και ταυτόχρονη μείωση της εξόδου στο στρόβιλο.

Μια νέα τεχνολογία, η οποία δεν έχει ακόμα εφαρμοστεί, είναι η αποθήκευση θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας με τη βοήθεια στροβίλου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4. Περιλαμβάνει την θέρμανση ενός δύστηκτου υλικού σε θερμοκρασία της τάξης των 1400 °C μέσω ηλεκτρικών αντιστάσεων κατά την αποθήκευση, καθώς και την ανάκτηση της συσσωρευμένης ενέργειας, εγχέοντας τον αέρα που θερμαίνεται από το δύστηκτο υλικό σε έναν στρόβιλο συνδυασμένου κύκλου. Η εκτιμώμενη απόδοση του συγκεκριμένου συστήματος κυμαίνεται γύρω από το 60%, ενώ είναι εφικτή η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας χωρίς σημαντικούς κινδύνους

και γεωλογικούς περιορισμούς. Οι απώλειες αυτο-εκφόρτισης είναι σχετικά μικρές, κυρίως σε μεγάλα συστήματα. [1]



Εικόνα 4: Αποθήκευση θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας με τη βοήθεια στροβίλου [1]

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν επίσης και τα συστήματα αποθήκευσης ηλιακής θερμικής ενέργειας μακράς περιόδου. Οι κύριες προκλήσεις ενός τέτοιου συστήματος είναι οι εξής:

- Επιλογή του καλύτερου συστήματος (κλειστού ή ανοιχτού)
- Βελτιστοποίηση πυκνότητας αποθήκευσης που συνδέεται με την επιλογή των υλικών
- Σχεδιασμός των δεξαμενών
- Σχεδιασμός εναλλακτών
- Πτώση πίεσης
- Η χαμηλή πηγή θερμότητας το χειμώνα
- Απόδοση
- Το κόστος

Τα υλικά φαίνεται να διαδραματίζουν καίριο ρόλο σε αυτές τις προκλήσεις. Ένα υλικό μπορεί να αποθηκεύσει την ενέργεια χωρίς απώλεια θερμότητας και είναι σε θέση να απελευθερώσει αυτή την ενέργεια αμέσως, εφόσον είναι ανάγκη. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για ρόφηση. Τα κριτήρια επιλογής υλικών για ρόφηση είναι:

- Συγγένεια προσροφητή και προσροφόμενου
- Υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα (ιδίως για την προσρόφηση)

- Θερμοκρασία αναγέννησης όσο το δυνατόν χαμηλότερη για μεγαλύτερη απόδοση του συλλέκτη
- Πηγή θερμότητας που απαιτείται για την εξάτμιση σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία
- Προστασία του περιβάλλοντος
- Μη διάβρωση των υλικών
- Καλή θερμική και χημική σταθερότητα υπό συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, πίεση)
- Μη υπερβολικές συνθήκες πίεσης
- Χαμηλό κόστος

Οι ξεχωριστοί αντιδραστήρες είναι καταλληλότεροι για εποχική αποθήκευση ενέργειας. Η πυκνότητα αποθήκευσης της ενέργειας, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απαιτούμενη θερμοκρασία αποφόρτισης.[5]

2.2.1 Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα

Υπάρχουν μελέτες που περιγράφουν φυσικοχημικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες των υλικών που είναι κατάλληλα για μακροχρόνια αποθήκευση ηλιακής θερμικής ενέργειας, δεδομένου ότι η γνώση γι' αυτά αποτελεί προϋπόθεση για το σχεδιασμό των διαφόρων στοιχείων των μονάδων αποθήκευσης των ηλιακών εγκαταστάσεων.

Το 2004, έγινε μια μελέτη από το Κέντρο ερευνών της Ολλανδίας ECN στην οποία, μετά από θεωρητικές προσομοιώσεις και συγκρίσεις προσδιορίζονται κατάλληλα υλικά (πίνακας 4). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα πιο ελπιδοφόρα υλικά για την ανάπτυξη ενός αυτόνομου συστήματος αποθήκευσης είναι το θειικό μαγνήσιο $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ και το υδροξείδιο του σιδήρου $Fe(OH)_2$. Η πυκνότητα ενέργειας που κερδίζεται είναι κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν με αποθήκευση ζεστού νερού.

Πίνακας 4: Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες υλοποίησης [5]

Υλικό	Αντίδραση διάσπασης			Ενεργειακή πυκνότητα AB	Θερμοκρασία αλλαγής	Δυναμικό
	AB ⇌ B + A			GJ / m ³	° C	%
Θειικό μαγνήσιο	MgSO ₄ ·7H ₂ O	MgSO ₄	H ₂ O	2.8	122	9.5
Οξείδιο του πυριτίου	SiO ₂	Si	O ₂	37.9	4065	9.0
					+ HF: 150	
Ανθρακικός σίδηρος	FeCo ₃	FeO	CO ₂	2.6	180	6.3
Υδροξείδιο του σιδήρου	Fe (OH) ₂	FeO	H ₂ O	2.2	150	4.8
Θειικό ασβέστιο	CaSO ₄ · 2H ₂ O	CaSO ₄	H ₂ O	1.4	89	4.3

Επίσης έχει ερευνηθεί ο ζεόλιθος και το ζελέ πυριτίου (silica gel) για εποχική αποθήκευση σε κλειστό κύκλο προσρόφησης. Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η διαδικασία προσρόφησης δεν προσφέρει δυνατότητες για μακροπρόθεσμη αποθήκευση και είναι πιο κατάλληλη για εφαρμογές ψύξης σε αντλία θερμότητας. Εξετάστηκε επίσης μία νέα γενιά υλικών που ονομάζονται SWSs (Selective Water Sorbents) με ενδιάμεσες ιδιότητες τόσο των στερεών όσο και υγρών απορροφητικών παρουσιάζοντας υψηλότερους βαθμούς απόδοσης COP από το ζεόλιθο και το silica gel. Αποτελούνται από μία πορώδη μήτρα υποδοχής στην οποία εσωκλείονται ανόργανα άλατα. Ένα τέτοιο υλικό είναι το SAPO-34 και οι ζεόλιθοι ανταλλαγής ιόντων. Οι ουσίες οι οποίες είναι κατάλληλες για αποθήκευση ηλιακής θερμικής ενέργειας είναι:

- **Για την απορρόφηση**

NaOH / H₂O: Η καυστική σόδα είναι εξαιρετικά διαβρωτική.

LiCl / H₂O: Δεν είναι κατάλληλο λόγω υψηλού κόστους του άλατος (≈ 3600 € / m³).

LiBr / H₂O: Η πυκνότητα αποθήκευσης κυμαίνεται μεταξύ 180 και 310 kWh / m³.

- **Για φυσική προσρόφηση (physisorption)**

Ζεόλιθοι / H₂O: Οι ζεόλιθοι είναι πυριτικά άλατα αργιλίου υψηλού μικροπορώδους

Ο Hauer χρησιμοποιώντας το συνθετικό ζεόλιθο 13X, κατέληξε σε πειραματική πυκνότητα αποθήκευσης 124 kWh / m³ για θέρμανση και 100 kWh / m³ για ψύξη με COP της τάξης του 0,9 και 0,86.

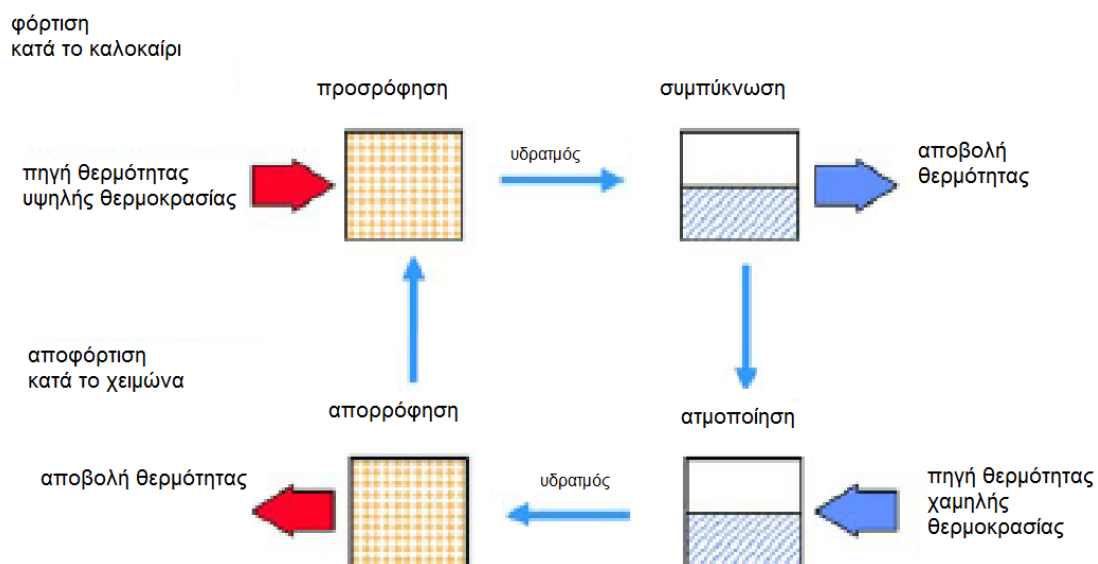
ζελέ πυριτίου / H₂O: Σύμφωνα με τον Faninger η πυκνότητα αποθήκευσης ανέρχεται περίπου σε 4 φορές μεγαλύτερη από το νερό (25/85 ° C). Πειραματικά όμως δεν απέδωσαν τα αναμενόμενα.

- **Για χημειορρόφηση**

Na₂S / H₂O: Το διάλυμα θειούχου νατρίου παρουσιάζει υψηλή απορροφητική ικανότητα. Ωστόσο, το θειούχο νάτριο είναι πολύ διαβρωτικό και λειτουργεί υπό κενό.

MgSO₄·7H₂O: Παρουσιάζει θεωρητικά ένα πολύ καλό δυναμικό από πλευράς αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας με μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα σχεδόν 780 kWh / m³ σε θερμοκρασία 122 °C.

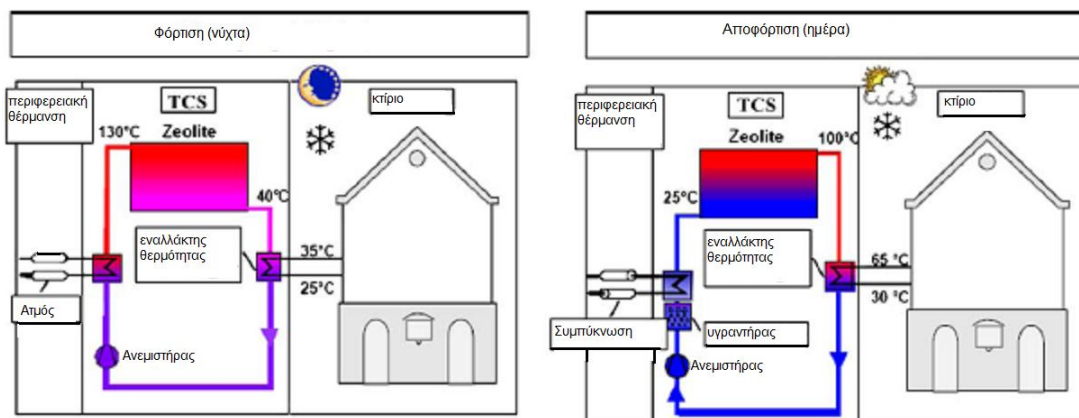
Όπως φαίνεται στην εικόνα 5 στην περίοδο φόρτισης το ζελέ πυριτίου (silica gel) θερμαίνεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας με ενέργεια από ηλιακούς συλλέκτες σε περίπου 88 ° C: απελευθερώνεται υδρατμός (εκρόφηση) και συμπυκνώνεται σε ένα συμπυκνωτή σε εξωτερικό δοχείο ψύξης. Στην περίοδο εκφόρτισης το αποθηκευμένο νερό εξατμίζεται σε ένα εξατμιστήρα συνδεδεμένο με το ζελέ πυριτίου που απορροφά τον ατμό και απελευθερώνει τη θερμότητα.



Εικόνα 5: Η λειτουργία του κλειστού συστήματος προσρόφησης [5]

Όσον αφορά στη λειτουργία ενός ανοικτού συστήματος προσρόφησης κατά τη φάση αναγέννησης, ιδιαίτερα το καλοκαίρι, η επιπλέον θερμότητα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του εισερχόμενου αέρα σε ένα εναλλάκτη θερμότητας. Αυτή η ροή αέρα έχει σαν αποτέλεσμα μείωση της αποθηκευτικής ικανότητας και ξηραίνει τον ζεόλιθο. Κατά την περίοδο αποφόρτισης, ιδιαίτερα το χειμώνα, ο ζεόλιθος απορροφά την υγρασία και απελευθερώνει θερμότητα που μεταδίδεται στον εισερχόμενο κρύο αέρα με εξαναγκασμένη συναγωγή. Ο ζεστός αέρας που προκύπτει χρησιμοποιείται για θέρμανση του κτιρίου.[5]

Στην εικόνα 6 παρουσιάζεται ένα ανοικτό σύστημα προσρόφησης που χρησιμοποιείται σαν ρυθμιστής σε ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης για αποθήκευση 1300 kWh για θέρμανση ενός σχολικού κτιρίου για 14 ώρες, με μέγιστη ισχύ 135 kW.

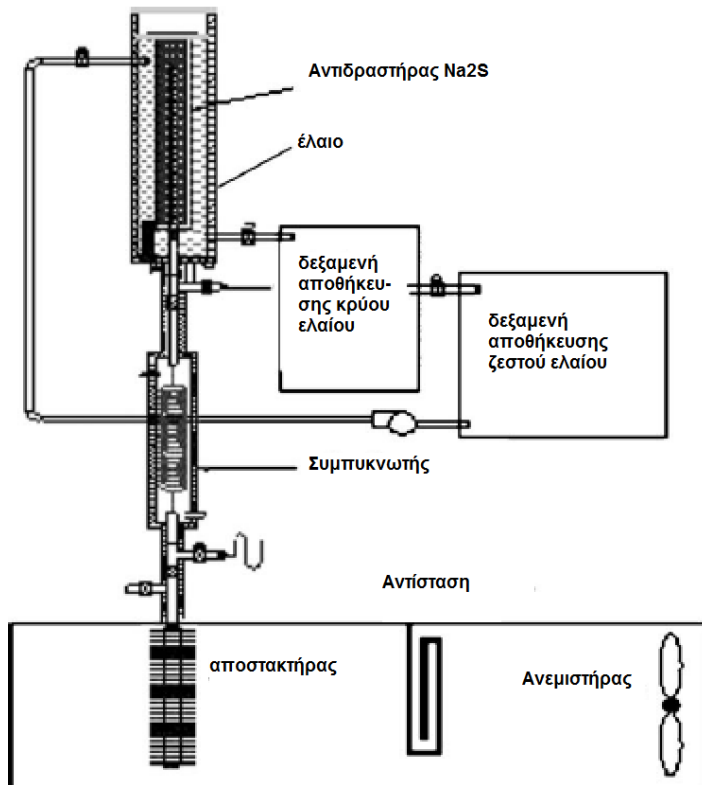


Εικόνα 6: Ανοικτό σύστημα προσρόφησης που χρησιμοποιείται σαν ρυθμιστής σε ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης [5]

Μία άλλη περίπτωση αποθήκευσης ηλιακής θερμικής ενέργειας με χημειορόφηση είναι η MCES (Μοριακή Χημική Αποθήκευση Ενέργειας). Το πρωτότυπο παρουσιάστηκε σε πειραματικό στάδιο στο πανεπιστήμιο Chiang Mai (Ταϊλάνδη) (εικόνα 7).

Οι υδρατμοί εκροφώνονται και συμπυκνώνονται με την ψύξη του νερού σε έναν συμπυκνωτή. Το συμπυκνωμένο νερό ρέει στη συνέχεια προς τον εξατμιστή.

Τα κύρια ενδιαφέροντα αυτής της προσέγγισης είναι η αρθρωτή σχεδίαση (του αντιδραστήρα, του εξατμιστήρα και του συμπυκνωτή στη ίδια γραμμή διάταξης) και η χρήση πρόσθετων γραφίτη που αναμιγνύονται με $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ προκειμένου να βελτιωθεί η θερμική αγωγιμότητα. Φτάνει σε COP 1,11 (θέρμανση + ψύξη).[5]

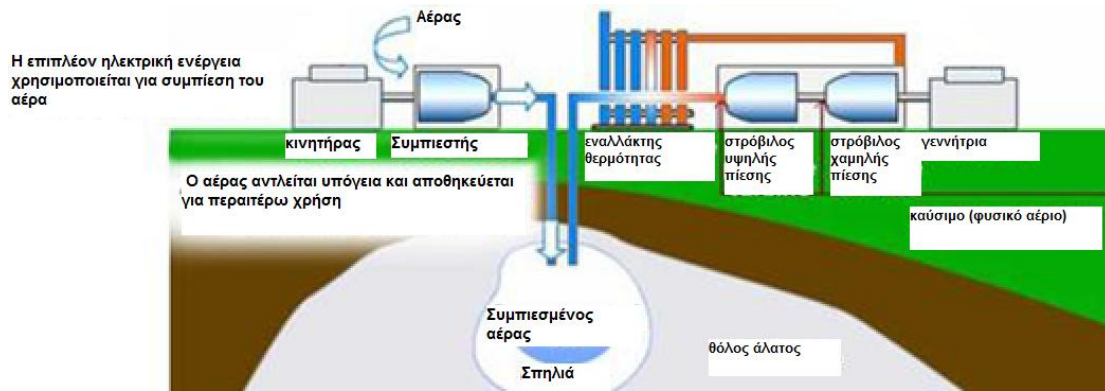


Εικόνα 7: Το σχηματικό διάγραμμα MCES (Modular Chemical Energy Storage) [5]

2.3 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES)

Ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας με αεριοστροβίλους κάνει χρήση περίπου των 2/3 της διαθέσιμης ενέργειας για την συμπίεση του αέρα. Είναι επομένως εφικτό, διαχωρίζοντας τις διαδικασίες ανάλογα με το χρόνο, να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρική ενέργεια κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης με σκοπό την συμπίεση του αέρα, ενώ κατά τις ώρες αιχμής, να παραχθεί επιπλέον ενέργεια έως και τρεις φορές μεγαλύτερη για την ίδια κατανάλωση καυσίμου, μέσω της αξιοποίησης του συμπιεσμένου αέρα με την εκτόνωσή του, στον θάλαμο καύσης. Η θερμότητα των καυσαερίων ανακτάται και χρησιμοποιείται για την θέρμανση του αέρα. (εικόνα 8)

Η αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα επιτυγχάνεται σε υψηλές πιέσεις, της τάξης των 40 - 70 bar, στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μεγάλες σπηλιές που βρίσκονται βαθιά στο έδαφος, εγκαταλελειμμένα ορυχεία αλατιού, καθώς επίσης και υπόγειες σπηλιές αποθήκευσης φυσικού αερίου, αποτελούν τις καλύτερες επιλογές για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα.[1]



Εικόνα 8: Σχηματική παράσταση συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα [1]

Η ενεργειακή πυκνότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποθήκευσης είναι περίπου 12 kWh/m^3 , ενώ η εκτιμώμενη απόδοση κυμαίνεται γύρω στο 70%. Για την διανομή 1 kWh στο δίκτυο, απαιτείται η απορρόφηση 0,7-0,8 kWh ηλεκτρικής ισχύος κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης καθώς και 1,22 kWh φυσικού αερίου κατά τις ώρες αιχμής. Για τη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους λειτουργίας, οι διαρροές του αέρα θα πρέπει να κρατηθούν στο ελάχιστο.

Η αποθήκευση ενέργειας μέσω συμπιεσμένου αέρα γίνεται σε ειδικές φιάλες υψηλής πίεσης για εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας (έως και 300 bar για δομές από ανθρακονήματα). Με τη χρήση ενός ηλεκτρικού συμπιεστή που μπορεί να μετατραπεί σε γεννήτρια κατά τη διάρκεια της ανάκτησης, το σύστημα εμφανίζει απόδοση περίπου 50%, η οποία είναι συνάρτηση της ισχύος φόρτισης-εκφόρτισης. Ο αριθμός των κύκλων είναι της τάξης μερικών δεκάδων χιλιάδων αφού περιορίζεται από την μηχανική κόπωση στις φιάλες.[1]

Ο Succar και ο Williams (2008) πρότειναν έναν τύπο που δείχνει πόση ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί ανά όγκο μονάδος αποθήκευσης.

$$E_{GEN} = \frac{a}{V_S} \int_0^t \dot{m}_A \left(\beta + 1 - \left(\frac{p_b}{p_2} \right)^{\frac{k_2-1}{k_2}} \right) dt \quad (3)$$

$$E_{GEN} = n_m n_G \int_0^t \dot{m}_T w_{CV,TOT} dt \quad (4)$$

$$w_{CV,TOT} = w_{CV1} + w_{CV2} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp + \int_{p_2}^{p_1} v dp \quad (5)$$

όπου E_{GEN} είναι η ηλεκτρική παραγωγή του στρόβιλου. Το ολοκλήρωμα είναι το μηχανικό έργο που παράγεται από την εκτόνωση του αέρα και των καυσίμων στο στρόβιλο. Η σταθερή τιμή n_m είναι η μηχανική απόδοση του στρόβιλου και n_G είναι η

ηλεκτρική απόδοση των γεννητριών. Το $w_{CV,TOT}$ συμβολίζει το συνολικό μηχανικό έργο ανά μονάδα μάζας που παράγεται σε αυτήν την διαδικασία. Επιπλέον $m_T = m_A + m_F$ αντιπροσωπεύει τη ροή μάζας του αέρα.[6]

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του CAES είναι ότι ο όγκος αποθήκευσης, τάξης 1Mm^3 για εγκαταστάσεις 200 MW, τοποθετείται υπόγεια. Ο αέρας αρχικά συμπιέζεται με σταθερή εντροπία (ισεντροπική συμπίεση) στο συμπιεστή, που θερμαίνεται έπειτα σε σταθερή πίεση (ισοβαρής θέρμανση) στον καυστήρα. Η ενέργεια χρησιμοποιείται για λειτουργία γεννήτριας προκειμένου να παραχθεί την ηλεκτρική ενέργεια αλλά και για να τροφοδοτηθεί και ο συμπιεστής.[7]

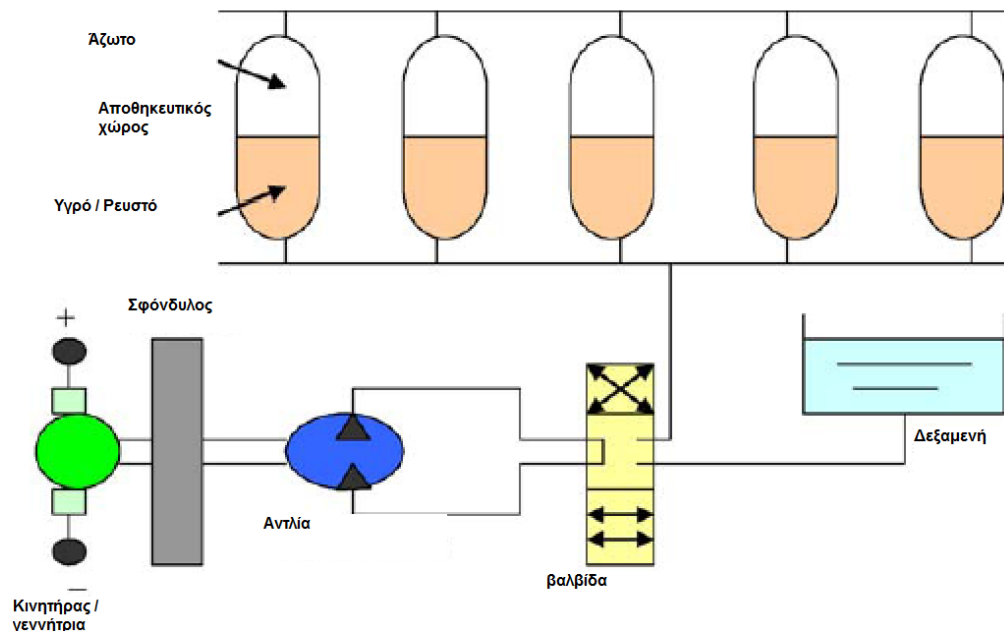
Όσον αφορά στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας με συμπίεση του αέρα (CAES) υπάρχουν δύο συστήματα άξια λόγου ένα στη Γερμανία και ένα στις ΗΠΑ. Και τα δύο αυτά CAES χρησιμοποιούν το φυσικό αέριο ως καύσιμο προκειμένου να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα των αεριοστροβίλων.

Άλλες μέθοδοι παροχής MWh-GWh που προτείνονται περιλαμβάνουν: την αποθήκευση υδρογόνου, την αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες, σε υπεραγωγίσιμους μαγνήτες και σε μπαταρίες ροής.

Οι διασυνδέσεις μπορεί επίσης να παρέχουν ευελιξία στα δίκτυα αυξάνοντας τις πραγματικές διαστάσεις του δικτύου, επιτρέποντας την εισαγωγή και εξαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.[1]

2.3.1 Τεχνολογία με έμβολο

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη συσσώρευση συμπιεσμένου αερίου με την προσθήκη μιας αντλίας και μιας γεννήτριας, όπως φαίνεται στην εικόνα 9. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει μια σχεδόν τέλεια ισοθερμική συμπεριφορά που οφείλεται στη χαμηλή ταχύτητα συμπίεσης και εκτόνωσης σε όλα τα δοχεία αποθήκευσης.



Εικόνα 9: Σύστημα τεχνολογίας με έμβολο [8]

Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η συμπίεση και η εκτόνωση ενός όγκου αερίου - συνήθως αζώτου. Οι πιέσεις ποικίλλουν από 100 bar έως και τα 250 bar (50 % του δοχείου γεμάτο με ρευστό). Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης της ενέργειας, η αντλία ενεργοποιείται από τη γεννήτρια και συμπιέζει το αέριο στα δοχεία . Κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, το συμπιεσμένο αέριο εκτονώνεται και το ρευστό αποβάλλεται από τα δοχεία στην αντλία που λειτουργεί πλέον ως γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Για να ολοκληρωθεί το σύστημα, χρησιμοποιείται μια βαλβίδα η οποία λειτουργεί σε συνδυασμό με έναν σφόνδυλο, σχεδιασμένα για να διατηρούν χαμηλή ταχύτητα. Ένα δοχείο διαστολής είναι επίσης αναγκαίο. Αυτή η τεχνολογία δε διατίθεται στην αγορά, αλλά υπάρχει η ελπίδα ότι μπορεί να υποκαταστήσει αρχικά τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, σε ορισμένες αυτόνομες εφαρμογές.[8]

2.4 Συνδυασμένη αποθήκευση φυσικού αερίου (Natural Gas Storage - NGS)

Η ιδέα αυτή περιλαμβάνει τον συνδυασμό της υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφορά πίεσης μεταξύ του αερίου σε υψηλή πίεση (περίπου 200 bar) σε δεξαμενές (βάθος 1500 m) και του αερίου που εγχέεται στους αγωγούς με πίεση 60-80 bar, οδηγεί σε κατανάλωση ενέργειας για τη συμπίεση, ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί με τη μορφή του ηλεκτρισμού κατά την αποσυμπίεση. [1]

Η υγροποίηση του φυσικού αερίου ή του συμπιεσμένου αέρα απαιτεί μεγάλο ποσό ενέργειας. Η υπάρχουσα τεχνολογία στην Ιαπωνία βασίζεται στις ανταλλαγές θερμότητας για την αποθήκευση του ηλεκτρισμού. Η ιδέα αυτή περιλαμβάνει δύο δεξαμενές αποθήκευσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου και του συμπιεσμένου αέρα αντίστοιχα, αναγεννητικούς εναλλάκτες θερμότητας, έναν συμπιεστή και ένα αεριοστρόβιλο. Κατά την καύση του φυσικού αερίου για την ενεργοποίηση του στροβίλου, ο υγροποιημένος αέρας και το αέριο εξατμίζονται και οι ατμοί αποθηκεύονται στους εναλλάκτες. Κατά τη διάρκεια ωρών χαμηλής ζήτησης, ο αέρας ψύχεται από τον ήδη αποθηκευμένο αέρα, συμπιέζεται μέσω ηλεκτρικού συμπιεστή και επομένως υγροποιείται και αποθηκεύεται.[1]

2.5 Αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες ροής (Flow Battery Energy Storage - FBES)

Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν τη διαθέσιμη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική με την οξείδωση των καυσίμων (π.χ. υδρογόνο, μεθανόλη). Η λειτουργία τους είναι παρόμοια σαν μία μπαταρία με μεγάλη χωρητικότητα. Η παραγωγή καυσίμων (π.χ. από την ηλεκτρόλυση ή τον ατμό νερού που ανασχηματίζει) πραγματοποιείται σε έναν αντιδραστήρα. Οι μπαταρίες τύπου ροής μπορούν να θεωρηθούν στη μέση των δευτεροβάθμιων μπαταριών και των κυψελών καυσίμου.

Οι μπαταρίες ροής είναι ένα σύστημα δύο-ηλεκτρολυτών στο οποίο οι χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση είναι στην υγρή κατάσταση, σε διάλυμα με τον ηλεκτρολύτη. Φαίνεται ότι οι περιορισμοί των τυποποιημένων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών (lead-acid ή νικελίου-καδμίου) υπερκεράζονται. [1]

Οι διάφοροι τύποι ηλεκτρολυτών έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας το βρώμιο ως κεντρικό στοιχείο: με ψευδάργυρο (ZnBr), νάτριο (NaBr), βανάδιο (VBr) και, πιο πρόσφατα, το πολυσουλφίδιο του νατρίου. Η ηλεκτροχημική αντίδραση μέσω μιας μεμβράνης στην κυψέλη μπορεί να αντιστραφεί (φόρτιση - εκφόρτιση). Με τη χρησιμοποίηση μεγάλων δεξαμενών και την ένωση ενός μεγάλου αριθμού κυψελών, μπορούν να αποθηκευτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας και να απελευθερωθούν έπειτα με την άντληση του ηλεκτρολύτη στις δεξαμενές.

Το καλύτερο παράδειγμα της μπαταρίας ροής αναπτύχθηκε το 2003 με μια μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης 15MW-120MWh. Έχει αναβαθμιστεί από τότε σε ένα ηλεκτροχημικό σύστημα βασισμένο εξ ολοκλήρου στο βανάδιο. Η γενική απόδοση αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι περίπου 75%. [1]

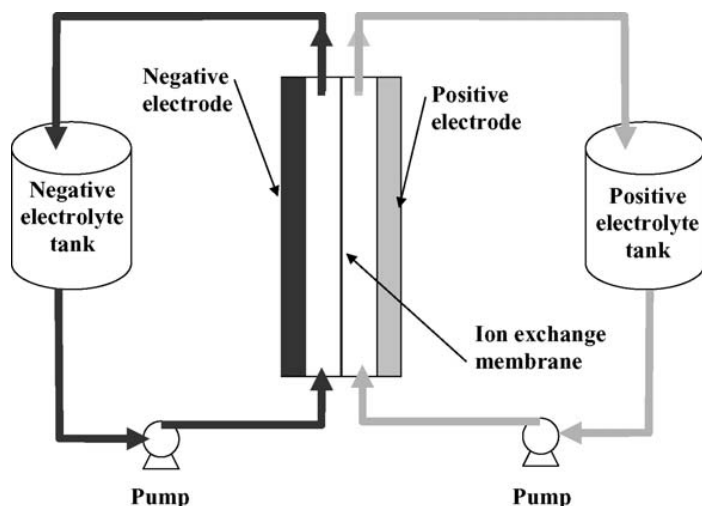
2.5.1 Ιδιότητες των οξειδοαναγωγικών κελιών ροής

Τα πλεονεκτήματα που έχουν οι οξειδοαναγωγικές κυψέλες ροής μπορούν να συνοψιστούν σε τέσσερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα: μέτριο κόστος, ευκολία στη διαμόρφωση, δυνατότητα μεταφοράς και ευέλικτη λειτουργία. Λόγω του σχεδίου τους τα κόστη συντήρησης και κατασκευής της θα μπορούσαν να είναι τα χαμηλότερα. Οι οξειδοαναγωγικές μπαταρίες ροής είναι κατάλληλες για εφαρμογές μετάδοσης και διανομής φορτίου. Η συντήρηση τους επίσης απλοποιείται αφού μπορεί να γίνει ξεχωριστά. Επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η ευελιξία τους σε κύκλους φόρτισης εκφόρτισης (σε αντίθεση με τις μολύβδου οξέως).[9]

Μελετώντας τα ανωτέρω πλεονεκτήματα, συμπεραίνει κανείς ότι οι κυψέλες ροής οξειδοαναγωγής είναι κατάλληλες για εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας σε απομακρυσμένες από το δίκτυο ηλεκτροδότησης περιοχές, οι οποίες χρησιμοποιούν είτε ανεμογεννήτριες, είτε συστοιχίες φωτοβολταϊκών ως κύρια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Στις εγκαταστάσεις αυτές, η ηλεκτροχημική διάταξη αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας που παράγεται, την οποία και απελευθερώνει σε περιόδους που η παραγόμενη ισχύς των κυρίων πηγών δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης.[9]

Χρησιμοποιούν ένα ζεύγος ηλεκτροθετικών διαλυμάτων που οξειδώνονται ή ανάγονται ώστε να αποθηκεύσουν ενέργεια. Ο αντιδραστήρας αποτελείται από δύο «διαμερίσματα» τα οποία διαχωρίζονται από μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων. Κάθε «διαμέρισμα», περιλαμβάνει ένα ηλεκτρόδιο και συνδέεται με μια δεξαμενή ηλεκτρολύτη και μια αντλία μέσω κλειστού βρόχου. Τα αντιδραστήρια επανακυκλοφορούν στην κυψέλη όπου λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις (οξειδωση και αναγωγή). Στην πράξη, πολλές τέτοιες κυψέλες τοποθετούνται μαζί ώστε να σχηματίσουν μια συστοιχία από 10-200 κελιά η οποία περιλαμβάνει διπολικά ηλεκτρόδια. Για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, είτε αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτροδίων σε μια συστοιχία, είτε τοποθετούνται πολλές συστοιχίες σε σειρά ή παράλληλα.[9]

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι η ισχύς και η χωρητικότητα του συστήματος μπορεί να διαχωριστούν. Η ισχύς του συστήματος προσδιορίζεται από τον αριθμό των κυψελών στη συστοιχία και το μέγεθος των ηλεκτροδίων, ενώ η χωρητικότητα από τη συγκέντρωση και τον όγκο του ηλεκτρολύτη. Επίσης, τόσο η ισχύς όσο και η χωρητικότητα μπορούν εύκολα να μεταβληθούν από λίγες ώρες έως και μερικές μέρες ή και εβδομάδες όπως είναι αναγκαίο για παράδειγμα σε αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ενέργειας που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκά. [9]



Εικόνα 10: Κυψέλη ροής οξειδοαναγωγής για αποθήκευση ενέργειας [9]

Η μεμβράνη πρέπει να μειώνει τη μεταφορά των ανπιδραστικών ειδών μεταξύ των διαμερισμάτων ανόδου και καθόδου σε ένα ελάχιστο ποσοστό ώστε να διατηρείται ηλεκτροουδετερότητα και ισορροπία των ηλεκτρολυτών. Οι χαρακτηριστικές στρατηγικές είναι μεταφορά πρωτονίων στους όξινους ηλεκτρολύτες ή μεταφορά Na^+ παρουσία των αλάτων νατρίου. [9]

2.5.2 Οι κυριότεροι τύποι κυψελών ροής οξειδοαναγωγής

2.5.2.1 Μπαταρίες ροής βρωμίου/πολυσουλφιδίου

Σε αυτές τις μπαταρίες, οι ηλεκτρολύτες κατά τη διάρκεια του κύκλου εκφόρτισης είναι: βρωμιούχο νάτριο στη θετική πλευρά, και πολυσουλφίδιο του νατρίου στην αρνητική πλευρά. Αυτά τα χημικά είδη είναι άφθονα, το κόστος τους είναι λογικό και είναι ευδιάλυτα στο νερό. Κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης τα ιόντα βρωμίου οξειδώνονται σε ιόντα τριβρωμιδίου.

Οι προκλήσεις του συστήματος αυτού περιλαμβάνουν: (α) τη φύση των διαφορετικών ηλεκτρολυτών, (β) δυσκολία στη διατήρηση της ισορροπίας των ηλεκτρολυτών, (γ) τη δυνατότητα εναπόθεσης θείου στη διαχωριστική μεμβράνη και (δ) ανάγκη να αποτραπεί ο σχηματισμός H_2S και Br_2 . [9]

2.5.2.2 Η μπαταρία οξειδοαναγωγικής-ροής βαναδίου

Μερικά από τα τεχνικά ενδιαφέροντα οξειδοαναγωγικά ζεύγη παρατίθενται στον πίνακα. Αρχικά, οι μπαταρίες οξειδοαναγωγικής ροής βασίστηκαν στο οξειδοαναγωγικό ζεύγος $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ στο θετικό ηλεκτρόδιο και το οξειδοαναγωγικό ζεύγος $\text{Cr}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η φτωχή αντιστρεψιμότητα του χρωμίου και η επιμόλυνση από τη διάχυση. Προς το τέλος της δεκαετίας του '80, προτάθηκε μια μπαταρία οξειδοαναγωγικής ροής βαναδίου.

Το βανάδιο περιλαμβάνεται και στα δύο τμήματα της κυψέλης. Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται το $\text{V}^{2+}/\text{V}^{3+}$ ενώ στο θετικό χρησιμοποιείται $\text{V}^{4+}/\text{V}^{5+}$. Και τα δύο ζεύγη βαναδίου παρουσιάζουν ικανοποιητικές κινητικές. Εντούτοις, μόνο τα V^{5+} , V^{4+} και V^{3+} είναι σταθερά στον αέρα. Το V^{2+} αντιδρά εύκολα με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. [10]

Έχουν ερευνηθεί πηγές βαναδίου συμφέρουσες οικονομικά μιας και τα άλατα βαναδίου είναι ακριβότερα από τα αντίστοιχα σιδήρου και χρωμίου, όπως είναι ή αιθάλη από τον λέβητα. Αν και τα V^{2+} , V^{3+} και V^{4+} είναι ευδιάλυτα στο θειικό οξύ ακόμη και σε υψηλές συγκεντρώσεις, τα V^{5+} σχηματίζουν αδιάλυτα ιζήματα V_2O_5 στις θερμοκρασίες των ηλεκτρολυτών. Επιπλέον, η σταθερότητα των διαλυμάτων V^{5+} σε σχέση με την κατακρήμνιση μπορεί να αυξηθεί με αύξηση της συγκέντρωσης του θειικού οξέος. Η σταθερότητα των υψηλών συγκεντρώσεων του βαναδίου στο θειικό οξύ αυξήθηκε επίσης σε φορτισμένα διαλύματα. [10]

2.5.2.3 Σύστημα οξειδοαναγωγής βαναδίου/βρωμίου

Το σύστημα οξειδοαναγωγής βαναδίου/βρωμίου έχει μία ειδική ενεργειακή πυκνότητα 25-35 Wh/kg που θεωρείται χαμηλή για εφαρμογές οχημάτων. Η ενεργειακή πυκνότητα συσχετίζεται με τη συγκέντρωση των οξειδοαναγωγικών ιόντων σε διάλυμα, στη δυνατότητα των κελιών και τον αριθμό ηλεκτρονίων που μεταφέρονται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Όλα τα οξειδοαναγωγικά κελιά ροής βαναδίου έχουν μια μέγιστη συγκέντρωση βαναδίου 2 mol/dm^3 , η οποία περιορίζει την ενεργειακή πυκνότητα και αντιπροσωπεύει το όριο διαλυτότητας των ιόντων V^{2+} και V^{3+} στο θειικό οξύ σε θερμοκρασίες από 5 μέχρι 40 °C.[9]

2.5.2.4 Κυψέλες ροής οξειδοαναγωγής ψευδαργύρου/βρωμίου

Έχουν καλή ενεργειακή πυκνότητα, υψηλή τάση κυψέλης, υψηλό βαθμό αντιστρεψιμότητας, και επαρκή αντιδραστήρια χαμηλού κόστους. Όπως και σε άλλες περιπτώσεις άλλων οξειδοαναγωγικών κελιών ροής, τα υδατικά διαλύματα των ηλεκτρολυτών που περιέχουν τα αντιδραστήρια αποθηκεύονται σε εξωτερικές δεξαμενές. Κάθε κυψέλη περιέχει δύο ηλεκτρόδια στα οποία εμφανίζονται αντιστρεπτές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Μερικές φορές, ένα πορώδες στρώμα χρησιμοποιείται για το ηλεκτρόδιο βρωμίου.[9]

2.5.2.5 Κυψέλες ροής οξειδοαναγωγής ψευδαργύρου/δημητρίου

Η τάση των κυψελών του συστήματος Zn/Ce σε σύγκριση με άλλα οξειδοαναγωγικά συστήματα κατά τη διάρκεια της φόρτισης είναι περίπου 2.5 V και πέφτει κάτω από τα 2 V στον κύκλο εκφόρτισης.[9]

2.5.2.6 Μπαταρίες ροής διαλυτού μολύβδου/οξέος

Το σύστημα διαφέρει από την παραδοσιακή μπαταρία μολύβδου- οξέως δεδομένου ότι ο Pb^{2+} είναι ιδιαίτερα ευδιάλυτος στον υδάτινο όξινο ηλεκτρολύτη. Διαφέρει επίσης από τις αναφερόμενες οξειδοαναγωγικές μπαταρίες ροής επειδή απαιτεί μόνο ένα ενιαίο ηλεκτρολύτη, χωρίς την παρουσία μεμβράνης ή διαχωριστή. Οι αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια περιλαμβάνουν τη μετατροπή των διαλυμάτων σε μια στερεά φάση κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι κυψελών ροής οξειδοαναγωγής με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. Μελετώντας τον πίνακα αυτόν εξάγονται ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα, σημαντικότερα από τα οποία είναι τα εξής:

(α) Το μέγεθος των κυψελών είναι σε γενικές γραμμές μικρό με εξαίρεση το σύστημα βρωμίου/πολυσουλφιδίου. Η εγκατεστημένη ισχύς είναι της τάξης των kW για τα περισσότερα συστήματα και MW για το σύστημα βρωμίου/πολυσουλφιδίου.

(β) Η πλειοψηφία των κυψελών χρησιμοποιεί κατιονική μεμβράνη για τον διαχωρισμό των αντιδράσεων των δύο ηλεκτροδίων, εκτός από το σύστημα μπαταρίας μολύβδου-οξέος.

(γ) Οι περισσότερες κυψέλες χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια από άνθρακα ή σύνθετο άνθρακα.

(δ) Οι βαθμοί απόδοσης κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, αλλά εξαρτώνται άμεσα από τις καταστάσεις φόρτισης και λειτουργίας. Οι τιμές είναι: 73-82% για την αποδοτικότητα της τάσης, 80-98% για την αποδοτικότητα του ρεύματος και 66-75% για την αποδοτικότητα της ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι τον υψηλότερο συνολικό βαθμό απόδοσης εμφανίζουν οι τεχνολογίες των κυψελών βαναδίου και μολύβδου-οξέος.[9]

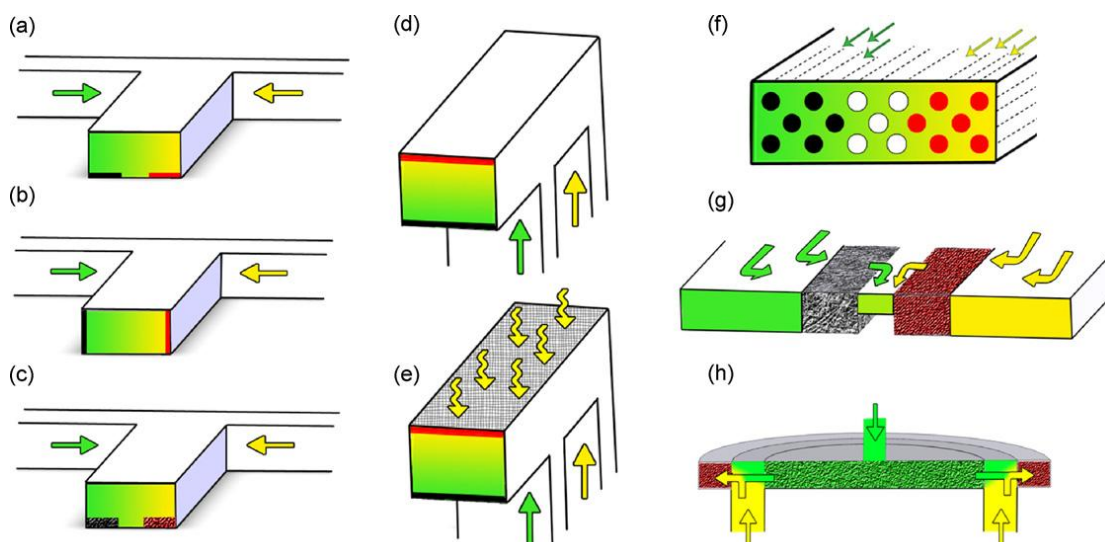
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά κυριότερων τύπων κυψελών ροής οξειδοαναγωγής [9]

Σύστημα	Ηλεκτρόδια	Μεμβράνη	E_{cell} (V)	Πυκνότητα ρεύματος (A/m^2)	R_A (Ωm^2)	Απόδοση τάσης (%)	Απόδοση ρεύματος (%)	Απόδοση ενέργειας (%)	Εγκατεστημένη ισχύς	Εγκατεστημένη ενέργεια	Θερμοκρασία ($^{\circ}C$)
Σιδήρου/ Χρωμίου	Fe: τσόχα άνθρακα Cr: τσόχα άνθρακα + καταλύτης	Κατιονική Nafion 117	1.03	9	1.1×10^{-1}	81.6	81.2	66.3	10W	80Wh	30-55
		Ανιονική	0.77	64.5	1.2×10^{-2}	73	99	72	1kW	10kWh	-
Βρωμίου/ Πολυσουλφιδίου	Σύνθεση πολυμερούς άνθρακα	Κατιονική	1.54	600	2.6×10^{-3}	75	90	67	1-15MW	120MWh	35
Βαναδίου	Γραφίτης: τσόχα άνθρακα	Selemin CMV	1.7	800	2.1×10^{-3}	73.2	98.2	71.9	1.33kW	0.7kWh	35
Διαλυτού μολύβδου/ Οξέος	Σύνθεση άνθρακα	-	1.78	100-600	NG	82	85	65	NG	NG	25
Μολύβδου/Οξέος	Διοξειδίο μολύβδου και μόλυβδος	Μικροπορώδης διαχωριστής	2.04	NG	NG	NG	80-90	70-75	NG	6kWh-24MWh	NG

2.5.3 Κυψέλη καυσίμου μικροροής

Μια κυψέλη καυσίμου μικροροής ορίζεται ως μια κυψέλη με πρόσθεση και αφαίρεση ρευστού, αντιδράσεις και δομές ηλεκτροδίων όλα σε ένα κανάλι. Λειτουργεί χωρίς φυσικά εμπόδια, όπως μια μεμβράνη, για το διαχωρισμό της ανόδου και της καθόδου.

Στην εικόνα 11 φαίνονται διάφορες διατάξεις κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 11: Διατάξεις κυψελών μικροροής [11]

Δύο ρεύματα συνδυάζονται σε οριζόντια θέση σε σχήμα T-ή Y με: ηλεκτρόδια στο κάτω μέρος (a) ηλεκτρόδια στις πλευρές (b) και πορώδη ηλεκτρόδια στο κάτω μέρος (c). Χρησιμοποιώντας ένα κανάλι σχήματος F, τα ρεύματα συνδυάζονται κάθετα με ηλεκτρόδια πάνω και κάτω (d) επιτρέποντας επίσης τη χρήση ενός πορώδους ηλεκτροδίου στην κορυφή, (e). Η παράταξη ηλεκτροδίων σε εξαγωνικό σχήμα φαίνεται στην εικόνα (f). Στις τελευταίες εικόνες παρατηρούνται ηλεκτρόδια μέσω πορώδους σε απλή (g) και ακτινική μορφή (h).

Η ροή χαρακτηρίζεται από χαμηλούς αριθμούς Reynolds όπου στο ένα ρεύμα είναι το καύσιμο (άνοδος) και στο άλλο το οξειδωτικό (κάθοδος). Ισχύουν οι σχέσεις της συνέχειας και οι εξισώσεις Navier Stokes.

Συνήθως, αυτές οι συσκευές αποτελούνταν από ένα μικροδιάυλο, δύο ηλεκτρόδια, και μία δομή υποστήριξης. Κατασκευάζεται από πολυμερή όπως το PDMS.[11]

Πίνακας 6: Τα μετρημένα χαρακτηριστικά απόδοσης της κυψέλης καυσίμου μικροροής [11]

Καύσιμο	Οξειδωτικό	Μέγιστη τάση (V)	Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος (mA /cm ²)	Μέγιστη πυκνότητα ισχύος (mW cm ⁻²)	Μέγιστη ισχύς εξόδου (mW)	Μέγιστη αξιοποίηση των καυσίμων
V ²⁺	VO ₂ ⁺	1.59	80	38	3.2	~10%
HCOOH	O ₂	0.7	0.8	0.17	0.05	<1%
HCOOH	KMnO ₄	1.1	8	2.4	0.7	<1%
CH ₃ OH	O ₂	1.4	40	12	-	<10%
CH ₃ OH	O ₂	0.7	8	2.8	-	<15%
H ₂	O ₂	1.0	1.6	0.7	0.01	-
H ₂	Air	1.0	1.2	0.7	0.01	-
HCOOH	O ₂	0.64	1.5	0.18	0.045	-
H ₂	O ₂	1.45	0.85	0.75	0.38	-
HCOOH	Air	0.9	130	26	16	33%
CH ₃ OH	Air	1.05	120	17	11	-
H ₂ O ₂	H ₂ O ₂	0.7	76	23	0.6	-
HCOOH	O ₂	0.75	1.5	0.58	0.29	-
HCOOH	H ₂ O ₂	0.65	7.2	2.0	1.0	-
HCOOH	KMnO ₄	1.0	2.6	0.7	0.03	-
HCOOH	H ₂ O ₂	1.1	150	30	1.5	-
V ²⁺	VO ₂ ⁺	1.46	92	35	5.8	63%
V ²⁺	VO ₂ ⁺	1.38	243	70	7.6	55%
V ²⁺	VO ₂ ⁺	1.55	326	131	16	100%
HCOOH	NaOCl	1.42	230	52	6.2	100%
HCOOH	KMnO ₄	1.2	5	2.8	12	58%
CH ₃ OH	H ₂ O ₂	0.11	1.1	0.03	4e-4	-
Αιθανόλη	O ₂	0.34	0.05	0.005	7e-5	-
Γλυκόζη	O ₂	0.55	0.13	0.03	0.001	-
Γλυκόζη	O ₂	0.8	0.16	0.07	0.02	-
V ²⁺	VO ₂ ⁺	1.46	-	-	-	-
HCOOH	O ₂	0.73	-	-	0.4	-
H ₂	O ₂	1.44	-	0.48	1.2	-
V ²⁺	VO ₂ ⁺	1.36	12	3.8	28	78%

2.6 Κυψέλες καυσίμου-αρχή λειτουργίας

Οι κυψέλες καυσίμου ανακτούν την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης του νερού. Το συγκεκριμένο σύστημα αποθήκευσης περιλαμβάνει τρία βασικά συστήματα: την ηλεκτρόλυση, κατά την οποία καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης για την παραγωγή υδρογόνου, την κυψέλη καυσίμου, η οποία χρησιμοποιεί το υδρογόνο το οξυγόνο που υπάρχει στον αέρα για την παραγωγή ενέργειας σε ώρες αιχμής καθώς και μια δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου για την εξασφάλιση επαρκούς αποθέματος.

Η αντίδραση οξειδοαναγωγής μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου είναι μια σχετικά απλή αντίδραση που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό μιας δομής (στοιχειώδης ηλεκτροχημική κυψέλη) που αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, διαχωρισμένα από τον ηλεκτρολύτη που αποτελεί το μέσο μεταφοράς του ηλεκτρικού φορτίου των ιόντων (εικόνα 12).

Μεταξύ των ηλεκτροδίων παρεμβάλλεται ηλεκτρολύτης π.χ. διάλυμα ΚΟΗ. Στην κυψέλη προσδίδονται με σταθερή ροή υδρογόνο και οξυγόνο σε αέρια κατάσταση περίπου με την θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντος, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει διαδικασία μόνιμης ροής. Το έργο αντιδράσεως κερδίζεται σαν ηλεκτρικό έργο. Τα ηλεκτρόνια σαν φορείς φορτίων μετακινούνται από την άνοδο μέσω του εξωτερικού τμήματος του κύκλου του ρεύματος προς την κάθοδο ενώ τα ιόντα μετακινούνται από την κάθοδο προς την άνοδο. Μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων υπάρχει διαφορά δυναμικού που στην αντιστρεπτή ακραία περίπτωση χαρακτηρίζεται σαν αντιστρεπτή τάση ακροδεκτών. Στην άνοδο με τη βοήθεια καταλύτη επιτελείται η παρακάτω αντίδραση :



Στην πλευρά της καθόδου για την ολοκλήρωση της αντίδρασης σχηματισμού ενός μορίου νερού απαιτούνται και δύο ηλεκτρόνια τα οποία αποδεσμεύτηκαν στην άνοδο.



Το άθροισμα των δύο αντιδράσεων δίνει τη συνολική αντίδραση



Αν εκλεγεί $T = T_0 = 298,15K$ και $p = p_0 = 1 \text{ atm}$ τότε προκύπτει

$$(\bar{W}_t)_{rev}^0 = \Delta^R \bar{G}(T_0, p_0) = -237,3 \text{ kJ/mol.} \quad (9)$$

Θα υπολογιστεί η τάση ακροδεκτών $(U_{el})_{rev}$. Για την ηλεκτρική ισχύ ισχύει:

$$P_{rev} = I_{el} (U_{el})_{rev} = \dot{n}_{H_2} (\bar{W}_t)_{rev} = \dot{n}_{H_2} \Delta^R \bar{G}(T, p) \quad (10)$$

Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος I_{el} προκύπτει σα γινόμενο της ροής ποσότητας ουσίας \dot{n}_{el} των ηλεκτρονίων, του φορτίου ενός ηλεκτρονίου και της σταθεράς Avogadro:

$$I_{el} = \dot{n}_{el} (-e) N_A = -\dot{n}_{el} F \quad (11)$$

όπου F σταθερά Faraday. $F = 96487 \text{ C/mol}$.

$$(U_{el})_{rev} = - \frac{\dot{n}_{H_2} \Delta^R \bar{G}(T, p)}{\dot{n}_{el} F} \quad (12)$$

Όπως φαίνεται από την εξίσωση για την αντίδραση ανόδου, ισχύει: $\dot{n}_{el} = 2 \dot{n}_{H_2}$.

Επομένως προκύπτει

$$(U_{el})_{rev} = -\frac{\Delta^R \bar{G}(T, p)}{2F} \quad (13)$$

Η αντιστρεπτή τάση ακροδεκτών εξαρτάται από τα T και p καθώς και από την αντίδραση που λαμβάνει χώρα στην κυψέλη καυσίμου.

Για την κυψέλη υδρογόνου- οξυγόνου για τη $T=T_0= 298,15 \text{ K}$ και $p=p_0=1 \text{ atm}$

$$\text{λαμβάνεται } (U_{el})_{rev} = -\frac{\Delta^R \bar{G}(T, p)}{2F} = 1,23V$$

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται στην πραγματικότητα από μια κυψέλη καυσίμου είναι μικρότερη από την ισχύ P_{rev} που αποδίδεται με το αντιστρεπτό έργο αντιδράσεως. Για την πραγματική ισχύ λαμβάνεται

$$P_{rev} = I_{el} U_{el} = U_{el} (-F) \dot{n}_{el} \quad (14)$$

Η ροή ποσότητας ουσίας των ηλεκτρονίων είναι ανάλογη προς τη ροή ποσότητα ουσίας του καυσίμου που πράγματι μετατρέπεται. Σχετικά ισχύει

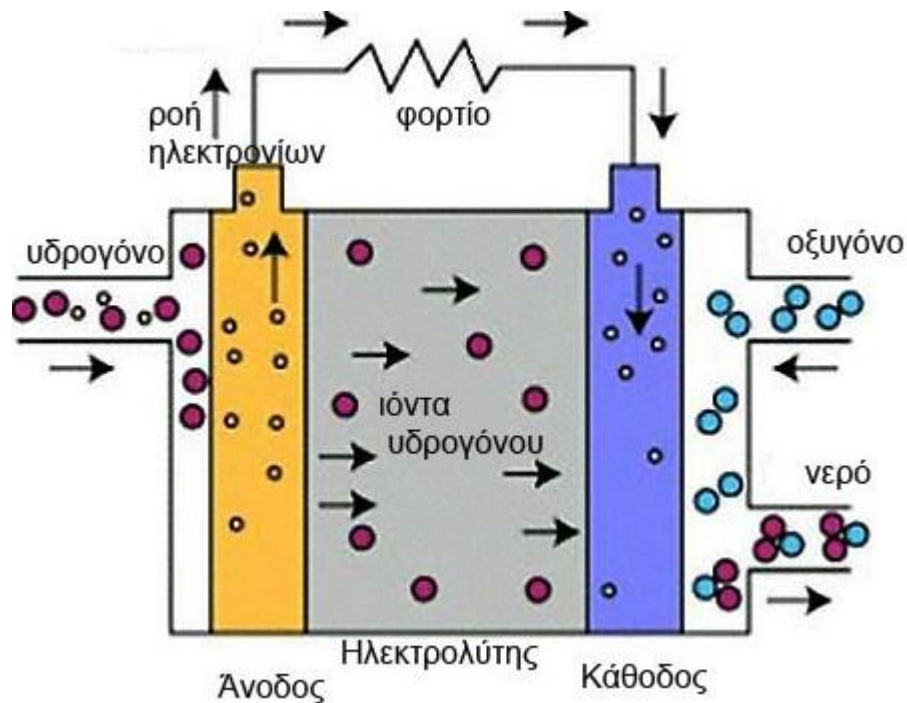
$$\dot{n}_{el} = (\dot{n}_B)_U \frac{\Delta^R \bar{G}(T, p)}{-F(U_{el})_{rev}} \quad (15)$$

από την οποία προκύπτει για την ισχύ

$$P = (\dot{n}_B)_U \frac{U}{(U_{el})_{rev}} \Delta^R \bar{G}(T, p) \quad (16)$$

Η ροή της ουσίας $(\dot{n}_B)_U$ που έχει μετατραπεί είναι μικρότερη από τη ροή της ποσότητας ουσίας \dot{n}_B του καυσίμου που έχει προσδοθεί επειδή στα αέρια καύσιμα ένα μέρος του αερίου μπορεί να εισχωρήσει στον ηλεκτρολύτη χωρίς να μετατραπεί.

[13]



Εικόνα 12: Σχηματική απεικόνιση κυψέλης καυσίμου [1]

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα σε αστικές εφαρμογές σταθμών χαμηλής ισχύος, σε σταθμούς κάλυψης αιχμών της ζήτησης, σε εγκαταστάσεις αυτόνομων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, καθώς επίσης και σε εφαρμογές συμπαραγωγής μέσης ισχύος.

Υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου όπως είναι η συμπίεση του υδρογόνου, η υγροποίηση του υδρογόνου, η αποθήκευση μέσω μεταλλικών υδριδίων κ.α. Για εφαρμογές σταθμών, οι δεξαμενές υψηλής πίεσης με όγκο από 10^{-2} έως 10^4 m^3 αποτελούν την απλούστερη λύση μέχρι σήμερα, λαμβάνοντας υπόψη την παράλληλη εγκατάσταση διατάξεων ελέγχου και ασφαλείας λόγω της αυξημένης εκρηκτικότητας του συγκεκριμένου αερίου.

Ο συνδυασμός ενός ηλεκτρολύτη και μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια λύση με χαμηλό βαθμό απόδοσης, της τάξης του 70% για τον ηλεκτρολύτη, 50% για τη συστοιχία των κυψελών και περίπου 35% για τον συνδυασμό. Επιπρόσθετα, ένα ακόμη μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι το γεγονός ότι το κόστος επένδυσης είναι απαγορευτικό, ενώ η διάρκεια ζωής των επιμέρους διατάξεων είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Συνεπώς, περαιτέρω έρευνα και μελέτη για την βελτίωση της απόδοσης των κυψελών και του ηλεκτρολύτη είναι απαραίτητη ώστε να καταστεί η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος αποθήκευσης ανταγωνιστική προς τις άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης.[12]

2.6.1 Βασικοί τύποι κυψελών καυσίμου

Υπάρχουν πολλοί τρόποι κατηγοριοποίησης των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται σήμερα για την παραγωγή ενέργειας μέσω υδρογόνου. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος γι' αυτό, αποτελεί η κατηγοριοποίησή τους βάσει του ηλεκτρολύτη που αυτοί περιέχουν στο εσωτερικό τους, προκειμένου να διοχετεύσουν το υδρογόνο τους προς την κάθοδό τους. Από τον συγκεκριμένο τρόπο κατηγοριοποίησής τους προκύπτουν οι εξής παρακάτω βασικοί τύποι τους: [12]

- Κυψέλη καυσίμου PEMFC – Μembrάνη ανταλλαγής πρωτονίων
- Κυψέλη καυσίμου AFC – Αλκάλια
- Κυψέλη καυσίμου PAFC – Φωσφορικό οξύ
- Κυψέλη καυσίμου MCFC – Τηγμένα ανθρακικά άλατα
- Κυψέλη καυσίμου SOFC – Σταθεροποιημένα οξειδία

2.6.1.1 Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (ή κυψέλη καυσίμου PEMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου PEMFC, αποτελούν σήμερα τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες κυψέλες καυσίμου στη πράξη. Η λειτουργία τους συμβαίνει σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (50 – 100 °C) και η ισχύς που παράγουν είναι αρκετή για την εφαρμογή τους στις περισσότερες από τις καθημερινές ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου. Σ' αυτό βοηθάει και η ικανότητα που παρουσιάζουν να προσαρμόζονται γρήγορα σε συχνές αυξομειώσεις της παραγόμενης ισχύος τους. Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από μία κυψέλη καυσίμου PEMFC, κυμαίνεται από 50 έως 250 kW. Ο συγκεκριμένος τύπος κυψέλης είναι αρκετά ευαίσθητος σε μη καθαρά καύσιμα. Η μεμβράνη βρίσκεται μεταξύ δυο πορωδών ηλεκτροδίων, την άνοδο και την κάθοδο, στα οποία ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο. [12]

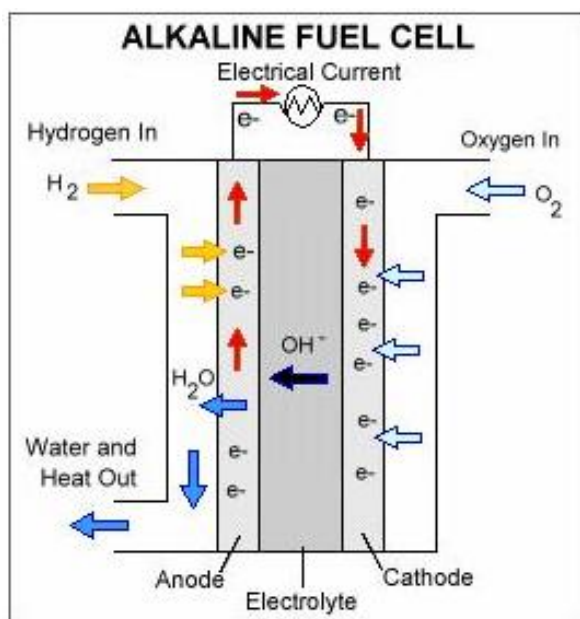
2.6.1.2 Κυψέλη καυσίμου αλκαλίων (ή κυψέλη καυσίμου AFC)

Οι κυψέλες καυσίμου αλκαλίων (ή κυψέλες καυσίμου AFC), αποτελούν τις πρώτες κυψέλες καυσίμου υδρογόνου που εφαρμόστηκαν ποτέ στην πράξη για την παραγωγή ενέργειας. Χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης το KOH.

Οι κυψέλες καυσίμου AFC, έχουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος, ο οποίος μπορεί να φτάσει μέχρι το 70%. Ο υψηλός αυτός βαθμός της απόδοσής

τους, οφείλεται κυρίως στον εξίσου υψηλό ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιούνται οι διάφορες καταλυτικές χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες 60-100°C και σε πίεση ατμοσφαιρική. Τυπική πυκνότητα ισχύος είναι 0.2-0.3W/cm². Οι προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας της είναι πάνω από 10000 ώρες.

Το κύριο μειονέκτημά που παρουσιάζουν οι κυψέλες καυσίμου AFC, είναι ότι είναι ιδιαίτερα ευπρόσβλητες, κατά την λειτουργία τους, από την παρουσία του CO₂ στο εσωτερικό τους, ακόμη και όταν αυτό υφίσταται σε πολύ μικρές ποσότητες. Κατά την παρουσία του CO₂, η απόδοση των κυψελών καυσίμου πέφτει σημαντικά, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται σημαντικά ο συνολικός χρόνος ζωής τους. Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές της NASA όπου πρώτο μέλημα είναι η απόδοση και όχι το κόστος. [12]



Εικόνα 13: Κυψέλη καυσίμου αλκαλίων [12]

2.6.1.3 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (phosphoric - acid fuel cells ή PAFC) αποτελούν σήμερα τις δεύτερες πιο διαδεδομένες κυψέλες καυσίμου στη πράξη, μετά τις κυψέλες καυσίμου PEMFC. Ο βαθμός απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος των κυψελών καυσίμου PAFC, κυμαίνεται στην περιοχή των 40 - 60%, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ των 150 °C και 200 °C. Για θερμοκρασία λειτουργίας μικρότερη των 150 °C, ο ηλεκτρολύτης των κυψελών καυσίμου PAFC (φωσφορικό οξύ), γίνεται κακός ιοντικός αγωγός των πρωτονίων του υδρογόνου και

το CO που σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη τους από την διάσπαση των υδρογονούχων καυσίμων τους, δηλητηριάζει την άνοδό τους, μειώνοντας παράλληλα και το βαθμό απόδοσής τους. Στην περίπτωση της συμβατικής βενζίνης πρέπει να απομακρυνθούν τα σουλφίδια. Τα σημαντικότερα αδύναμα σημεία των κυψέλων καυσίμου PAFC, είναι το σχετικά μεγάλο μέγεθος του όγκου τους και το επίσης αυξημένο βάρος της μάζας τους. Επίσης, η τάση του ρεύματος που παράγουν είναι σχετικά χαμηλή. [12]

2.6.1.4 Κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (molten carbonate fuel cells, ή MCFC), χρησιμοποιούν τις ενώσεις των ανθρακικών ριζών, με στοιχεία όπως είναι το Li, το Na και το K σαν ηλεκτρολύτη τους. Οι ανθρακικές αυτές ενώσεις, βρίσκονται στο εσωτερικό τους σε υγρή μορφή και ενεργούν εμποτισμένες μέσα σε κατάλληλο υπόστρωμα. Παρότι έχουν αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης ηλεκτρικής ισχύος (μεγαλύτερος του 60%), οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν κανονικά (620°C με 660°C) δεν προσφέρονται για την εφαρμογή τους σε καθημερινές ενεργειακές ανάγκες. Εκτός αυτού, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας τους επιδρούν αρνητικά και στα υλικά με τα οποία είναι κατασκευασμένες, με αποτέλεσμα να μειώνουν σημαντικά τον συνολικό χρόνο ζωής τους. Η λειτουργία τους σε θερμοκρασίες άνω των 600°C, οφείλεται στην αδυναμία που έχει ο ηλεκτρολύτης τους (τηγμένο ανθρακικό άλας) να καθίσταται ιοντικά αγώγιμος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Από την άλλη μεριά, η λειτουργία των κυψέλων καυσίμου MCFC σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες βοηθάει στην κατάλυση των αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται και η χρήση ενός ιδιαίτερα δαπανηρού υλικού σαν καταλύτη τους, οπότε μειώνεται και το συνολικό κόστος λειτουργίας τους. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.1 - 0.2 W/cm² και η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40000 ώρες. Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου MCFC, βρίσκεται μεταξύ των 10 kW και 2 MW, ανάλογα και με την διάταξη στην οποία βρίσκουν εφαρμογή.[12]

2.6.1.5 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (ή κυψέλη καυσίμου SOFC)

Όπως και οι κυψέλες καυσίμου MCFC, έτσι και οι κυψέλες καυσίμου SOFC (κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου ή solid oxide fuel cells), παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένη

απόδοση ηλεκτρικής ισχύος, η οποία υπερβαίνει το 60%. Η παραγόμενη ισχύς που παράγουν οι κυψέλες καυσίμου SOFC, ανέρχεται στα 100kW περίπου. Οι κυψέλες καυσίμου SOFC, χρησιμοποιούν στερεά υλικά σαν ηλεκτρολύτες τους (σκληρά κεραμικά), τα οποία είναι κατασκευασμένα από κράμα οξειδίων του ζirkονίου και του νατρίου. Οι στερεοί αυτοί ηλεκτρολύτες τους, τους δίνουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι και 1000 °C). Το κατώτατο όμως όριο της φυσιολογικής λειτουργίας τους είναι κι αυτό αρκετά υψηλό και ανέρχεται στους 800 °C. Οι εφαρμογές τους εστιάζονται, σε μεγάλες μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, δεδομένου ότι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων έχουν τη μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας από όλους τους τύπους κυψελών καυσίμου.[12]

2.7 Αποθήκευση χημικής ενέργειας

Η αποθήκευση χημικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω των συσσωρευτών. Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν διπλή διαδικασία αποθήκευσης και απελευθέρωσης της ενέργειας εναλλάσσοντας τις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης. Μετασχηματίζουν τη χημική ενέργεια που παράγεται από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα χωρίς εκπομπές ρύπων και θορύβου, απαιτώντας ελάχιστη συντήρηση.

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των συσσωρευτών (μολύβδου-οξέως, νικελίου-καδμίου, νικέλιο-υδρογονωμένου μετάλλου, νικελίου-σιδήρου, ψευδαργύρου-αέρα, σιδήρου-αέρα, νατρίου-θείου, ιόντος-λιθίου, λιθίου-πολυμερούς, κ.λπ.) με ενεργειακές πυκνότητες από 150 έως και 2000Wh/kg (λίθιο). Χρησιμοποιούνται συχνά στα φορητά συστήματα, αλλά και σε μόνιμες εφαρμογές (υποστήριξη δικτύων έκτακτης ανάγκης, αποθήκευση από ανανεώσιμες πηγές σε απομονωμένες περιοχές).

Η ελάχιστη περίοδος εκφόρτισης των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών φθάνει σπάνια κάτω από 15 λεπτά εκτός αν τα φορτία είναι μεγάλα της τάξης των 100W/kg και 1000 kW/kg. Σε αντιδιαστολή με τους πυκνωτές, η τάση τους παραμένει σταθερή σαν συνάρτηση του επιπέδου φόρτισης. [1]

2.7.1 Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπαταρίας είναι σήμερα η πιο πολλά υποσχόμενη, λόγω της πολύ υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και ενεργειακής αποδοτικότητας, που

οφείλονται στην κατασκευή λεπτής κυψέλης και στο χαμηλό ρυθμό αποφόρτισης της μπαταρίας.

Το λίθιο είναι το ελαφρύτερο μέταλλο και το πιο ηλεκτροθετικό στοιχείο, γεγονός που το καθιστά πολύ καλό υλικό για την κάθοδο της μπαταρίας. Βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι η υψηλή τάση κυψέλης, που ευθύνεται και για την υψηλή ειδική ενέργεια των μπαταριών λιθίου. Επίσης η υψηλή τάση συντελεί σε μικρότερο αριθμό κυψελών για δεδομένη τάση, μειωμένα κόστη παραγωγής και αυξημένη αξιοπιστία. Άλλο ένα πλεονέκτημα των μπαταριών αυτών είναι το μικρό μέγεθος των ατόμων του λιθίου, που επιτρέπει την ευκολότερη και αναστρέψιμη ηλεκτροχημική εμβολή τους στα αρνητικά ηλεκτρόδια. Αυτά τα χαρακτηριστικά ευθύνονται για τη διατήρηση της ακεραιότητας και των δύο ηλεκτροδίων κατά τους κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης, με αποτέλεσμα η μπαταρία να έχει μεγάλο κύκλο ζωής. [18]

Σημαντική πρόκληση για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελεί η ευαισθησία των ιόντων λιθίου στην υπερφόρτιση, που μπορεί να οδηγήσει σε χημική αποσύνθεση των υλικών του θετικού ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη ή/και τον εκτοπισμό του μεταλλικού λιθίου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Αυτές οι διαδικασίες επηρεάζουν την κυψέλη και μπορούν να οδηγήσουν σε επικίνδυνες καταστάσεις, μεταξύ των οποίων η απελευθέρωση εύφλεκτων διαλυτών ατμών ηλεκτρολύτη, εάν παραβιαστεί το στεγανό ασφαλείας της κυψέλης από την υπερβολική πίεση. [18]

2.7.1.1 Βασικά μέρη της μπαταρίας λιθίου –ιόντων

Τα βασικά μέρη της μπαταρίας λιθίου –ιόντων είναι τα εξής:

Άνοδος : Ηλεκτρόδιο που λειτουργεί σε χαμηλή τάση. Τα ιόντα λιθίου αφήνουν την άνοδο όταν η μπαταρία αποφορτίζεται και μπαίνουν σε αυτήν όταν η μπαταρία φορτίζεται. Επιπλέον χρησιμοποιείται γραφίτης σαν υλικό ανόδου.

Κάθοδος : Ηλεκτρόδιο που λειτουργεί σε υψηλή τάση. Τα ιόντα λιθίου μπαίνουν στην κάθοδο όταν η μπαταρία αποφορτίζεται και φεύγουν από αυτήν όταν η μπαταρία φορτίζεται. Η επιλογή του υλικού της καθόδου είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στο σχεδιασμό της μπαταρίας.

Διαχωριστές (separator): Οι διαχωριστές στις μπαταρίες λιθίου-ιόντων είναι φτιαγμένοι από πολυολεφίνες χρησιμοποιώντας στρώματα 3-8 μm (PP/PE/PP ή απλά PE), με 50% πορώδη υφή. Μέσω αυτών μπορούν να αντιμετωπιστούν οι πιθανές επιπτώσεις της υπερφόρτισης, καθώς λιώνουν σε περίπτωση υπερβολικών θερμοκρασιών για να κλείσουν τους πόρους μέσα από τους οποίους ταξιδεύουν τα ιόντα, κλείνοντας έτσι και το κύκλωμα.

Ηλεκτρολύτης: Υλικό που γεμίζει το χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει τη μεταφορά των ιόντων λιθίου, αλλά όχι των ηλεκτρονίων. Οι ηλεκτρολύτες λιθίου-ιόντων είναι μείγμα οργανικών διαλυτών και αλάτων λιθίου.

Η τεχνολογία Li-ion έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και ως εκ τούτου, προσφέρεται για πολλές προηγμένες εφαρμογές. Ωστόσο, η σημερινή γενιά συσκευών λιθίου δεν επαρκεί και απαιτείται έρευνα στην επιστήμη των υλικών για την παροχή νέων ηλεκτροδίων και ηλεκτρολυτών. Με στόχο τη μείωση του κόστους της Li-ion μέσω βελτιστοποίησης των βοηθητικών στοιχείων, όπως η συσκευασία και η υπερφόρτιση κυκλωμάτων προστασίας. Η έρευνα είναι επί του παρόντος στην ανάπτυξη ηλεκτροδίων. Χρειάζεται χαμηλή αντίσταση και μεγάλη ειδική επιφάνεια. Μία εγκατάσταση 10m×10m×10m μπορεί να αποθηκεύσει 400 MWh. Αυτό μπορεί να συγκριθεί με ένα αιολικό πάρκο. [18]

2.7.2 Μπαταρίες λιθίου – πολυμερούς

Η τεχνολογία αυτή είναι παρόμοια με την προαναφερόμενη, αλλά τυπικά διαθέτει χαμηλή πυκνότητα φόρτισης, υψηλότερο ρυθμό υποβάθμισης κύκλου ζωής και πολύ λεπτό σχεδιασμό (1mm πάχος). Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η υψηλή αστάθεια των υπερφορτισμένων μπαταριών, καθώς και το ότι εάν η μπαταρία αποφορτιστεί κάτω από ένα επίπεδο, υπάρχει ο κίνδυνος να μη μπορεί να επαναφορτιστεί.[15]

2.7.3 Μπαταρίες μολύβδου – οξέως

Σε πολλά ηλεκτροκίνητα οχήματα χρησιμοποιούνται συσσωρευτές μολύβδου, καθώς έχουν τη χαμηλότερη αναλογία κόστους ανά μονάδα ενέργειας και έτσι το συνολικό κόστος του οχήματος διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Πρόκειται για ώριμη τεχνολογία, με κάποια μειονεκτήματα όμως. Έχουν μικρή συγκέντρωση ενέργειας, αποτελούν το 25-50% του βάρους του ηλεκτροκίνητου οχήματος και παρέχουν μέτρια αυτονομία κινήσεως. Έχουν φτωχές αποδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες και εκπέμπουν υδρογόνο, οξυγόνο και θείο κατά τη φόρτιση. Παρόλα αυτά, οι νέοι συσσωρευτές της εταιρείας Firefly Energy στις ΗΠΑ (με αρνητικό ηλεκτρόδιο από σπογγώδη άνθρακα) δεν υφίστανται θείωση, παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση της διάρκειας ζωής και της συγκεντρώσεως ισχύος, καθώς και μικρή βελτίωση της συγκεντρώσεως ενέργειας. [16]

Η μπαταρία μολύβδου-οξέως είναι η παλαιότερη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας.

Το 2008 τέτοιου είδους συσκευές αποτελούν το 79% της αμερικανικής αγοράς. Είναι ιδανικές για εφαρμογές ανανεώσιμης ενέργειας μικρής κλίμακας. Μπορούν να φορτιστούν επανειλημμένα κατά τουλάχιστον στο 80% της χωρητικότητάς τους. Έχουν χαμηλό κόστος επένδυσης, ευκολία στη συντήρηση, χαμηλότερο βαθμό αυτοεκφόρτισης από όλα τα επαναφορτιζόμενα συστήματα παρέχοντας ανταγωνιστικό κόστος.

Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την περιορισμένη διάρκεια ζωής, φτωχή απόδοση σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αστοχία λόγω συνεχούς επαναφόρτισης, και μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω μολύβδου οξέως. [15],[16]

2.7.4 Μπαταρίες νικελίου καδμίου

Η διάρκεια ζωής είναι μεγαλύτερη (πάνω από 1.500 κύκλους) όπως και η ενεργειακή πυκνότητα με χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως. Προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών όπως διάρκεια ζωής, ανθεκτικότητα αξιοπιστία σε δυσμενείς συνθήκες. Έχουν χαμηλή ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR) αλλά αποτελούνται από βαριά μέταλλα και εκφορτίζονται εύκολα. Είναι ανταγωνιστικές με τις μολύβδου αφού παρέχουν συνεχή ενέργεια και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη στιγμιαία ισχύ. Το κάδμιο επίσης, είναι τοξικό – αποτελεί κίνδυνο και για τους ανθρώπους και για τα ζώα – οπότε η χρήση του, κυρίως σε οικιακές εφαρμογές, αντικαθίσταται από τις μπαταρίες τύπου Li-on και NiMH. [15],[16]

2.7.5 Μπαταρίες νικελίου – υδρογονωμένου μετάλλου

Οι συσσωρευτές νικελίου – υδρογονωμένου μετάλλου έχουν συγκέντρωση ενέργειας το πολύ ίση με 70 Wh/kg και μεγάλη διάρκεια λειτουργίας (>160.000 km στα οχήματα). Και αυτές έχουν όμως φτωχές αποδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έχουν επίσης υψηλή αυτοεκφόρτιση, πολύπλοκο κύκλο φορτίσεως και χαμηλό βαθμό απόδοσης. Είναι φιλικότερες στο περιβάλλον. Έχουν ενεργειακή πυκνότητα κατά 25-30% υψηλότερη σε σχέση με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου (NiCd). Πάσχουν από εκφόρτιση και έχουν μικρότερη ειδική ενέργεια από τις μπαταρίες ιόντος λιθίου με σαφώς όμως μικρότερο κόστος. [15]

2.7.6 Μπαταρίες Zebra (Νατρίου-χλωριούχου νικελίου)

Η μπαταρία αυτή ανήκει στην κατηγορία των μπαταριών τηγμένου άλατος. Σε αυτές χρησιμοποιούνται τηγμένα άλατα ως ηλεκτρολύτης, προσφέροντας τόσο υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα όσο και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος. Παρόλα αυτά, η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας είναι 270-350 °C, κάτι που δημιουργεί πιο αυστηρές απαιτήσεις για τα υπόλοιπα μέρη της μπαταρίας και μπορεί να επιφέρει προβλήματα θερμικής διαχείρισης και ασφάλειας. Επιπλέον, υπάρχουν σημαντικές θερμικές απώλειες ακόμα και όταν η μπαταρία δεν είναι σε χρήση

Ο πίνακας παρέχει μια περίληψη των βασικών χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος τύπου μπαταρίας. [15]

2.7.7 Μπαταρίες Νατρίου - Θείου

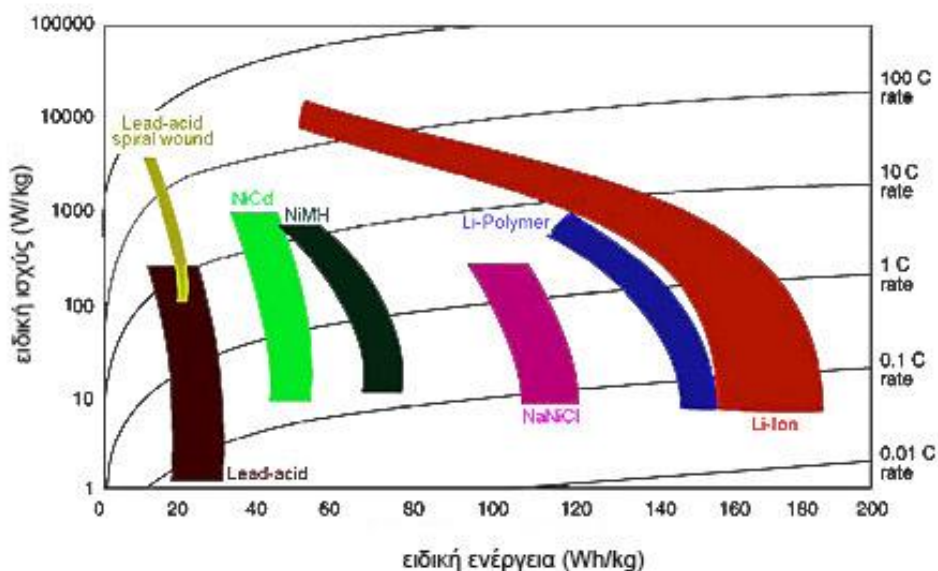
Αυτή η τεχνολογία μπαταριών απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες και λειτουργεί στους 300 °C. Χρησιμοποιείται υγρό θείο σαν αρνητικό ηλεκτρόδιο και υγρό νάτριο σαν θετικό. Χωρίζονται από ένα στερεό ηλεκτρολύτη β-αλουμίνας. [17]

Πίνακας 7: Επιδόσεις μπαταριών [17]

	Μολύβδου-οξέος	Νικελίου-Καδμίου	Νατρίου-θείου	Νατρίου-χλωριούχου νικελίου	Λιθίου ιόντος
Ανώτατο όριο ονομαστικής ισχύος	Δεκάδες MW	Δεκάδες MW	MW	Εκατοντάδες kW	Δεκάδες kW
Ειδική ενέργεια (Wh / kg)	35-50	45-80	100	115	160

Σημαντικά χαρακτηριστικά των επιδόσεων των ηλεκτρικών στηλών που προορίζονται για χρήση σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν:

- ονομαστική ισχύ και χωρητικότητα αποθήκευσης,
- συνολικό κόστος λειτουργίας,
- κύκλο και διάρκεια ζωής,
- ασφάλεια,
- μέγεθος,
- επίπεδο απόδοσης επιστρεφόμενης ενέργειας,
- απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης.



Εικόνα 14: Κατανομή των διαφορετικών ηλεκτροχημικών συσσωρευτών ανάλογα με την ενεργειακή πυκνότητα και την ισχύ τους [14]

2.8 Αποθήκευση ενέργειας μέσω σφονδύλου (Flywheel Energy Storage - FES)

Οι συσσωρευτές ενέργειας μέσω σφονδύλου αποτελούνται από έναν ογκώδη ή σύνθετο σφόνδυλο συνδεδεμένο με έναν ηλεκτροκινητήρα με μαγνητικά υποστηρίγματα τοποθετημένο σε ένα κιβώτιο υπό χαμηλή πίεση για να μειωθούν οι απώλειες αυτό-εκφόρτισης. Εμφανίζουν αντοχή σε κόπωση κάτω από κύκλους φορτίσεων (έως και μερικές εκατοντάδες χιλιάδες κύκλους).

Ανάλογα με την αδράνεια και την ταχύτητα της περιστρεφόμενης μάζας, ένα δεδομένο ποσό της κινητικής ενέργειας αποθηκεύεται ως ενέργεια περιστροφής. Ο σφόνδυλος τοποθετείται σε κενό για την εξάλειψη των απωλειών τριβής από τον αέρα. Η κινητική ενέργεια μεταφέρεται μέσα και έξω από το σφόνδυλο με μια ηλεκτρική μηχανή που μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρας ή γεννήτρια, ανάλογα με τη γωνία φάσης. [19]

Η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στο στάτορα μετατρέπεται σε ροπή στο ρότορα, αναγκάζοντας τον να περιστρέφεται γρηγορότερα για να κερδίσει κινητική ενέργεια.

Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν σφόνδυλο είναι ανάλογη με τη μάζα και το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής του, σύμφωνα με

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (17)$$

όπου I είναι η ροπή αδράνειας και ω η γωνιακή ταχύτητα του σφονδύλου. Η ροπή αδράνειας για κάθε αντικείμενο είναι συνάρτηση της μάζας και του σχήματος.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να αυξηθεί η ενέργεια είναι η επιτάχυνση του σφονδύλου. Το όριο ταχύτητας καθορίζεται από την τάση σε εφελκυσμό σ . Σύνθετα υλικά με μικρή πυκνότητα και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, είναι εξαιρετικά για την αποθήκευση κινητικής ενέργεια. [19]

Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί για μια δεδομένη μάζα επιτυγχάνεται από έναν σφόνδυλο που γίνεται από ένα υλικό που συνδυάζει την αντοχή στον εφελκυσμό με τη χαμηλή πυκνότητα. Επομένως τα σύνθετα υλικά είναι καλύτερα από τα μέταλλα (πίνακας 8).

Πίνακας 8: Ιδιότητες μετάλλων και σύνθετων υλικών [20]

Υλικά	Πυκνότητα (kg m ⁻³)	Τάση (MN m ⁻²)	Μέγιστη ειδική ενέργεια (Wh kg ⁻¹)
Χάλυβας (AISI 4340)	7800	1800	32
Κράμα (AlMnMg)	2700	600	31
Τιτάνιο (TiAl6Zr5)	4500	1200	37
Πολυμερές ενισχυμένο με υαλώδεις ίνες (60% vol E-glass)	2000	1600	111
Πολυμερές ενισχυμένο με ανθρακώδεις ίνες (60% vol HTCarbon)	1500	2400	222

Η ροπή αυξάνεται καθώς η ταχύτητα μειώνεται, ενώ η δύναμη διατηρείται σταθερή. Ο περιορισμός ροπής, και το γεγονός ότι οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν την περισσότερη ενέργεια στις υψηλές ταχύτητες, σημαίνουν ότι η αναλογία της ελάχιστης προς τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας:

$$s = \omega_{\min} / \omega_{\max} \quad (18)$$

είναι συνήθως περισσότερο από 0.2. Η αποθηκευμένη ενέργεια υπολογίζεται από τον τύπο

$$E = E_{\max} (1-s^2). \quad (19)$$

Όταν $s = 1/3$, η χρήσιμη αποθηκευμένη ενέργεια είναι σχεδόν 90% E_{\max} . [21]

Οι περισσότεροι σφόνδυλοι λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες και απαιτούν ρουλεμάν με ιδιαίτερες προδιαγραφές. Τα ρουλεμάν δεν απαιτούν καμία συντήρηση και έχουν απώλειες μόνο 168W. Επίσης έχουν αναπτυχθεί ρουλεμάν με υψηλής θερμοκρασίας

υπεραγωγούς (HTS) που περιορίζουν τις απώλειες με αποτέλεσμα απώλειες μικρότερες από το 2% ανά ημέρα.

Όσον αφορά στη διακύμανση τάσης στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να περιοριστεί σε λιγότερο από 2%.

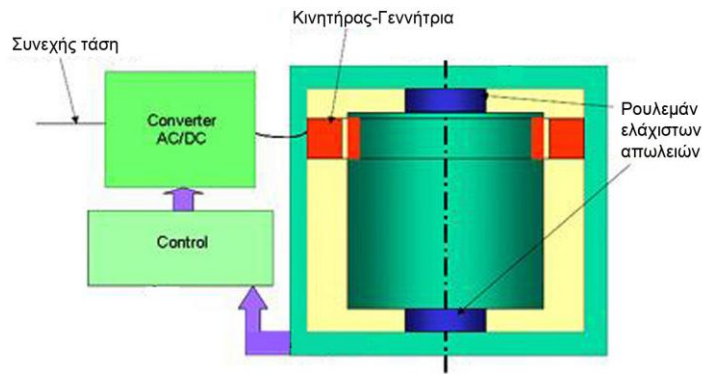
Η χωρητικότητα πάλι κυμαίνεται από 3 kWh ως 133 kWh. Είναι άμεσα ανάλογη προς το τετράγωνο της περιστροφικής ταχύτητας. Η μέγιστη αποδοτικότητα που αναφέρεται από μερικούς κατασκευαστές είναι 96% ενώ μία χαρακτηριστική είναι 92%. [21]

Η διάρκεια ζωής για τους σφονδύλους κυμαίνεται από 10^5 , μέχρι 10^7 πλήρεις στροφές. Η αποφόρτιση χωρίζεται σε ανοικτού κυκλώματος και αναμονής. Η αποφόρτιση αναμονής υπολογίζεται σε 0,18 έως 2 φορές την αποθηκευμένη χωρητικότητα ανά ώρα.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα συστήματα σφονδύλων αποτελούνται κυρίως από χάλυβα, αλουμίνιο, χαλκό, ίνες γυαλιού και άνθρακα, εποξική ρητίνη, πυρίτιο και NdFeB. Ο στροφέας κατασκευάζεται είτε από χάλυβα είτε από σύνθετες ίνες. Δεν υπάρχει καμία σημαντική εκπομπή κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Τα συστήματα σφονδύλων δεν παρουσιάζουν κανένα ιδιαίτερο πρόβλημα για τη διάθεση στα τέλη ζωής τους. [20]

2.8.1 Εφαρμογή της τεχνολογίας αποθήκευσης (FES)

Γενικά η εγκατάσταση ενός συστήματος σφονδύλων δεν παρουσιάζει κανένα ιδιαίτερο πρόβλημα. Ένα σύστημα μπορεί να μεταφερθεί σε μακρινές εφαρμογές. Σε έναν ανεμοστρόβιλο 300kW εγκαθίσταται ένα σχετικό σύστημα σφονδύλων 100kW. Οι διαδικασίες συντήρησης είναι σπάνιες. Τα περισσότερα τυποποιημένα συστήματα σφονδύλων έχουν χρόνους αποθήκευσης από 5 έως 30 δευτερόλεπτα. Με χρήση HTS μαγνητικών ρουλεμάν, ο χρόνος αποθήκευσης ξεπερνά τη 1 ώρα. Οι κύριες αγορές για τα συστήματα σφονδύλων είναι συστήματα UPS.



Εικόνα 15: Συσσωρευτές ενέργειας μέσω σφονδύλου [1]

Για την αποθήκευση ενέργειας σε ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, απαιτούνται σφόνδυλοι μεγάλης χωρητικότητας. Οι απώλειες λόγω τριβής ενός σφονδύλου 200 τόνων εκτιμάται ότι κυμαίνονται στα 200 kW. Χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη υπόθεση καθώς και ένα στιγμιαίο βαθμό απόδοσης της τάξης του 85%, η συνολική απόδοση αναμένεται να πέσει στο 78% μετά από 5 ώρες, και εν τέλει στο 45% μετά το πέρας μίας μέρας. Συνεπώς, αυτή η τεχνολογία αποθήκευσης είναι ακατάλληλη για μακροπρόθεσμη αποθήκευση της ενέργειας.

2.9 Αποθήκευση ενέργειας μέσω μαγνητικών υπεραγωγών (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES)

Η αποθήκευση της ενέργειας μέσω μαγνητικών υπεραγωγών επιτυγχάνεται μέσω ενός υπεραγωγίμου πηνίου που αποτελείται από καλώδια νιόβιου-τιτανίου (NbTi) και λειτουργεί σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες της τάξης των $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ έχοντας μηδενική αντίσταση όταν διαρρέεται από συνεχές ρεύμα DC. Είναι απαραίτητη η μετατροπή του για εφαρμογές τάσης AC ή DC.

Το σημαντικότερο από τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας, είναι ο εξαιρετικά υψηλός στιγμιαίος βαθμός απόδοσης, που αγγίζει έως και το 95% για έναν κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης.

Επιπλέον, αυτά τα συστήματα μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως σε αντιδιαστολή με τις μπαταρίες. Είναι πολύ χρήσιμα για εφαρμογές που απαιτούν συνεχή λειτουργία με έναν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.

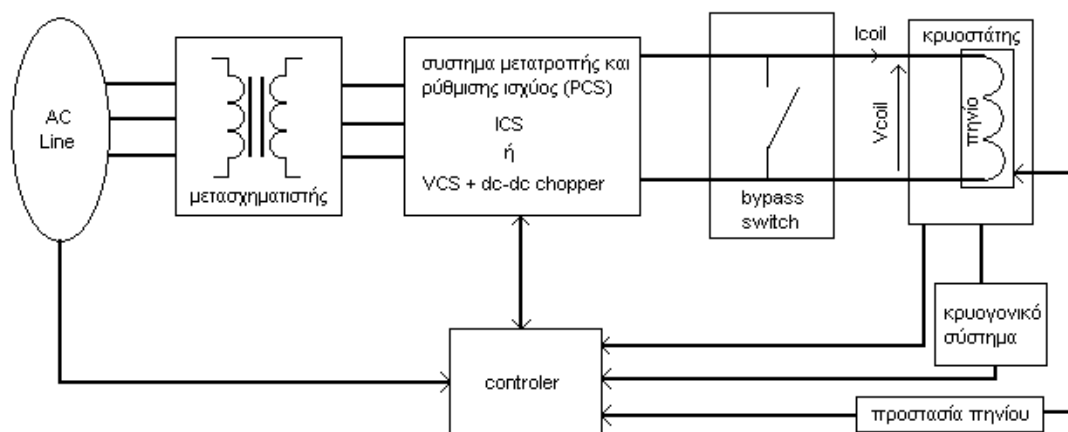
Ακόμη, η πολύ γρήγορη απόκριση τους (κάτω από 100 msec), τα καθιστά ιδανικά για τη ρύθμιση της σταθερότητας των δικτύων.

Η σημαντική ανεπάρκειά τους είναι το σύστημα ψύξης που αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα της λειτουργίας της διάταξης.

Ογκώδη συστήματα αποθήκευσης (5000-10,000MWh) απαιτούν πολύ μεγάλες σπείρες (100 m στη διάμετρο) παράγοντας τεράστιες ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις όποτε απαιτείται η υπόγεια εγκατάστασή τους.[1]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 16, ένα τυπικό SMES σύστημα αποτελείται από αρκετά υποσυστήματα. Το υπεραγώγιμο πηνίο είναι η καρδιά του συστήματος . Βρίσκεται μέσα σε έναν κρυστάτη, ο οποίος με τη βοήθεια ενός ψύκτη στο κρυογονικό σύστημα βοηθάει το πηνίο στο να συντηρεί τη θερμοκρασία του στην κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας. Και αυτό γιατί σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος το πηνίο πρέπει να διατηρείται σε υπεραγώγιμη κατάσταση.

Ένα δεύτερο ζωτικής σημασίας σύστημα είναι το σύστημα μετατροπής και ρύθμιση ισχύος (Power Conversion/Conditioning System, PCS), το οποίο εξυπηρετεί βασικά δυο σκοπούς: ο πρώτος είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από dc σε ac και ο δεύτερος για τη φόρτιση και εκφόρτιση του πηνίου. Υπάρχει επίσης ένας μετασχηματιστής ο οποίος παρέχει τη σύνδεση με το δίκτυο και μειώνει την τάση λειτουργίας στα επίπεδα του PCS.[18]



Εικόνα 16: Γενικό διάγραμμα SMES συστήματος [3]

Σήμερα διατίθενται συσκευές από 1-10 MW, και περισσότερες από 30 με συνολική δυναμικότητα περίπου 50 MW είναι εγκατεστημένες σε διάφορα μέρη των ΗΠΑ. Αποτελούνται από NbTi και λειτουργούν σε 4,2 K.[18]

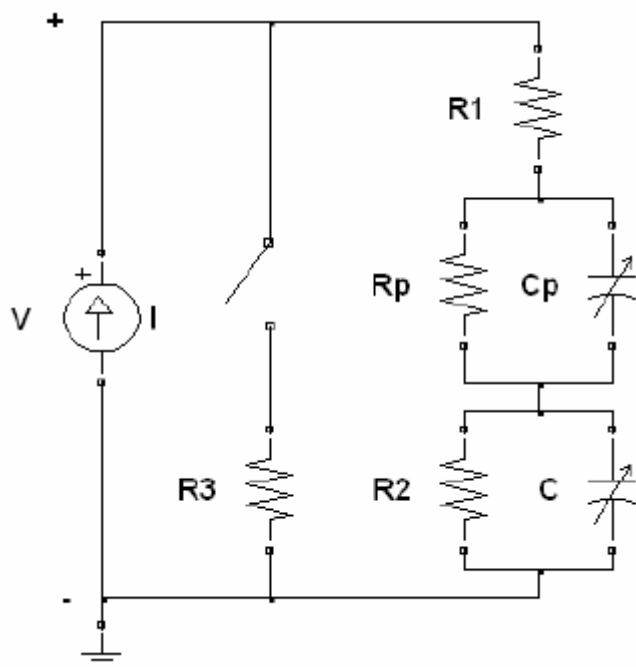
2.10 Αποθήκευση ενέργειας μέσω υπερπυκνωτών

Οι υπερπυκνωτές (supercapacitors) εμφανίζουν τα χαρακτηριστικά τόσο των πυκνωτών όσο και των ηλεκτροχημικών μπαταριών, με τη διαφορά ότι δεν λαμβάνει χώρα χημική αντίδραση, η οποία αυξάνει σημαντικά την απόδοση. Η αποθήκευση

ενέργειας στις διατάξεις αυτές επιτυγχάνεται δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια. Αυτή είναι η βασική αρχή που διέπει και τους πυκνωτές, με τη διαφορά ότι το μονωτικό υλικό στους υπερπυκνωτές αντικαθίσταται από ιοντικό ηλεκτρολυτικό αγωγό, στον οποίο τα ιόντα κινούνται κατά μήκος ενός αγωγισμού ηλεκτροδίου με μεγάλη ειδική επιφάνεια (διηθητικοί κόκκοι άνθρακα ή αγωγοί πολυμερών).

Η ενέργεια που ανακτάται είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη των πυκνωτών (5 Wh/kg έως 15 Wh/kg), ενώ εμφανίζεται και καλύτερη σταθερότητα χρόνου εκφόρτισης, εξαιτίας της αργής μετάθεσης των ιόντων στον ηλεκτρολύτη. Επίσης, η μέγιστη τάση λειτουργίας τους περιορίζεται σε μερικά volts ανά στοιχείο (2,5-3 V για χωρητικότητα της τάξης των 1500 F). Απαιτείται επίσης σειριακή σύνδεση για την επίτευξη τάσεων ικανών να υποστηρίξουν εφαρμογές ηλεκτρικής ισχύος καθώς και για τον σχηματισμό διατάξεων με ικανοποιητική αποθηκευτική χωρητικότητα 50-100 kW.[1]

Στην εικόνα 17 παρατίθεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός υπερπυκνωτή. Η βασική χωρική συμπεριφορά ενός υπερπυκνωτή εκφράζεται μέσω της χωρητικότητας C η οποία φαίνεται να μην είναι σταθερή αλλά μεταβλητή. Αυτό οφείλεται ανάμεσα στη εξάρτηση που παρατηρείται ανάμεσα στην τάση και τη χωρητικότητα. Η αύξηση της διαφοράς του δυναμικού που εφαρμόζεται σε έναν υπερπυκνωτή έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων κοντά στους οπλισμούς και λόγω των φαινομένων στους πυκνωτές διπλού στρώματος οδηγεί σε αύξηση της χωρητικότητας. Η αντίσταση R2 παράλληλα με την κύρια χωρητικότητα μοντελοποιεί την αυτοεκφόρτιση του πυκνωτή που συμβαίνει φυσιολογικά με το χρόνο λόγω διάχυσης των φορτίων. Η αντίσταση R1 δεν είναι παρά η αντίσταση σειράς του υπερπυκνωτή που οδηγεί στις παρατηρούμενες απώλειες κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Αυτό οφείλεται από τη μία στις μη ιδανικότητες των αγωγών που αποτελούν τους οπλισμούς και τις συνδέσεις μέσα στον υπερπυκνωτή, και από την άλλη στην ιδιαίτερη συμπεριφορά του διηλεκτρικού. Η αντίσταση R3 αποτελεί μοντελοποίηση του κυκλώματος εξισορρόπησης που προστατεύει από υπερτάσεις το κάθε στοιχείο του υπερπυκνωτή. Τα στοιχεία R_p C_p χρειάζονται για να μοντελοποιήσουν τη δυναμική συμπεριφορά του υπερπυκνωτή σε γρήγορες μεταβολές. [22]



Εικόνα 17: ισοδύναμο κύκλωμα ενός υπερπυκνωτή [22]

Στον πίνακα 9 γίνονται οι συγκρίσεις πυκνωτών και υπερπυκνωτών.

Πίνακας 9: Συγκρίσεις πυκνωτών και υπερπυκνωτών [32]

Πυκνωτής τύπου	Διηλεκτρικό	Χαρακτηριστικά / εφαρμογές	Μειονεκτήματα
Paper Πυκνωτές	εμποτισμένο χαρτί	Εμποτισμένο χαρτί με κερί, λάδι ή εποξική ρητίνη χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα για μεγάλους πυκνωτές. Χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές υψηλής τάσης.	Μεγάλο μέγεθος. Επίσης, το χαρτί είναι υγροσκοπικό απορροφά την υγρασία από τηνατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται.
Metallized Paper Πυκνωτές	Paper	Συγκριτικά μικρότεροι σε μέγεθος από πυκνωτές paper-foil	Κατάλληλο μόνο για μικρότερες εφαρμογές.
Πυκνωτής ταινίας PET	πολυεστέρας	Μικρότεροι σε μέγεθος από πυκνωτές πολυπροπυλενίου συγκρίσιμων προδιαγραφών. Έχουν σχεδόν πλήρως αντικατασταθεί από πυκνωτές χαρτιού για τις περισσότερες ηλεκτρονικές εφαρμογές DC με τάσεις λειτουργίας μέχρι 60.000 V και θερμοκρασίες λειτουργίας μέχρι 125 ° C.Χαμηλή απορρόφηση υγρασίας.	Μικρή θερμοκρασιακή σταθερότητα Ακατάλληλοι γιαRF εφαρμογές.
Πυκνωτής Kapton	Ταινία Kapton	Παρόμοιος με τον PET, αλλά έχει σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας (έως 250 ° C).	Υψηλότερο κόστος από το PET. Μικρή θερμοκρασιακή σταθερότητα Ακατάλληλοι γιαRF

			εφαρμογές
Πυκνωτής πολυστερενίου	Πολυστερενίο	Εξαιρετική σταθερότητα, χαμηλή υγρασία Ιδανικός για χαμηλής ισχύος RF και εφαρμογές σε αναλογικά συστήματα	Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας περιορίζεται σε περίπου 85 °C. Συγκριτικά μεγαλύτεροι σε μέγεθος.
Πυκνωτής με πολυκαρβονικά	Πολυκαρβονικά	Μπορεί να χρησιμοποιήσει την πλήρη τάση λειτουργίας σε όλο το εύρος θερμοκρασίας (-55 ° C έως 125 ° C)	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας περιορίζεται σε περίπου 125 ° C.
Πυκνωτές φιλμ πολυπροπυλενίου	Πολυπροπυλένιο	Εξαιρετικά χαμηλός συντελεστής διάχυσης, υψηλής διηλεκτρικής αντοχής. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας και εφαρμογές υψηλής ισχύος.	Πιο ευάλωτοι σε βλάβες από ανέβασμα της τάσης
Πυκνωτές πολυσουλφόνης	Πολυσουλφόνη	Μπορεί να αντέξει την πλήρη τάση συγκριτικά στις υψηλότερες θερμοκρασίες.	Περιορισμένης διαθεσιμότητας, το υψηλότερο κόστος
Πυκνωτές PTFE	Πολυτετρα-φθοροαιθυλένιο	Θερμοκρασίες λειτουργίας έως 250 °C, εξαιρετικά υψηλής αντίστασης και καλή σταθερότητα.	Μεγάλο μέγεθος και υψηλό κόστος σε σχέση με άλλους πυκνωτές.
Πυκνωτές ταινίας πολυαμιδίου	Πολυαμίδιο	Θερμοκρασίες λειτουργίας έως 200 ° C. Υψηλή αντίστασης, καλή σταθερότητα και χαμηλός συντελεστής διάχυσης.	Μεγάλου μεγέθους και υψηλού κόστους.
Πυκνωτές ταινίας μεταλλικών πλαστικών	Πολυεστέρας ή πολυκαρβονικά	Αξιόπιστοι και σημαντικά μικρότεροι σε μέγεθος	Οι λεπτές πλάκες μειώνουν την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος.
Πυκνωτές Mica	μίκα	Το διηλεκτρικό υλικό είναι αδρανές. Δεν αλλάζει φυσικά ή χημικά με το χρόνο.	Ευαίσθητοι στην υγρασία η οποία θα αυξήσει το συντελεστή ισχύος και θα μειώσει την αντίσταση.Υψηλότερο κόστος λόγω της έλλειψης υψηλής ποιότητας διηλεκτρικού υλικού.
Μεταλλικής Mica πυκνωτές	μίκα	παρομοίως	Υψηλό κόστος
Πυκνωτές γυαλιού	γυαλί	Εξαιρετικά αξιόπιστο, πολύ σταθερό, ανθεκτικό και με τη ραδιενεργό ακτινοβολία.	Υψηλό κόστος.
Class-I κεραμικοί πυκνωτές	Ενώσεις τιτανίου	Χαμηλού κόστους και μικρού μεγέθους και καλή αξιοπιστία. Διατίθεται σε τάσεις μέχρι 15.000 V	Αλλαγές στη χωρητικότητα με μεταβολές της εφαρμοζόμενης τάσης.
Class II-υψηλής διηλεκτρικής αντοχής κεραμικοί πυκνωτές	Ενώσεις βαρίου τιτανίου	Μικρότεροι της κλάσεως-τύπου I. Διατίθεται σε τάσεις μέχρι 50.000 V.	Δεν είναι τόσο σταθεροί όσο οι τύπου I σε σχέση με τη θερμοκρασία.
Πυκνωτές αλουμινίου	Οξειδίο του αργιλίου	Πολύ μεγάλη χωρητικότητα σε αναλογία όγκου, φθηνή.	Η διηλεκτρική διαρροή είναι μεγάλη, έχει μεγάλη εσωτερική αντίσταση και όρια αυτεπαγωγής.

			Μπορεί να διαρραγεί όταν υπερφορτωθεί ή υπερθερμανθεί. Περιορίζεται σε περίπου 500 V.
Πυκνωτές Λιθίου ιόντων	Ιόντα λιθίου	Οι πυκνωτές ιόντων λιθίου έχουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τις ηλεκτρικές στήλες Σε σύγκριση με τον πυκνωτή (EDLC), το LIC έχει υψηλότερη τάση εξόδου. Παρόμοιες πυκνότητες ισχύος, αλλά η ενεργειακή πυκνότητα της LIC είναι πολύ υψηλότερο.	Νέα τεχνολογία
Πυκνωτές τανταλίου	Οξειδίο τανταλίου	Μεγάλη χωρητικότητα για την αναλογία όγκου, μικρότερο μέγεθος, καλή σταθερότητα, ευρύ φάσμα θερμοκρασίας λειτουργίας. Οι στερεοί πυκνωτές τανταλίου έχουν πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά από τους ομολόγους τους σε υγρό.	Υψηλότερο κόστος από του αλουμινίου. Η τάση περιορίζεται σε περίπου 50 V.
(EDLC) υπερπυκνωτές	Λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη και ενεργού άνθρακα	Εξαιρετικά μεγάλη χωρητικότητα για την αναλογία του όγκου, μικρού μεγέθους, χαμηλής ESR. Διατίθεται σε εκατοντάδες ή και χιλιάδες farads. Μια σχετικά νέα τεχνολογία πυκνωτή. Κατάλληλος για υβριδικά οχήματα	Σχετικά υψηλό κόστος.
Πυκνωτές εναλλασσόμενο υ ρεύματος με έλαιο	Εμποτισμένο χαρτί με έλαιο	Πολύ μεγάλες χωρητικότητες για βιομηχανικές εφαρμογές AC για να αντέχουν μεγάλα ρεύματα και υψηλές τάσεις αιχμής.	Περιορίζεται σε εφαρμογές χαμηλής συχνότητας, λόγω των υψηλών διηλεκτρικών απωλειών σε υψηλότερες συχνότητες.
Πυκνωτές συνεχούς ρεύματος με έλαιο	Συνδυασμός χαρτιού ή ταινίας χαρτιού - πολυεστέρα	DC εφαρμογές	Μεγαλύτερος από ομολόγους.
Πυκνωτές ενεργειακής αποθήκευσης	ρευστά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς με εκτεταμένες πλάκες αλουμινίου	Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν διακεκομμένη λειτουργία, ηλεκτρομαγνητική διαμόρφωση, παλμικά λείζερ.	μεγάλο και βαρύ. Σημαντικά χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από αυτόν με πολυμερές διηλεκτρικό
Πυκνωτές Κενού	Θάλαμοι από γυαλί ή κεραμικά με ομόκεντρα κυλινδρικά ηλεκτρόδια.	Εξαιρετικά χαμηλές απώλειες. Χρησιμοποιείται για υψηλής τάσης μεγάλης ισχύος RF εφαρμογές.	Πολύ υψηλό κόστος, εύθραστοι και σχετικά χαμηλής χωρητικότητας.

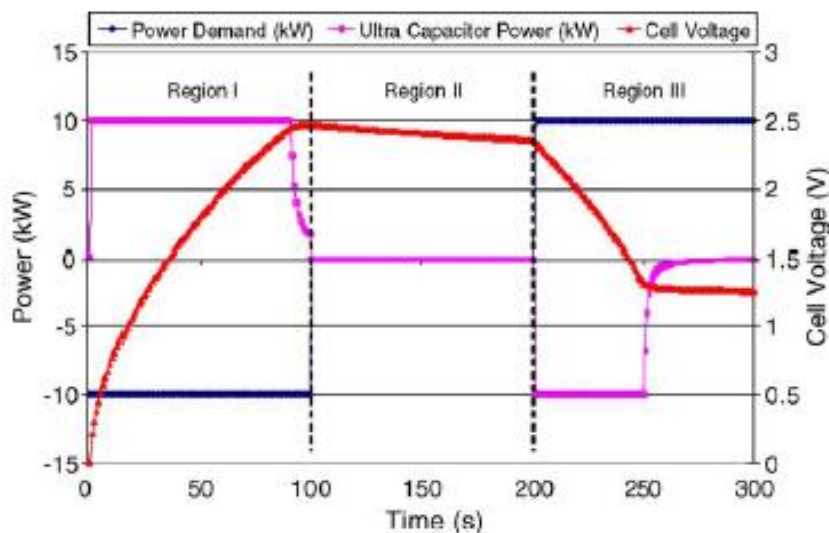
Μελλοντικές εξελίξεις

Οι κύριοι τομείς που παρουσιάζουν προκλήσεις είναι οι εξής:

- ανάπτυξη ηλεκτροδίου
 - μεγιστοποίηση της διαβρεγμένης επιφάνεια και αύξηση της διαμέτρου των πόρων

- μείωση της αντίστασης σειράς μέσω της εξάλειψης των αντιστάσεων με μονολιθικά ηλεκτρόδια και
 - ανάπτυξη σύνθετων ηλεκτροδίων (άνθρακα, πολυμερών).
2. ανάπτυξη ηλεκτρολυτών
- ελαχιστοποίηση του ιξώδους των ρευστών σε συνδυασμό με μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης της διαφοράς δυναμικού. [18]

Ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα φόρτισης/αποφόρτισης για ένα σύστημα που περιέχει υπερπυκνωτή και 100 κυψέλες φαίνεται στην εικόνα 18. Η περιοχή I παρουσιάζει τη φόρτιση και τη συνακόλουθη πτώση ισχύος του υπερπυκνωτή καθώς η τάση κυψέλης πλησιάζει τα 2,5 V. Αυτό χρησιμεύει σε περίπτωση υπερφόρτισης του υπερπυκνωτή. Στην περιοχή II, το σύστημα δε μεταβάλλεται. Η τάση κυψέλης πέφτει κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, λόγω της διαρροής ρεύματος. Στην περιοχή III, η ζήτηση από τον υπερπυκνωτή αυξάνεται σε 10 kW. Το σύστημα μπορεί να καλύψει αυτή τη ζήτηση για περίπου 50 s, έως ότου η τάση κυψέλης πέσει στο χαμηλότερο όριο του 1,25 V.[23]



Εικόνα 18: Διάγραμμα φόρτισης/αποφόρτισης για ένα σύστημα που περιέχει υπερπυκνωτή και 100 κυψέλες [23]

3. Χαρακτηριστικά τεχνικών αποθήκευσης ενέργειας

Οι διάφορες τεχνικές αποθήκευσης ενέργειας κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Τον τύπο της εφαρμογής: μόνιμος ή φορητός
- Τη διάρκεια αποθήκευσης: περιορισμένη ή μακρά
- Τον τύπο παραγωγής: ανάγκη μέγιστης ενέργειας

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης, στα οποία βασίζεται η επιλογή των κριτηρίων σύγκρισης βρίσκονται παρακάτω.

3.1 Αποθηκευτική ικανότητα

Εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας μετά τη φόρτιση. Η εκφόρτιση είναι συχνά ατελής γι αυτό, η αποθηκευτική ικανότητα ορίζεται βάσει της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας W_{st} , η οποία είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που ανακτάται στην πραγματικότητα W_{ut} . Σε συνθήκες γρήγορης φόρτισης ή αποφόρτισης, η απόδοση μειώνεται σημαντικά και η ανακτώμενη ενέργεια μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από την χωρητικότητα του συστήματος. [1]

3.2 Διαθέσιμη ισχύς

Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι ενδεικτική της δομής και του μεγέθους του ηλεκτροκινητήρα στην αλυσίδα αποθήκευσης ενέργειας. Γενικά εκφράζεται ως μια μέση τιμή καθώς επίσης και σαν μέγιστη τιμή, η οποία χρησιμοποιείται συχνά για να αναπαραστήσει τη μέγιστη ισχύ φόρτισης ή αποφόρτισης P_{max} (W).

3.3 Βάθος αποφόρτισης ή ρυθμός μετάδοσης ενέργειας

Η αποθήκευση της ενέργειας είναι μια αργή διαδικασία που πρέπει όμως να απελευθερώνει την ενέργεια γρήγορα ανάλογα με τη ζήτηση. Η ενέργεια πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμη κατά τις ώρες αιχμής.

3.4 Χρόνος αποφόρτισης

Αντιστοιχεί στη διάρκεια εκφόρτισης της μέγιστης ισχύος και υπολογίζεται:

$$\tau(s) = W_{st}/P_{max}. \quad (20)$$

Εξαρτάται από το βάθος αποφόρτισης καθώς και από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. [1]

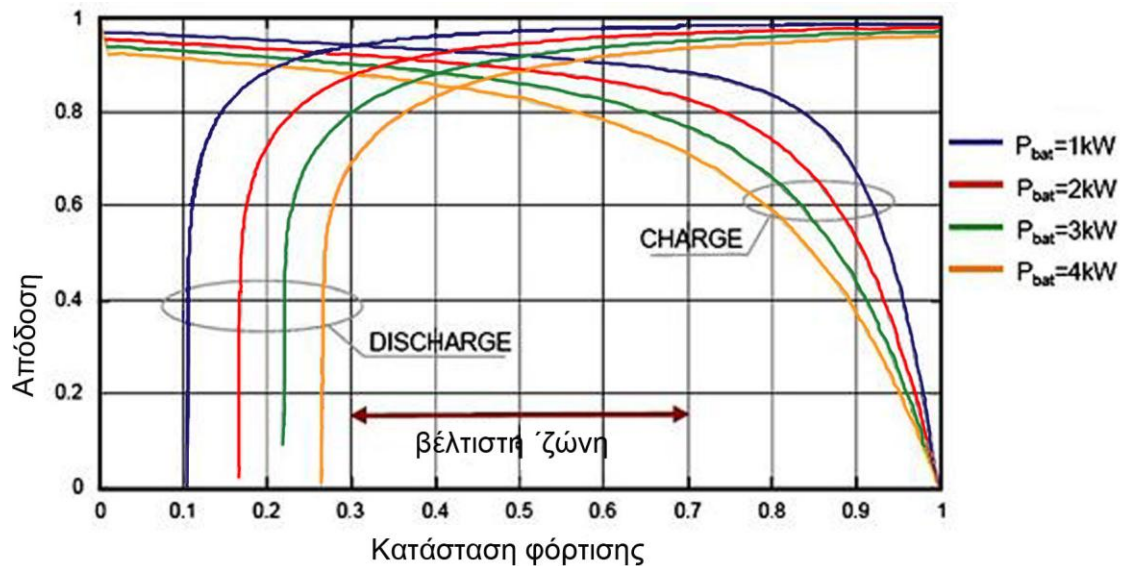
3.5 Αποδοτικότητα

Ο βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος μεταξύ της ενέργειας που απελευθερώνεται και της αποθηκευμένης ενέργειας:

$$\eta = W_{ut}/W_{st}. \quad (21)$$

Βέβαια, ο ορισμός αυτός είναι συχνά απλοποιημένος εξαιτίας του ότι βασίζεται σε ένα μόνο σημείο λειτουργίας. Επιπλέον, τα συστήματα αποθήκευσης εμφανίζουν απώλειες φόρτισης, έλλειψης φορτίου και αυτό-εκφόρτισης. Συνεπώς, ο ορισμός του βαθμού απόδοσης πρέπει να βασίζεται σε έναν ή και περισσότερους ρεαλιστικούς κύκλους λειτουργίας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Ένα σύστημα αποθήκευσης για να είναι ανταγωνιστικό, θα πρέπει να εμφανίζει ικανοποιητικό συνολικό βαθμό απόδοσης. Αυτό σημαίνει ότι, για τη βέλτιστη λειτουργία, η αλυσίδα μετάδοσης ενέργειας θα πρέπει να έχει περιορισμένες απώλειες όσον αφορά στη μεταφορά ενέργειας και στην αυτοεκφόρτιση.

Στην πραγματικότητα, οι παράμετροι λειτουργίας των συστημάτων αποθήκευσης μεταβάλλονται με το σημείο λειτουργίας και ειδικότερα εξαρτώνται άμεσα από την εκάστοτε κατάσταση φόρτισης. (Εικόνα 19)[1]



Εικόνα 19: Αποδοτικότητα και κατάσταση λειτουργίας [1]

3.6 Ανθεκτικότητα

Η ανθεκτικότητα αναφέρεται στο πόσες φορές η μονάδα αποθήκευσης είναι σε θέση να δώσει την ποσότητα ενέργειας για την οποία έχει σχεδιαστεί, μετά από κάθε επαναφόρτιση, εκφραζόμενη ως ο μέγιστος αριθμός κύκλων N (ένας κύκλος αντιστοιχεί σε μία φόρτιση και μια αποφόρτιση).

Όλα τα συστήματα αποθήκευσης υπόκεινται σε κόπωση ή φθορά από τη χρήση. Αυτό επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του συστήματος όπως και η θερμική υποβάθμιση. [1]

3.7 Αυτονομία

Η αυτονομία αναφέρεται στο μέγιστο χρονικό διάστημα στο οποίο το σύστημα μπορεί να εκλύει συνεχώς ενέργεια. Ορίζεται ως ο λόγος της αποθηκευμένης ενέργειας προς τη μέγιστη ισχύ αποφόρτισης:

$$\alpha = W_{ut}/P_d. \quad (22)$$

Εξαρτάται από την τεχνολογία του συστήματος καθώς και από το είδος της εφαρμογής. [1]

3.8 Κόστη

Το κόστος επένδυσης και λειτουργίας είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να υπολογίζονται καθ' όλη την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του συστήματος.

Γενικά, τα κόστη επένδυσης προκύπτουν ακολούθως:

$$C = C_1 W_{ut} + C_2 P_d \quad (23)$$

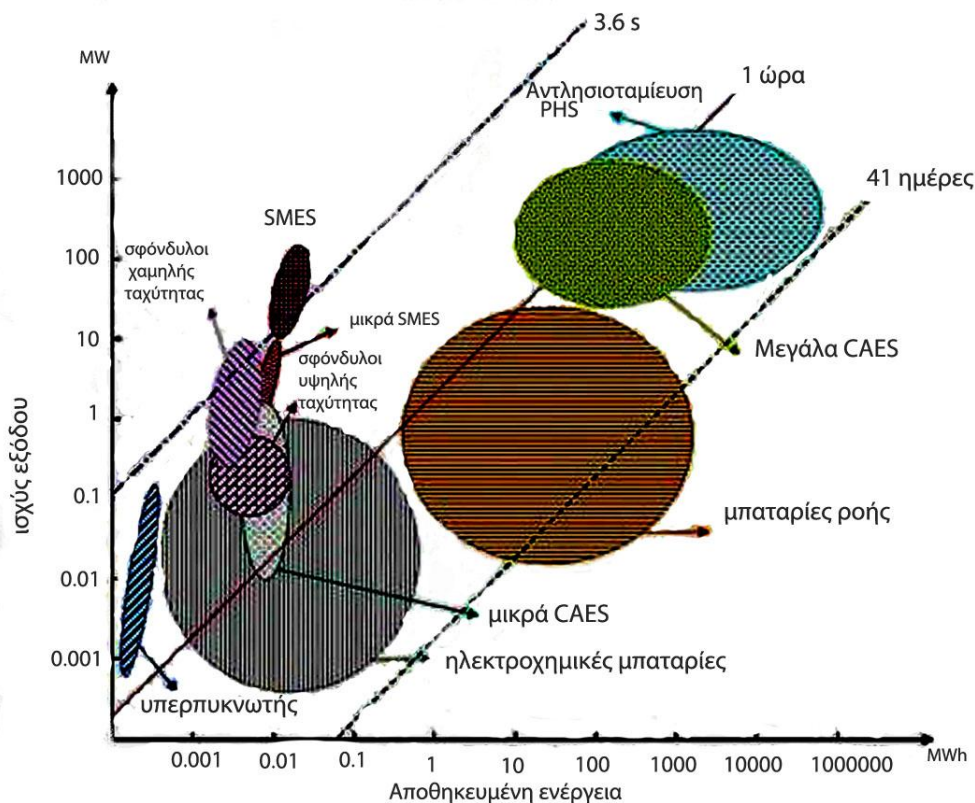
όπου C_1 (€/kWh), C_2 (€/kWh) και P_d αντιπροσωπεύουν το κόστος της μονάδας για τη συνολική ικανότητα αποθήκευσης, την ισχύ εκφόρτισης και την ονομαστική ισχύ εκφόρτισης αντίστοιχα. Τα κόστη λειτουργίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος είναι ανάλογα με τα αντίστοιχα της επένδυσης (της τάξης του 40% του κόστους επένδυσης για 20 έτη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας), για συνολικό κόστος το οποίο προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$C_t = (aC_1 + C_2)P_d \quad (24)$$

όπου a είναι η αυτονομία του συστήματος.[1]

3.9 Προσαρμοστικότητα στην πηγή ενέργειας

Ένα σύστημα αποθήκευσης για να έχει υψηλή απόδοση, πρέπει να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στον εκάστοτε τύπο της εφαρμογής και στο είδος της παραγωγικής μονάδας.



Εικόνα 20: Τομείς εφαρμογής των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ανάλογα με την αποθηκευμένη ενέργεια και την παραγόμενη ισχύ [1]

3.10 Ενεργειακή πυκνότητα

Η ενεργειακή πυκνότητα αναπαριστά το μέγιστο ποσό ενέργειας που μπορεί να συσσωρευτεί ανά μονάδα μάζας ή όγκου του συστήματος αποθήκευσης, και δείχνει τη σημασία της μάζας και του όγκου για συγκεκριμένες εφαρμογές.

3.11 Αξιοπιστία

Αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες, επειδή αποτελεί εγγύηση για την ικανοποίηση της ενεργειακής ζήτησης.

3.12 Άλλα χαρακτηριστικά

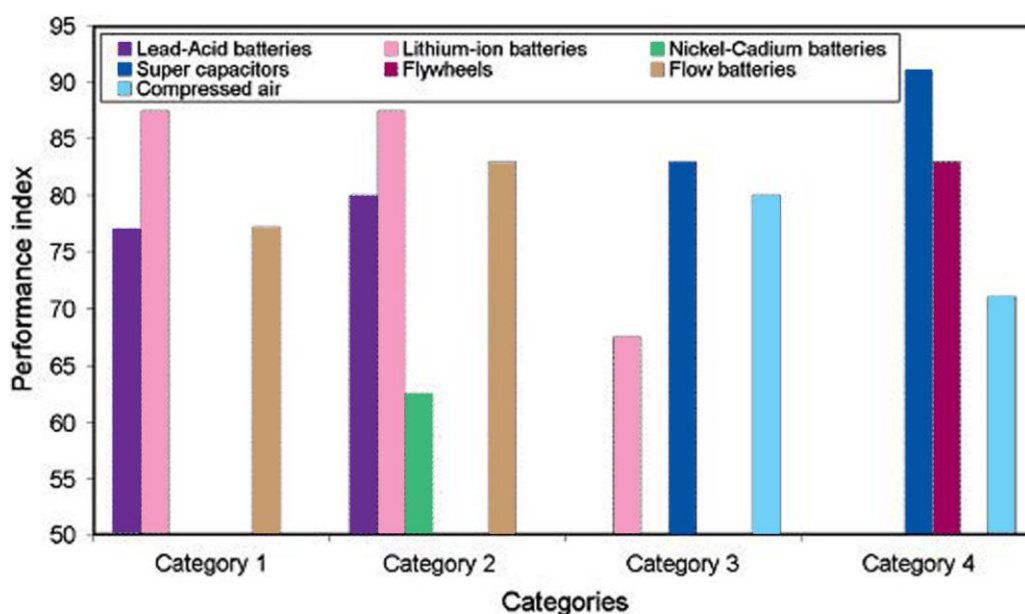
Η ευκολία συντήρησης, ο απλός σχεδιασμός, η λειτουργική ευελιξία καθώς και ο μικρός χρόνος απόκρισης, είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος αποθήκευσης.[1]

4. Σύγκριση των διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας

Για να γίνει η σύγκριση της απόδοσης των διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης της ενέργειας, έγινε ανάλυση μιας σειράς κριτηρίων όπως το κόστος, η ενεργειακή πυκνότητα, η ανθεκτικότητα, η αποδοτικότητα, η ειδική ισχύς. Αυτά ορίζουν ένα «δείκτη απόδοσης» για τέσσερις κατηγορίες εφαρμογής.

1. Μικρής ισχύος εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές, κυρίως για την τροφοδοσία διατάξεων μετατροπής της ενέργειας
2. Μεσαίας ισχύος εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές
3. Εφαρμογές σύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτροδότησης για τον έλεγχο των αιχμών του φορτίου
4. Εφαρμογές ελέγχου της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος. [1]

Στην εικόνα 21 παρουσιάζεται ο δείκτης απόδοσης που προκύπτει για επτά από τις εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης (εκτός της αντλησιοταμίευσης, της θερμικής αποθήκευσης και των κυβελών καυσίμου) και για τις τέσσερις προαναφερθείσες κατηγορίες εφαρμογών. Για τις δύο πρώτες κατηγορίες μικρής και μέσης ισχύος εφαρμογών, καλύτερη λύση φαίνεται να αποτελούν οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, ενώ για τις εφαρμογές διασύνδεσης και ελέγχου, η λύση των υπερπυκνωτών ενδείκνυται ως η καταλληλότερη.

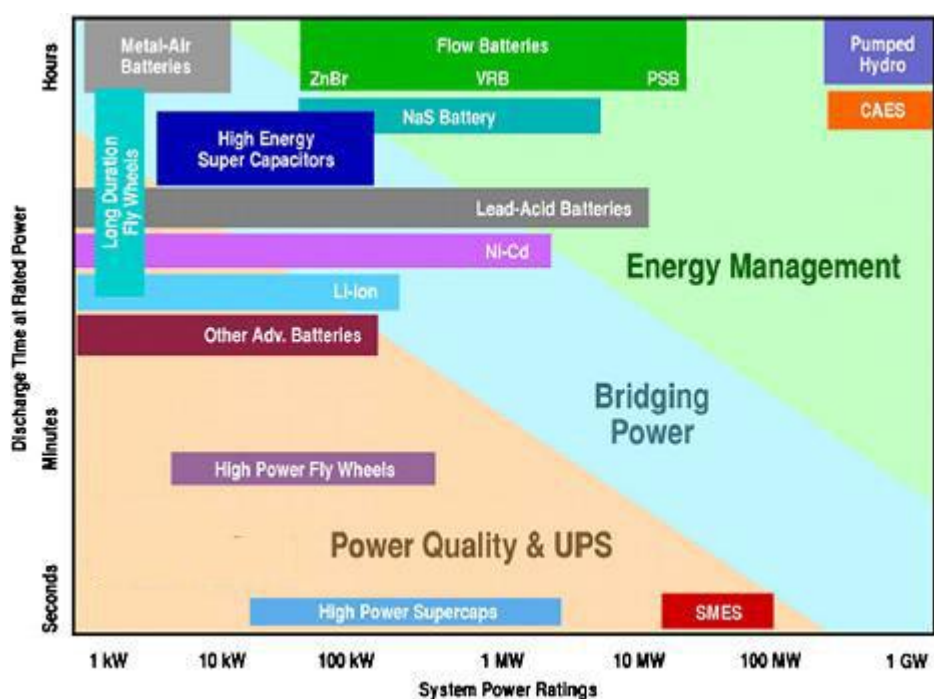


Εικόνα 21: Δείκτης απόδοσης των εναλλακτικών τεχνολογιών αποθήκευσης για τις τέσσερις κατηγορίες εφαρμογών [1]

4.1 Σύγκριση ισχύος σαν συνάρτηση του πεδίου εφαρμογής

Οι εφαρμογές μεγάλης κλίμακας μόνιμης αποθήκευσης ενέργειας ταξινομούνται σε τρεις κύριες λειτουργικές κατηγορίες (εικόνα 22):

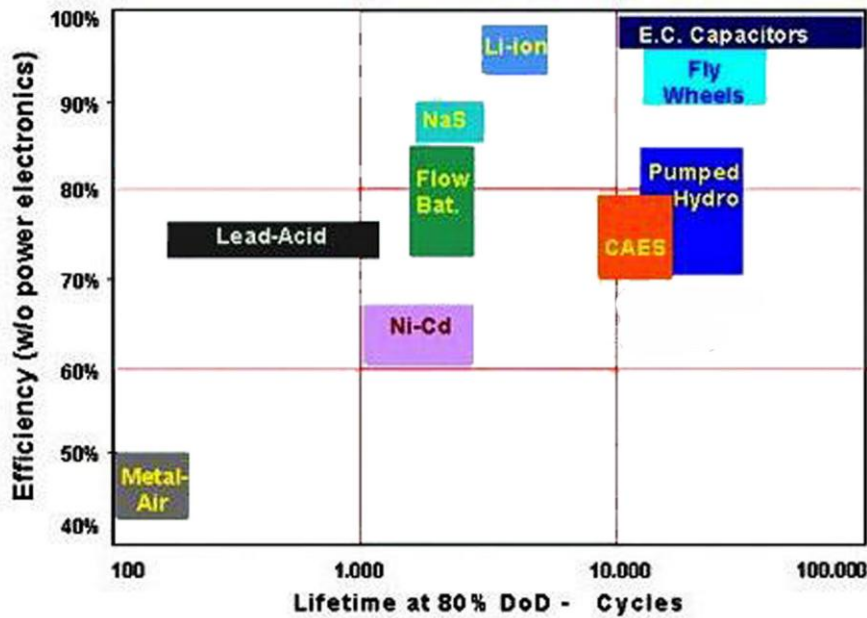
- *Απαιτήση ποιότητας ενέργειας.* Η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται για λίγα δευτερόλεπτα, για τη διασφάλιση της ποιότητας.
- *Προσωρινή ή ενδιάμεση αποθήκευση.* Η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται για λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά, για τη διασφάλιση της συνοχής από μια πηγή σε μια άλλη.
- *Διαχείριση δικτύου.* Τα συστήματα αποθήκευσης, στις συγκεκριμένες εφαρμογές, χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση του συγχρονισμού μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας.



Εικόνα 22: Κατανομή των τεχνολογιών αποθήκευσης σαν συνάρτηση του τομέα εφαρμογής [1]

4.2 Σύγκριση ενεργειακής απόδοσης ανά κύκλο

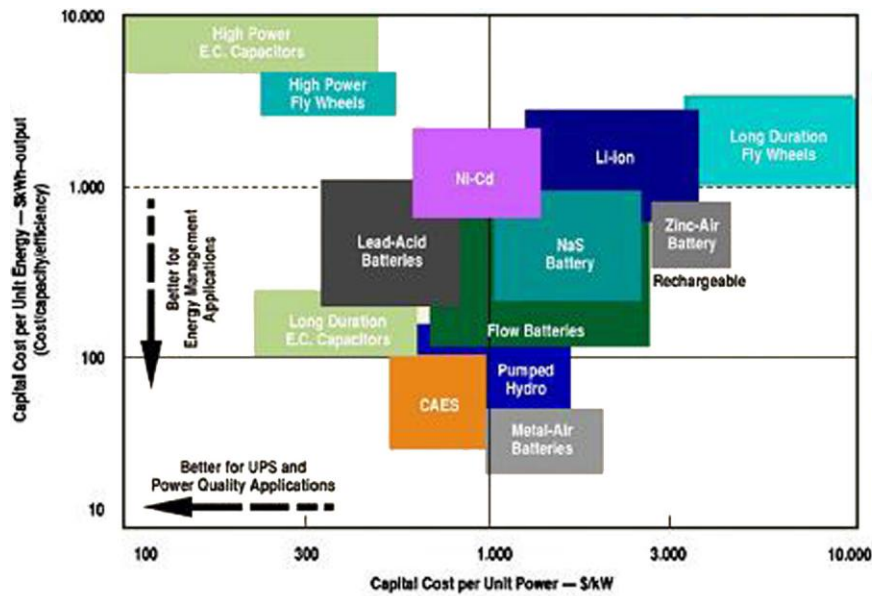
Η ενεργειακή απόδοση και η διάρκεια ζωής (μέγιστος αριθμός κύκλων) είναι δύο ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες αφού επηρεάζουν το συνολικό κόστος αποθήκευσης. Χαμηλή απόδοση προκαλεί αύξηση του κόστους επειδή μόνο ένα μικρό ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επίσης, η μικρή διάρκεια ζωής αυξάνει το μακροπρόθεσμο κόστος λόγω της συχνής αντικατάστασης του συστήματος αποθήκευσης.



Εικόνα 23: Κατανομή εναλλακτικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας σαν συνάρτηση της ενεργειακής απόδοσης και της προσδοκώμενης διάρκειας ζωής [1]

4.3 Σύγκριση κόστους επένδυσης

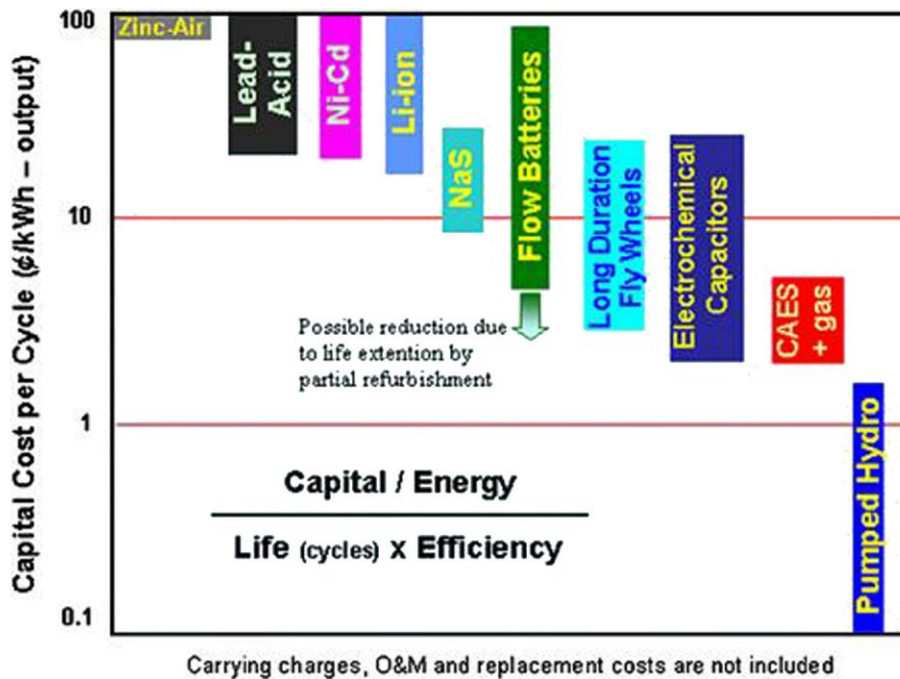
Το κόστος επένδυσης που σχετίζεται με τον τύπο του συστήματος αποθήκευσης είναι σημαντική οικονομική παράμετρος και επηρεάζει το συνολικό κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Κάποια συστήματα αποθήκευσης είναι επικερδή μόνο αν παράγουν ένα ορισμένο ελάχιστο ποσό ενέργειας. Για παράδειγμα, παρά το γεγονός ότι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι σχετικά φθηνές, δεν αποτελούν τη φθηνότερη εναλλακτική λύση αποθήκευσης εξαιτίας της σχετικά χαμηλής ανθεκτικότητάς τους. Είναι φανερό ότι το υψηλότερο κόστος επένδυσης ανά μονάδα ενέργειας εμφανίζουν οι υπερπυκνωτές υψηλής ισχύος, ακολουθούμενοι από τις διατάξεις σφονδύλου.



Εικόνα 24: Κατανομή των τεχνολογιών αποθήκευσης σαν συνάρτηση του κόστους επένδυσης ανά μονάδα ισχύος και ενέργειας

4.3.1 Σύγκριση του κόστους επένδυσης ανά κύκλο φόρτισης εκφόρτισης

Το κόστος ανά κύκλο θα μπορούσε να είναι ο καλύτερος τρόπος να αξιολογηθεί το κόστος ενός συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης που σχεδιάστηκε για συχνές εφαρμογές φόρτισης εκφόρτισης. Η εικόνα 25 παρουσιάζει το κόστος ανά κύκλο, λαμβάνοντας υπόψη την ανθεκτικότητα και την αποδοτικότητα



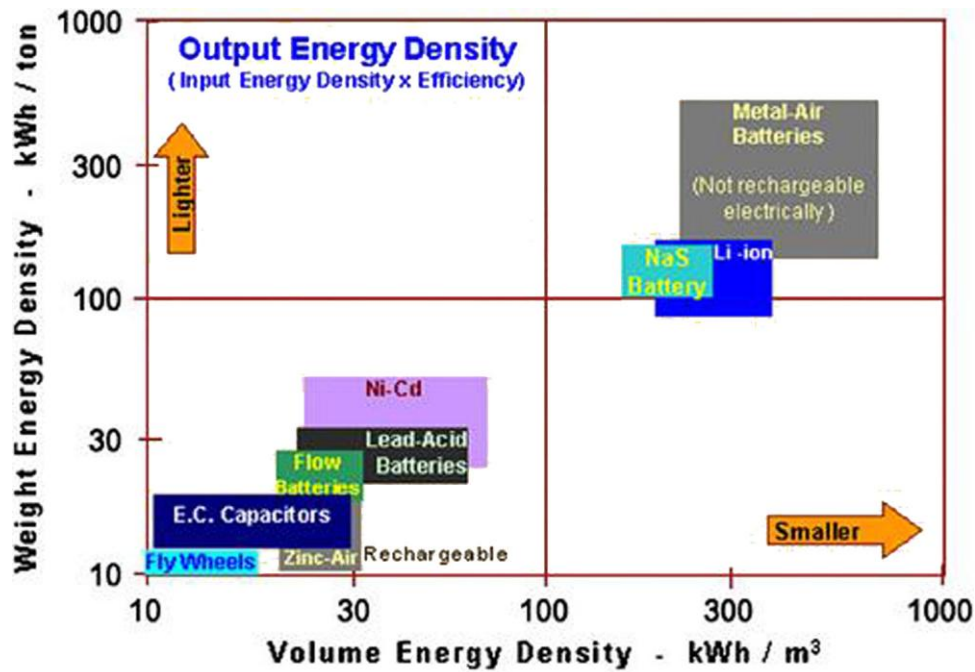
Εικόνα 25: Κόστος ανά κύκλο, λαμβάνοντας υπόψη την ανθεκτικότητα και την αποδοτικότητα [1]

4.4 Σύγκριση ενεργειακής πυκνότητας

Οι διαφορετικές τεχνικές αποθήκευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σαν συνάρτηση της διαθεσιμότητας της ισχύος και της μέγιστης ενέργειας ανά λίτρο (ογκομετρική πυκνότητα) ή ανά χιλιόγραμμο (πυκνότητα μάζας). Η σύγκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την βιομηχανία μεταφορών, για φορητές συσκευές καθώς και για απομακρυσμένα μέρη.

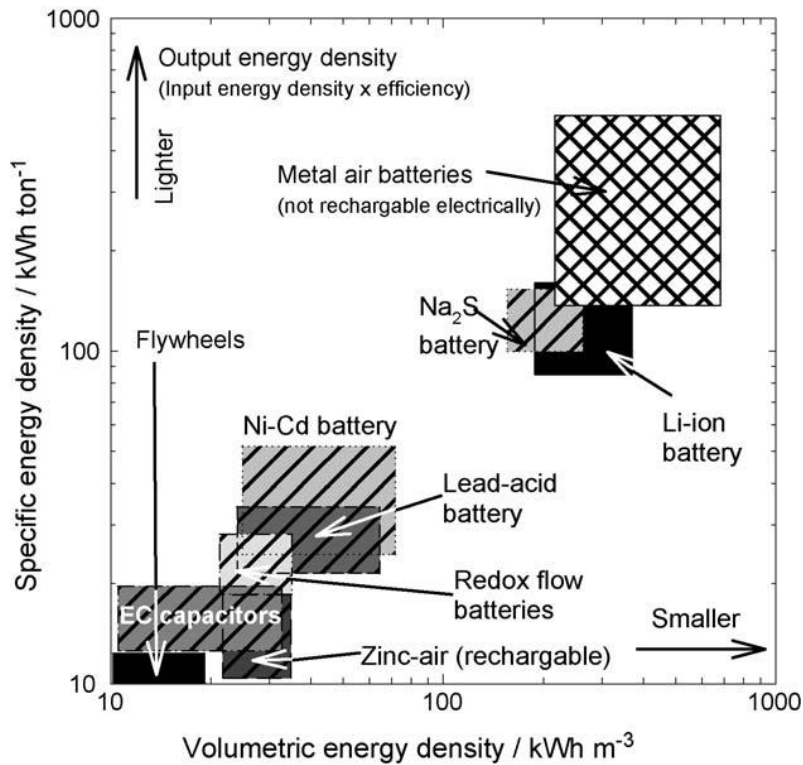
Η μάζα είναι σημαντική παράμετρος για μόνιμες εφαρμογές όσον αφορά στο κόστος των υλικών. Ο όγκος πάλι είναι σημαντικός όταν το σύστημα πρόκειται να εγκατασταθεί σε περιορισμένο χώρο, όπως για παράδειγμα σε αστικές περιοχές. Αυξάνοντας τον όγκο ενός συστήματος αποθήκευσης απαιτούνται μεγαλύτερη περιοχή εγκατάστασης και περισσότερο υλικό, με συνέπεια την αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος.

Στην εικόνα 26 φαίνεται η κατανομή των τεχνολογιών αποθήκευσης σαν συνάρτηση της πυκνότητας όγκου και μάζας της αποθηκευμένης ενέργειας για εφαρμογές μικρής κλίμακας. Συμπεραίνει κανείς ότι οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα είναι η καλύτερη λύση αναφορικά με την ενεργειακή πυκνότητά τους, ενώ οι σφόνδυλοι λόγω του μεγέθους τους κατατάσσονται στην τελευταία θέση.



Εικόνα 26: Κατανομή των τεχνολογιών αποθήκευσης σαν συνάρτηση της πυκνότητας όγκου και μάζας της αποθηκευμένης ενέργειας για εφαρμογές μικρής κλίμακας [1]

Οι μπαταρίες αποτελούν μια τεχνολογία υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, χαμηλής ισχύος όμως. Οι υπερπυκνωτές ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή μία τεχνολογία υψηλής ισχύος-, χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ των μπαταριών και του κοινού πυκνωτή όσον αφορά στην πυκνότητα της ενέργειας. Μπορούν λοιπόν να χρησιμοποιηθούν σε υβριδικά ενεργειακά συστήματα αποθήκευσης για να συμπληρώσουν τις ηλεκτρικές στήλες και να προσφέρουν σε περιόδους ασυνεχούς λειτουργίας. Είναι συνεπώς σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν προσφέρουν εναλλακτική λύση αλλά λειτουργούν συνεργιστικά στις ηλεκτρικές στήλες.



Εικόνα 27: Ειδική ενεργειακή και ογκομετρική πυκνότητα για διαφορετικά συστήματα μπαταριών [9]

Στο σχήμα παρουσιάζεται η ενεργειακή πυκνότητα των κυψελών ροής οξειδοαναγωγής σε σύγκριση με τα άλλα συστήματα αποθήκευσης μέσω μπαταριών. Είναι φανερό ότι η ενεργειακή πυκνότητα των κυψελών ροής είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη των μπαταριών μετάλλου-αέρα, ιόντων λιθίου, Na₂S, Ni-Cd και μολύβδου-οξέος. Από την άλλη μεριά πρέπει να ληφθούν υπόψη τα πλεονεκτήματα των κυψελών έναντι των κλασικών μπαταριών τα οποία προαναφέρθηκαν, καθώς επίσης και ζητήματα που αφορούν την υγεία και την ασφάλεια από τη χρήση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.

Οι υπάρχουσες δυνατότητες των κυψελών είναι αρκετά ικανοποιητικές, ώστε να αποτελέσουν το κύριο μέσο αποθήκευσης της ενέργειας σε αυτόνομα συστήματα παραγωγής, ενώ φαίνεται ότι οι κυψέλες ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου και μολύβδου-οξέος υπερτερούν έναντι των άλλων τεχνολογιών κυψελών.[9]

5. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Η ραγδαία εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας τα τελευταία 100 χρόνια, έχει προσφέρει πάρα πολλά νέα προϊόντα και υπηρεσίες, με γνώμονα πάντα τη βελτίωση της ποιότητας ζωής του ανθρώπινου είδους.

Βέβαια, κανένας δε μπορεί να αμφισβητήσει το γεγονός ότι τα νέα τεχνολογικά δεδομένα έχουν διαμορφώσει ένα περιβάλλον για τον άνθρωπο, που παρουσιάζει ποικίλες επιπτώσεις για τη ζωή του, τόσο θετικές όσο και αρνητικές.

Οι εκτεταμένες ρυπάνσεις και μολύνσεις του φυσικού περιβάλλοντος από την ανάπτυξη των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, έχουν δημιουργήσει μεγάλη ανησυχία τόσο στην επιστημονική κοινότητα όσο και γενικότερα στην ανθρώπινη κοινωνία. Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για αυτό το θέμα οδήγησε τους επιστήμονες στην έρευνα για την ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων, οι οποίες θα κάνουν κατανοητές αλλά και θα μειώσουν τις αρνητικές επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο περιβάλλον.

Μία από αυτές τις μεθόδους, η οποία θεωρείται σήμερα ως η πιο ολοκληρωμένη είναι η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Επειδή, λοιπόν, είναι η πιο έγκριτη και διεθνώς αποδεκτή μέθοδος εξέτασης του περιβαλλοντικού προφίλ ενός προϊόντος, για αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως.

Το πλαίσιο μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή της ανάλυσης κύκλου ζωής σε οποιοδήποτε προϊόν προτάθηκε και οριοθετήθηκε από τον οργανισμό SETAC (Society of Environmental Toxicology and Applied Chemistry). Ο SETAC ορίζει την Α.Κ.Ζ. ως «μία τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα, προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Στη συνέχεια εκτιμώνται οι επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και αναγνωρίζονται οι δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων. Η ανάλυση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διεργασίας ή της δραστηριότητας: εξαγωγή και επεξεργασία πρώτων υλών, κατασκευή, μεταφορά και διανομή, χρήση, πιθανή επαναχρησιμοποίηση, συντήρηση, ανακύκλωση και τελική απόρριψη. Όπως άλλωστε χαρακτηριστικά λέγεται, η Α.Κ.Ζ. είναι μία αναλυτική και λεπτομερής μελέτη του προϊόντος ή διεργασίας από την «κούνια μέχρι το θάνατο». Δηλαδή αναλύονται τα διάφορα στάδια από τα οποία περνάει το προς εξέταση προϊόν, από την γέννησή του μέχρι την τελική απόρριψή του.

Το σημαντικότερο πρόβλημα που προκύπτει στην ανάλυση και μελέτη προϊόντων είναι ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να προσαρμοστούν οι οικονομικοί και

περιβαλλοντικοί περιορισμοί στο σχεδιασμό και στη λειτουργία των φυσικοχημικών διεργασιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να έχουμε ένα ομοιογενές αποτέλεσμα θα πρέπει να ποσοτικοποιήσουμε την περιβαλλοντική ρύπανση και μάλιστα με οικονομικούς συντελεστές βαρύτητας. Σε αυτό ακριβώς το σημείο βρίσκεται η υπεροχή της Α.Κ.Ζ. σε σχέση με τις άλλες μεθόδους μελέτης προϊόντων. Η μέθοδος της Α.Κ.Ζ. αποτελεί ένα εργαλείο με εξαιρετικές δυνατότητες για ολοκληρωτική ανάλυση παραγωγικών διαδικασιών και προϊόντων λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις εσωτερικές διεργασίες αλλά και την επεξεργασία των εξερχόμενων ροών. Ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα συνεκτίμησης των οικονομικών μεγεθών.

5.1 Στάδια κύκλου ζωής

Η ανάλυση που γίνεται στην Α.Κ.Ζ. εξετάζει το προϊόν από τη βάση της παραγωγής του μέχρι την τελική του διάθεση. Αναλυτικά όλα τα ενδιάμεσα στάδια είναι:

- i. Απόκτηση πρώτων υλών
- ii. Κατασκευή (υλικών και προϊόντων)
- iii. Συσσκευασία / Τυποποίηση
- iv. Μεταφορά / Διανομή
- v. Χρήση / Επαναχρησιμοποίηση / Συντήρηση
- vi. Ανακύκλωση / Ανάκτηση αποβλήτων
- vii. Τελική διάθεση / Απόρριψη

5.2 Μεθοδολογία

Για να γίνει σωστά μια Α.Κ.Ζ. πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βασικά σημεία.

- i. Προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης
- ii. Απογραφή δεδομένων
- iii. Εκτίμηση Επιπτώσεων
- iv. Εκτίμηση Βελτιώσεων

5.3 Προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης

Το πρώτο τμήμα μιας μελέτης Α.Κ.Ζ. είναι ο προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της (Goal Definition and Scoring). Εδώ πρέπει να καθοριστεί ο σκοπός της μελέτης, το αντικείμενό της, η λειτουργική μονάδα και τέλος να υιοθετηθεί μία

διαδικασία εκτίμησης της ποιότητας δεδομένων. Οι πληροφορίες και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια της ανάλυσης πρέπει να αναγνωρίζονται εύκολα κατά τον προσδιορισμό του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης.

5.3.1 Ο Σκοπός της μελέτης

Όταν γίνεται μια Α.Κ.Ζ., είναι απαραίτητο στην αρχή της μελέτης να οριστεί ξεκάθαρα ο σκοπός της μελέτης. Είναι ανάγκη να διασαφηνιστεί η αιτία διεξαγωγής της Α.Κ.Ζ. αλλά και η σκοπιμότητα της χρήσης των αποτελεσμάτων.

Στην παρούσα ανάλυση κύκλου ζωής, μελετώνται οι ενεργειακές και περιβαλλοντικές παράμετροι που συνοδεύουν τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

5.3.2 Το Αντικείμενο της Α.Κ.Ζ.

Το αντικείμενο μιας μελέτης καθορίζει το σύστημα, τα όρια, τις απαιτήσεις δεδομένων, τις υποθέσεις και τους περιορισμούς. Πρέπει να καθορίζεται με λεπτομέρεια, ώστε να εξασφαλίζει το απαιτούμενο εύρος και βάθος ανάλυσης. Είναι επίσης απαραίτητο να συμπεριληφθεί μια εκτίμηση της μεταβλητότητας των δεδομένων, εκτός της μέσης τιμής. [24]

5.4 Η Λειτουργική μονάδα

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία σε μια μελέτη κύκλου ζωής είναι η ξεκάθαρη διατύπωση της λειτουργικής μονάδας. Αποτελεί ένα βήμα “κλειδί” για την αποφυγή ασαφειών κατά τη διατύπωση του σκοπού και του αντικειμένου. Σημαντικό είναι να καθορίζεται πλήρως, να είναι μετρήσιμη και σχετική με τα δεδομένα εισόδου και εξόδου. Η λειτουργική μονάδα είναι ένα μέτρο απόδοσης του υπό μελέτη συστήματος που στην προκειμένη περίπτωση είναι η μπαταρία ιόντος-λιθίου.

Η λειτουργική μονάδα ορίστηκε μια 10 kWh μπαταρία για ένα όχημα r_{hev} με 3000 κύκλους φόρτισης με 80% μέγιστη αποφόρτιση και με διάρκεια ζωής 200,000 km. Μια τέτοια μπαταρία ζυγίζει 107 kg, δηλαδή η ενεργειακή πυκνότητα είναι 93 Wh/kg.

5.5 Μοντελοποίηση

Η μοντελοποίηση βασίζεται σε 10 kWh μπαταρία που αποτελείται από 100 κυψέλες σε σειρά δίνοντας 370 V. Το βάρος των υλικών της κυψέλης λαμβάνεται από την βιβλιογραφία. Στον πίνακα 10 απεικονίζονται τα τμήματα της κυψέλης, το υλικό από

το οποίο αποτελείται κάθε τμήμα , καθώς επίσης και το αντίστοιχο βάρος τους σε διάλυμα N-methyl-2-pyrrolidone και νερού.

Πίνακας 10: Βάρος των υλικών [25]

Τμήμα κυψέλης	Υλικό	Βάρος με διάλυμα σε NMP (gr)	Βάρος με διάλυμα σε νερό (gr)
Κάθοδος	LiFePO ₄	422	422
Κάθοδος	Aluminum foil	19	19
Κάθοδος	Carbon black	27	27
Κάθοδος	PVDF	28	0
Κάθοδος	Styrene acrylate latex	0	35
Ηλεκτρολύτης	Ethylene glycol dimethylether	157	157
Ηλεκτρολύτης	Lithium salt (Lithium chloride)	28	28
Διαχωριστής	Polypropylene	9	9
Διαχωριστής	Polyethylene	9	9
Ηλεκτρονικά	Transistor	10	10
Ηλεκτρονικά	Resistor	10	10
Άνοδος	Graphite	169	169
Άνοδος	Carbon black	0	5
Άνοδος	Copper	46	46
Άνοδος	PVDF	21	0
Άνοδος	Styrene butadiene latex	0	6
Περιτύλιγμα	Polypropylene	5	5
Περιτύλιγμα	Aluminum foil	7	7
Σύνολο		967	965

Κάθοδος

Η κάθοδος είναι από LiFePO₄, αναμεμειγμένη με το διαλύτη NMP που είναι πτητικός, εύφλεκτος, απορροφάται εύκολα από το δέρμα και υπάρχουν υποψίες ότι προκαλεί γενετικές βλάβες. Στο μοντέλο δεν έχουν ληφθεί υπόψιν τυχόν διαφυγές και επιπλέον έχει γίνει προσπάθεια αντικατάστασης του με νερό ως διαλύτη.[25]

Κατασκευή LiFePO₄

Για τη δημιουργία του χρησιμοποιείται ανθρακικό λίθιο, LiCO₃. Υπολογίζονται 0,23 g LiCO₃ ανά γραμμάριο LiFePO₄. Η διαδικασία κατασκευής απαιτεί ενέργεια για δύο αυξήσεις θερμοκρασίας: πρώτα από 400-500 ° C ακολουθούμενη από λείανση και προσθέτοντας γραφίτη και στη συνέχεια μια τελική αύξηση θερμοκρασίας από 700-800 °C. Εάν υποτεθεί μια ειδική θερμοχωρητικότητα 0,9 kJ/kgK, οι δύο αυξήσεις θερμοκρασίας θα χρειαστούν περίπου 1 kJ. Επιπλέον, οι χημικές αντιδράσεις απαιτούν κάποια ενέργεια θα υπάρξουν απώλειες θερμότητας. Συνεπώς, συνολικά χρειάζονται 3 kJ / gr LiFePO₄. [25]

Άνοδος

Η άνοδος είναι γενικά κατασκευασμένη από γραφίτη με επικάλυψη χαλκού περίπου 14 μm πάχους. Για την άνοδο που γίνεται με νερό χρησιμοποιήθηκε συνδετικό υλικό τύπου λατέξ βουταδιενίου στυρολίου. [25]

Διαχωριστής

Ο διαχωριστής πιθανολογείται ότι είναι κατασκευασμένος από ίσες αναλογίες, πολυπροπυλενίου και πολυαιθυλενίου.[25]

Ηλεκτρολύτες

Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως ένα ακριβό-Μ διάλυμα άλατος λιθίου σε οργανικούς διαλύτες, όπως το ανθρακικό προπυλένιο ή ανθρακικό διμεθύλιο. Άλατα που εξετάζονται είναι το LiPF_6 και το LiBF_4 .

5.5.1 Μονάδα συναρμολόγησης και συναρμολόγησης της μπαταρίας

Στο μοντέλο, 10 κυψέλες ήταν συσκευασμένες σε μία μονάδα και 10 μονάδες σε μία μπαταρία 10 kWh. Τα ηλεκτρονικά και η συσκευασία, εκτός από τη συσκευασία κυψέλης, ισούνται με το 10% του συνολικού βάρους της μπαταρίας, δηλαδή περίπου 10,7 κιλά. Η ενέργεια αντιστοιχεί σε 11,7 kWh ηλεκτρικής ενέργειας και 8,8 kWh φυσικού αερίου ανά kg μπαταρίας. Επιπλέον, οι εκπομπές CO_2 από την καύση του NMP εκτιμήθηκαν μέσω στοιχειομετρίας. [25]

5.5.2 Φάση χρήσης

Μοντελοποιήθηκαν οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας της μπαταρίας κατά τη διάρκεια ζωής της στο αυτοκίνητο και η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για το βάρος της μπαταρίας. Επιπλέον συμπεριλήφθηκε η μεταφορά της μπαταρίας από τον κατασκευαστή του αυτοκινήτου στο χρήστη. Η επίδραση του βάρους της μπαταρίας 107,2 κιλά διαμορφώθηκε με τις ακόλουθες υποθέσεις:

- 30% της κατανάλωσης ενέργειας του οχήματος μπορεί να σχετίζονται με το βάρος του αυτοκινήτου
- μοντέλο βάρους 1600 kg
- 200.000 χιλιόμετρα έγιναν κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής

- Το όχημα καταναλώνει 0,5 λίτρα βενζίνης ανά 10 χιλιόμετρα σε λειτουργία βενζίνης
- ή 0,15 kWh ηλεκτρισμού ανά χιλιόμετρο σε λειτουργία ηλεκτρισμού
- το όχημα PHEV λειτουργεί το μισό χρόνο με ηλεκτρισμό και τον υπόλοιπο με καύσιμο. Εδώ για τόσο μεγάλη μπαταρία υποτέθηκε χρόνος ηλεκτρικής λειτουργίας 75%.
- 90% απόδοση φόρτισης. Η κατανάλωση από την πρίζα στον τροχό είναι $0.15/0.9 = 0.167 \text{ kWh / km}$.
- Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω στοιχεία η επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για το βάρος της μπαταρίας υπολογίστηκε σε $107,2 \text{ kg}/1600 \text{ kg} \times 30\% \times 0,167 \text{ kWh / km} \times 200000 \text{ km} \times 75\% = 504 \text{ kWh}$. Θεωρήθηκαν επίσης 11% οι απώλειες δικτύου. Τα πρόσθετα καύσιμα που απαιτούνται, λόγω του βάρους της μπαταρίας υπολογίστηκαν σε $107,2 \text{ kg}/1600 \text{ kg} \times 30\% \times 200.000 \text{ km} \times 0,05 \text{ l km} \times 25\% = 50 \text{ L βενζίνης}$.

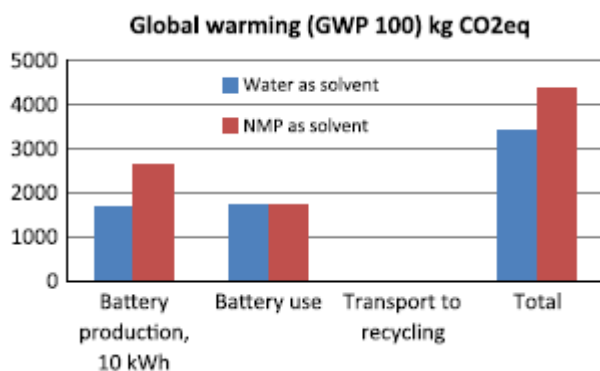
Οι απώλειες λόγω εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας υπολογίστηκε σε $200.000 \text{ km} \times 75\% \times 0,15 \text{ kWh / km} \times 10\% \text{ απώλειες} = 2250 \text{ kWh}$. [25]

5.5.3 Φάση ανακύκλωσης

Η φάση της ανακύκλωσης υποθέτει μία μεταφορά 500 km σε μια μάντρα σιδηρών υλικών. Οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και τα οφέλη από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών θα πρέπει να εκτιμηθούν για τον επόμενο κύκλο ζωής του προϊόντος.

5.5.4 Αποτελέσματα

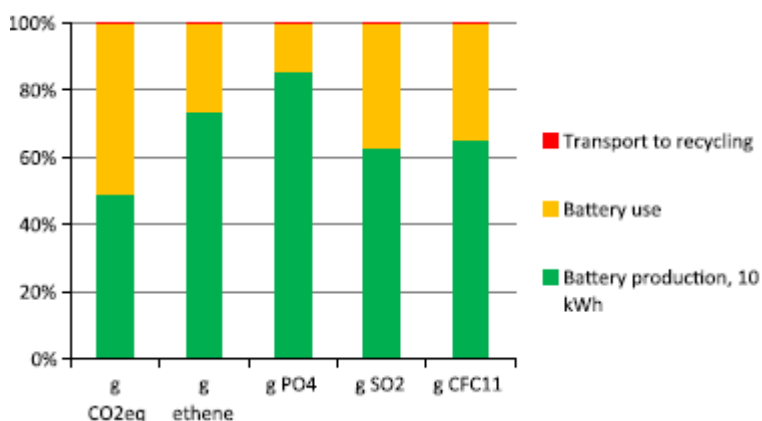
5.5.4.1 Νερό έναντι N-Methyl-2-pyrrolidone



Εικόνα 28: Επιδράσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου των 2 μπαταριών λιθίου-ιόντος. [25]

Η μπαταρία που έγινε με N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) οδηγεί σε εκπομπές περίπου 4,400 kg ισοδύναμου CO₂, ενώ η μπαταρία με νερό οδηγεί σε περίπου 3,400 kg. Η διαφορά εμφανίζεται στο στάδιο της παραγωγής και οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η μπαταρία που έγιναν με NMP χρησιμοποιεί PVDF ως συνδετικό υλικό.

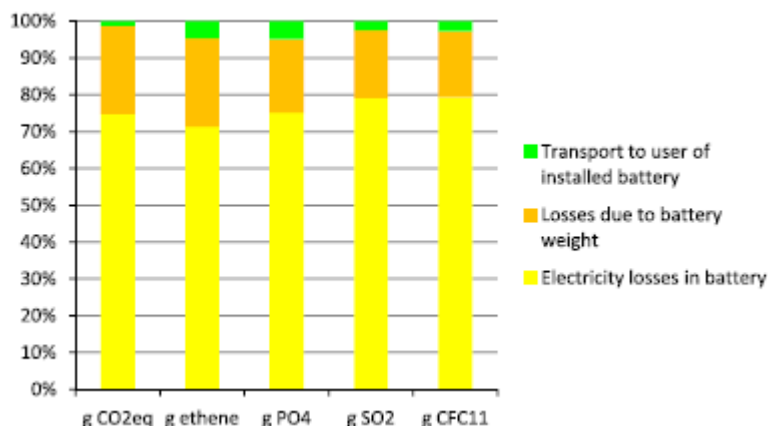
Μπορεί επιπλέον να διαπιστωθεί ότι οι επιπτώσεις για μεταφορά για την ανακύκλωση είναι αμελητέες σε σύγκριση με αυτές για τη φάση της χρήσης και τη φάση της παραγωγής η οποία φαίνεται να κυριαρχεί στις τέσσερις από τις πέντε περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων.



Εικόνα 29: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανάλογα με τα στάδια του κύκλου ζωής μιας 10 kWh μπαταρίας plug-in hybrid electric vehicle (PHEV). [25]

5.5.4.2 Φάση χρήσης

Στην εικόνα 30 μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι κυρίαρχες επιπτώσεις στη φάση της χρήσης προέρχονται από απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας της μπαταρίας κατά τη χρήση του στο αυτοκίνητο.

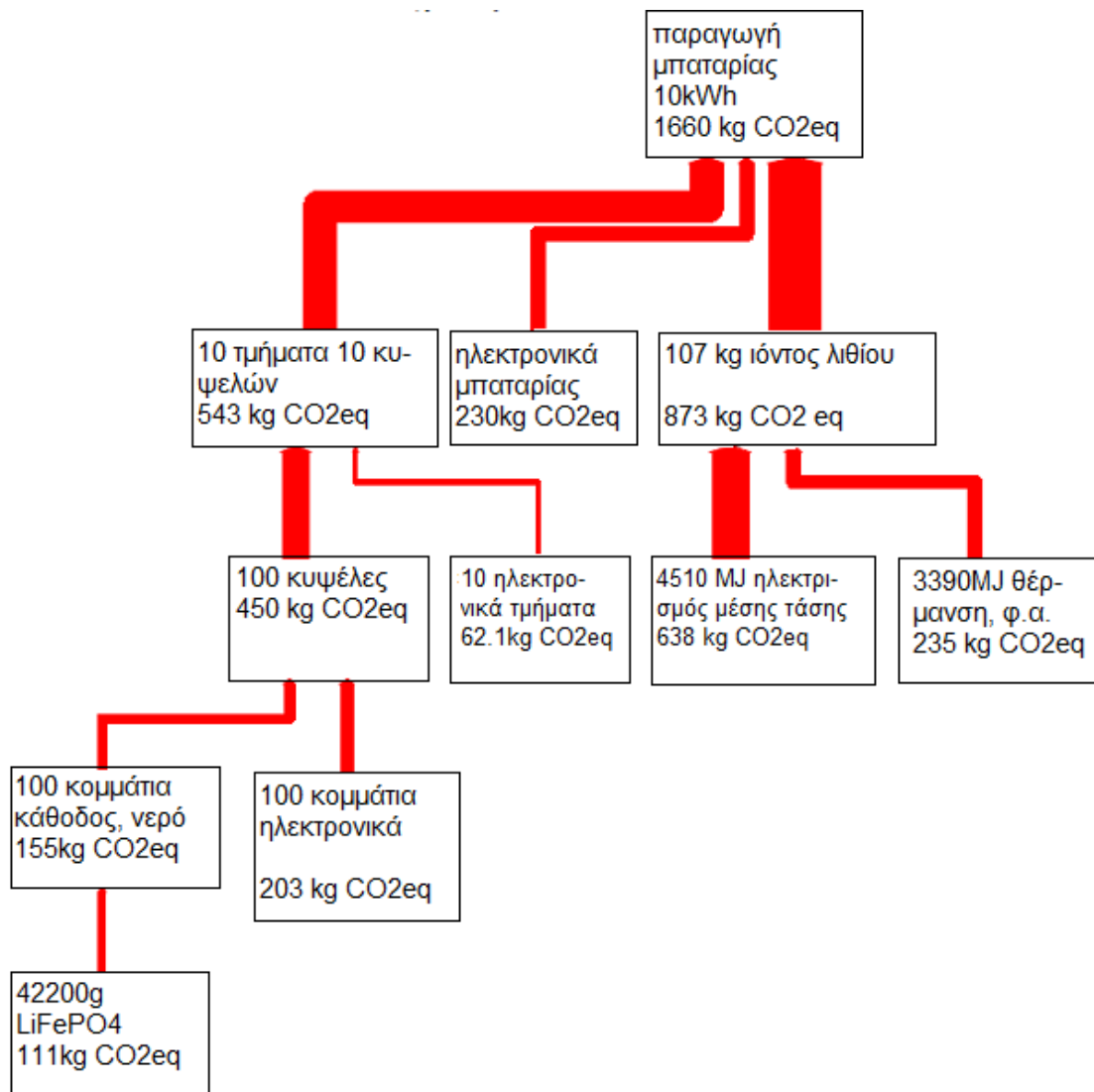


Εικόνα 30: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη φάση χρήσης μιας 10 kWh μπαταρίας PHEV. [25]

Το βάρος μπαταρίας έχει παραδοσιακά θεωρηθεί ως ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς υπολογίζεται ότι το 30% της ενέργειας που χρησιμοποιείται από ένα αυτοκίνητο μπορεί να σχετίζεται με το βάρος του.

5.5.4.3 Η παραγωγή μπαταρίας plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)

Η εικόνα 31 δείχνει ότι οι πιο κυρίαρχες πηγές θέρμανσης που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά τη φάση της παραγωγής είναι η χρήση ενέργειας κατά την κατασκευή της μπαταρίας, τα ηλεκτρονικά και η κάθοδος. Περισσότερο από το μισό συμβάλλει η χρήση ενέργειας κατά την κατασκευή.



Εικόνα 31: Οι γενικές επιπτώσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μιας kWh 10 μπαταρία PHEV - φάση της παραγωγής [25]

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων είναι σημαντικές στο επίπεδο της μπαταρίας. Σχεδόν το 30% των 1660 kg ισοδύναμου CO₂ κατά τη φάση της παραγωγής προέρχεται από τα ηλεκτρονικά. Τα ηλεκτρονικά φαίνεται να είναι υπεύθυνα και στις περιπτώσεις φωτοχημικών επιπτώσεων (58%) και οξίνισης (48%). Για τον ευτροφισμό υπεύθυνη περισσότερο είναι η κατασκευή της καθόδου. Κατά τη φάση της παραγωγής, οι μεταφορές θα είναι υπεύθυνες για περίπου το 3% του συνόλου των 1660 kg ισοδύναμου CO₂.

5.5.5 Ανάλυση ευαισθησίας

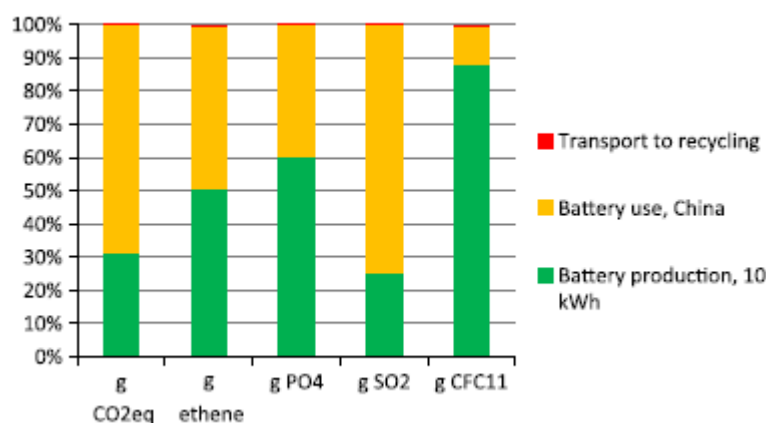
Οι υπολογισμοί ευαισθησίας αλλάζουν μόνο τα στοιχεία στη φάση της χρήσης. Παράγοντες που αυξάνουν τις επιπτώσεις στη φάση της χρήσης, σε σύγκριση με το βασικό σενάριο είναι οι εξής:

- Ηλεκτρική ενέργεια στην Κίνα (ορυκτά καύσιμα για παραγωγή ηλεκτρισμού)
- 50% η σχέση βάρους-ενέργειας

Παράγοντες που μειώνουν τις επιπτώσεις στη φάση της χρήσης:

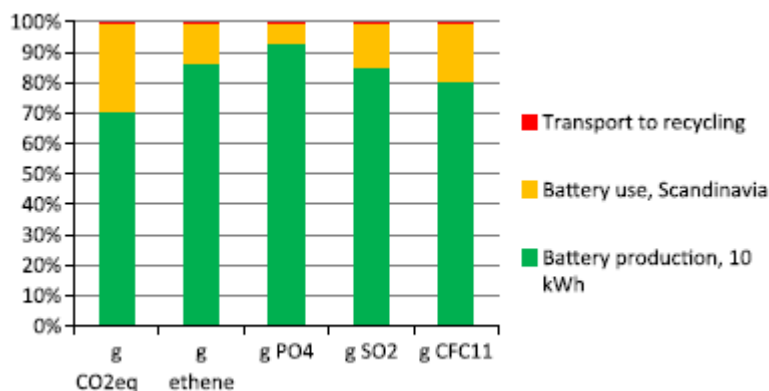
- Ηλεκτρική ενέργεια στη Σκανδιναβία
- 15% η σχέση βάρους-ενέργειας
- 97,5% η εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας

Στην εικόνα 32 μπορεί να διαπιστωθεί ότι το στάδιο της παραγωγής και τη φάση της χρήσης είναι αρκετά παρόμοια όταν το αυτοκίνητο χρησιμοποιείται στην Κίνα.



Εικόνα 32: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανάλογα με τα στάδια του κύκλου ζωής μιας 10 kWh μπαταρίας PHEV, στην Κίνα. [25]

Στην εικόνα 33 αποδεικνύεται ότι το στάδιο της παραγωγής κυριαρχεί σε όλες τις περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων όταν το αυτοκίνητο είναι στην Σκανδιναβία, καθώς οι εκπομπές στη φάση της χρήσης θα μειωθούν αρκετά.



Εικόνα 33 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανάλογα με τα στάδια του κύκλου ζωής μιας 10 kWh μπαταρίας PHEV, στην Σκανδιναβία. [25]

Ο πίνακας 11 δίνει τη σχέση μεταξύ των επιδράσεων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από τις απώλειες λόγω της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας σε σχέση με αυτές λόγω του βάρους της μπαταρίας για την Δυτική Ευρώπη, την Σκανδιναβία και την Κίνα.

Πίνακας 11: Σχέση μεταξύ των επιδράσεων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από τις απώλειες λόγω της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας σε σχέση με αυτές λόγω του βάρους της μπαταρίας για την Δυτική Ευρώπη, την Σκανδιναβία και την Κίνα. [25]

εσωτερική απόδοση της μπαταρίας	Δυτική Ευρώπη	Σκανδιναβία	Κίνα
90%	3 =	2	4
97,5%	0.8	0.5	0.9

Αν μπορεί να υποθεθεί ότι η σημερινή απόδοση της μπαταρίας είναι 90%, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι απώλειες λόγω της απόδοσης της μπαταρίας σήμερα είναι 2-4 φορές οι απώλειες λόγω του βάρους της μπαταρίας, δηλαδή προς το παρόν η απόδοση της μπαταρίας είναι πιο σημαντική από το βάρος της μπαταρίας.

Ο πίνακας 12 δίνει τη σχέση μεταξύ των απωλειών λόγω της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας έναντι απωλειών λόγω του βάρους της μπαταρίας για διαφορετικές υποθέσεις βάρους-ενέργειας στη Δυτική Ευρώπη.

Πίνακας 12: Σχέση μεταξύ των επιδράσεων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από τις απώλειες λόγω της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας έναντι λόγω του βάρους της μπαταρίας για διαφορετικές υποθέσεις βάρους-ενέργειας στη Δυτική Ευρώπη [25]

Εσωτερική απόδοση της μπαταρία	15% ενέργειας σχετίζεται με το βάρος οχήματος	30% ενέργειας σχετίζεται με το βάρος οχήματος	50% ενέργειας σχετίζεται με το βάρος οχήματος
90%	6	3	2
97,5%	1.6	0.8	0.5

Όπως και κατά τους υπολογισμούς με διαφορετικής προέλευσης ηλεκτρική ενέργεια, στο 97,5% της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας, οι απώλειες που οφείλονται σε

βάρος της μπαταρίας είναι μεγαλύτερες ή ίσες με τις απώλειες λόγω εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας, εκτός από την περίπτωση της σχέσης βάρους-ενέργειας 15%. Σε αυτήν, οι απώλειες που οφείλονται στο βάρος της μπαταρίας είναι μεγαλύτερες από αυτές εξαιτίας της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας ακόμη και στο 97,5% της εσωτερικής απόδοσης της μπαταρίας και έξι φορές μεγαλύτερες στο 90%.

Η διαφορετικής προέλευσης ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται αντιπροσωπεύει επαρκώς τις εκπομπές του άνθρακα καθώς εξετάζονται περιπτώσεις φιλικές στο περιβάλλον αλλά και επιζήμιες: από τη Σκανδιναβία η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από πυρηνική και υδροηλεκτρική ενέργεια έχοντας 196 g CO₂/ kWh, από τη Δυτική Ευρώπη 570 g CO₂/ kWh, από την Κίνα η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ορυκτά έχοντας 1250 g CO₂/ kWh. Ομοίως, εξετάζονται οι σχέσεις βάρους-ενέργειας από το 15% έως το 50%.

Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με άλλες τρεις μελέτες ή τα δεδομένα της AKZ σχετικά με την τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου. Για τη φάση της παραγωγής, μία από τις μελέτες (Ecoinvent, 2008) αναφέρει περίπου πενταπλάσιες παγκόσμιες επιπτώσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ενώ δύο μελέτες (Ishihara και Kihira, και Matheys et al. 2005) αναφέρουν λιγότερες επιπτώσεις στην ίδια τάξη μεγέθους.

Η βάση δεδομένων Ecoinvent περιέχει διεθνή βιομηχανικά δεδομένα απογραφής κύκλων ζωής σε σχέση με τον ενεργειακό εφοδιασμό, την εξόρυξη των πρώτων υλών, την προμήθεια υλικών, χημικών και μετάλλων, την καλλιέργεια, την διαχείριση αποβλήτων, και τις μεταφορές.

Για τη φάση της χρήσης μία μελέτη (Matheys et al. 2005) αναφέρει ίδιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ στις δύο άλλες μελέτες δεν μοντελοποιείται. Το όριο του συστήματος για τη φάση της ανακύκλωσης φαίνεται να είναι πολύ διαφορετικό σε σχέση με τις άλλες μελέτες για ουσιαστική σύγκριση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη SUBAT (Matheys et al., 2005) προϋποθέτει ότι απαιτούνται τρεις μπαταρίες για 3000 κύκλους φόρτισης, δηλαδή 1000 κύκλοι ανά μπαταρία σύμφωνα με τη USABC. Σήμερα, το ισοδύναμο είναι 5000 κύκλοι. [26]

Όσον αφορά την εσωτερική απόδοση της μπαταρίας σε σχέση με το βάρος της μπαταρίας, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη SUBAT διαπίστωσε επίσης ότι οι περισσότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις οφείλονταν στην εσωτερική αποδοτικότητα παρά στο βάρος της μπαταρίας κατά τη φάση της χρήσης.

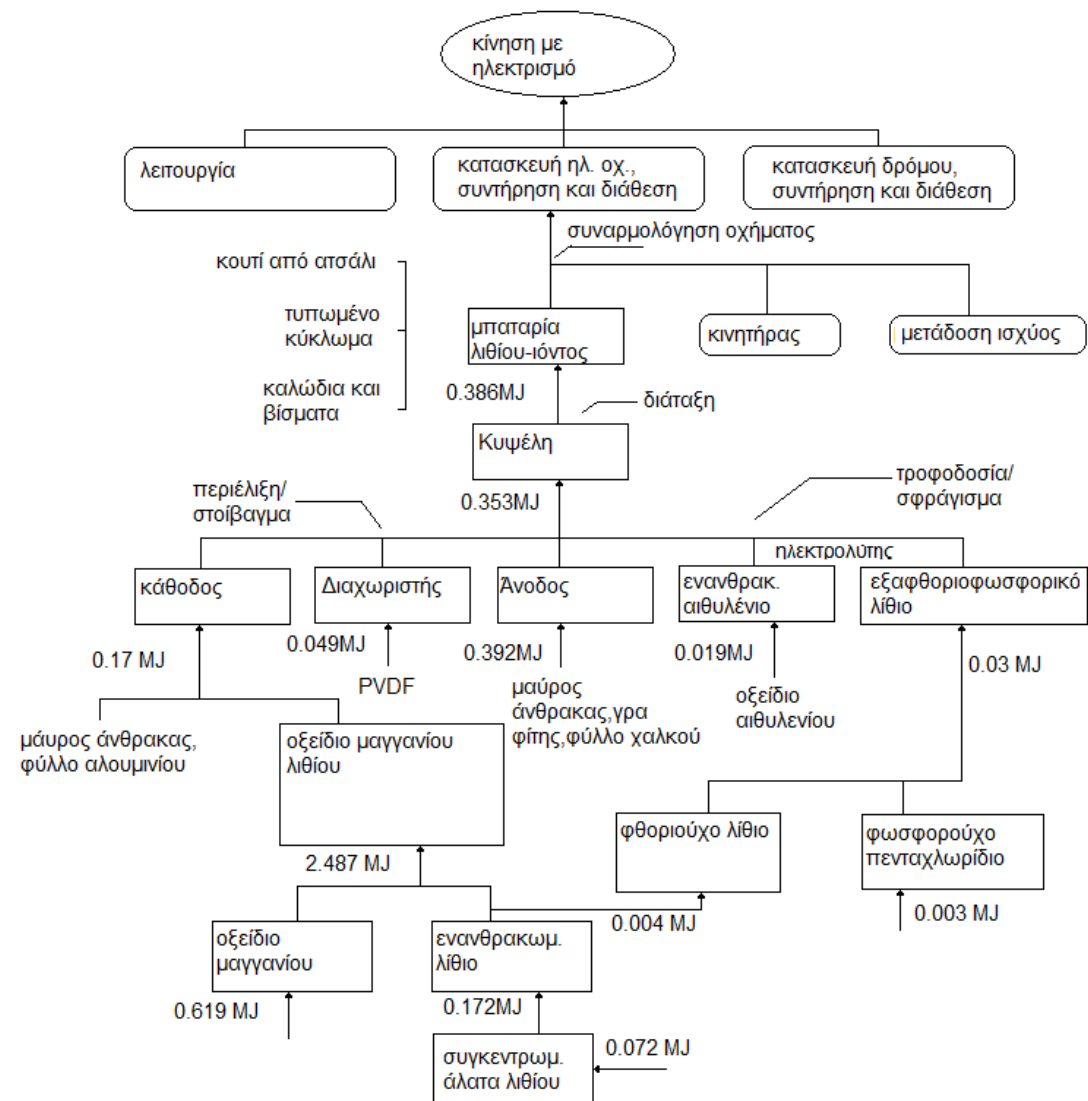
Το όχημα που μελετήθηκε στη SUBAT ήταν συγκρίσιμο με ένα Volkswagen Golf στο μέγεθος και την ισχύ (βάρος της μπαταρίας 300 κιλά, Χωρητικότητα της μπαταρίας 0,114 kWh / kg μπαταρίας και διάρκεια ζωής 150 000 km). 14,1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούνται για κάθε 100 χιλιόμετρα για ένα όχημα κατηγορίας Golf με συνολική απόδοση 80% σε ένα τυπικό πρόγραμμα οδήγησης (NEDC). Η θέρμανση,

η ψύξη, καθώς και οι ηλεκτρονικές συσκευές καταναλώνουν 2,9 kWh/100 km. Έτσι απαιτούνται συνολικά 17 kWh/100 km.

Οι επιπτώσεις των φάσεων συναρμολόγησης και παραγωγής μπορεί να αντισταθμιστεί σε μεγάλο βαθμό από τη συλλογή και ανακύκλωση των μπαταριών η οποία είναι αποτελεσματική όταν εκτελείται σε μεγάλη κλίμακα. [26]

5.6 Περιγραφή της Μονάδας Διεργασιών

Το σχήμα 1 απεικονίζει τα στάδια της παραγωγής που απαιτούνται για την μπαταρία Li-ιοντος από την εξόρυξη του λιθίου και την παραγωγή ηλεκτροδίου μέχρι την μπαταρία και τα κατασκευαστικά στοιχεία του ηλεκτρικού οχήματος. Όλες οι ενέργειες είτε θερμικές είτε ηλεκτρικές εκφράζονται ανά kg μπαταρίας Li-ion.



Σχήμα 1: Ενέργεια για τα στάδια της παραγωγής μπαταρίας Li-ιόντος [26]

Η παραγωγή συγκεντρωμένων αλάτων λιθίου γίνεται με αφυδάτωση του λιθίου με ηλιακή ενέργεια στην έρημο της Ατακάμα. Είναι αναγκαία η χρήση πετρελαίου για άντληση των αλάτων. Το συμπυκνωμένο λίθιο υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία με πρόσθετα για την απομάκρυνση του βορίου, ακολουθούμενο από ένα στάδιο καθαρισμού. Τέλος, γίνεται προσθήκη σόδας για ενανθράκωση με την καταβύθιση του ανθρακικού λιθίου (Li_2CO_3). Στη συνέχεια, το LiMn_2O_4 παράγεται από Mn_2O_3 και Li_2CO_3 σε περιστροφική κλίνη. Τα βασικά υλικά για τον ηλεκτρολύτη είναι οργανικός διαλύτης, συνήθως ανθρακικό αιθυλένιο ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$), καθώς και LiPF_6 . Για την παραγωγή του LiPF_6 , αντιδρά LiF με Li_2CO_3 σε θερμοκρασία δωματίου. [26]

5.7 Ανάλυση κύκλου Ζωής PEM

5.7.1 Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου PEM θεωρούνται αυτήν την περίοδο η πλέον αναπτυσσόμενη μορφή τεχνολογίας τέτοιου είδους. Στην αγορά διατίθεται σε μία ποικιλία ισχύος από 1 kW_{el} - $250 \text{ kW}_{\text{el}}$.

Η μεγάλη πλειοψηφία των μονάδων μέχρι 100 kW σχεδιάζεται να λειτουργεί με φυσικό αέριο ή προπάνιο. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους (χαρακτηριστικά 80°C) και το ευνοϊκό τους κόστος τις καθιστά ελκυστικές.

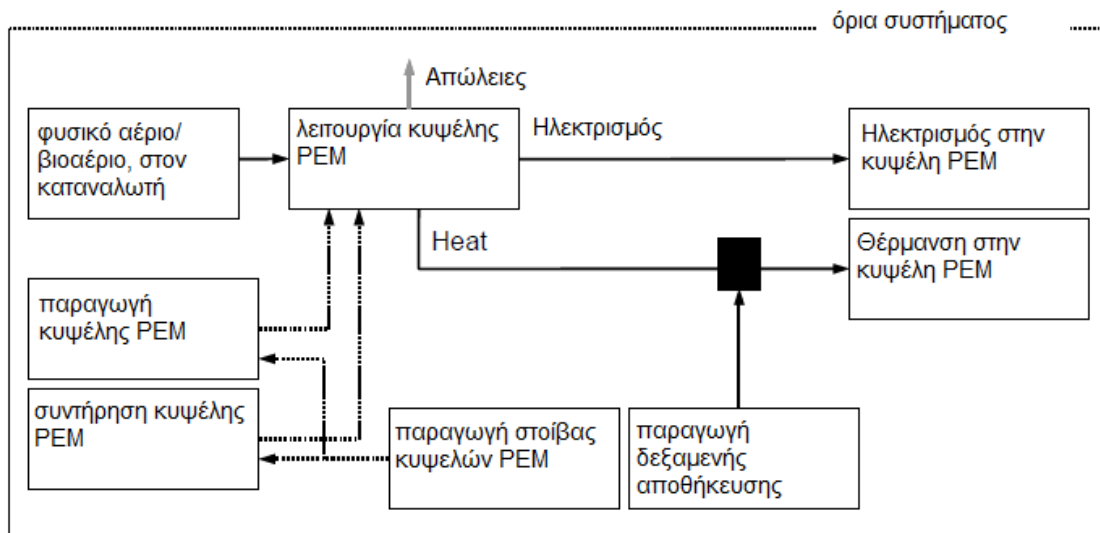
Τα συστήματα PEM έχουν χαρακτηριστικά κατάλληλα για εφαρμογές συμπαραγωγής καθώς επίσης και για παραγωγή ισχύος σε αυτοκίνητα. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για τη λειτουργία με καθαρό υδρογόνο. [28]

5.7.2 Χαρακτηρισμός συστημάτων

Η εικόνα 34 παρουσιάζει το διαμορφωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου PEM. Υποτίθεται ότι ο στρόβιλος συνδέεται με το ευρωπαϊκό χαμηλής πίεσεως δίκτυο αερίου. Το φυσικό αέριο και το βιοαέριο συμπεριλαμβάνονται ως ενεργειακοί μεταφορείς για να ενεργοποιήσουν το σύστημα PEM.

Υποτίθεται ότι το σύστημα κυψέλης καυσίμου PEM χρησιμοποιείται στην Ελβετία (CH). Εντούτοις, η διαδικασία ισχύει και για την Κεντρική Ευρώπη.

Τα στοιχεία απόδοσης για τη λειτουργία βασίζονται στις πραγματικές τιμές στόχους των κατασκευαστών. Αυτές οι τιμές δεν μπορούν να επιτευχθούν ακόμα αλλά αυτό είναι πιθανό να συμβεί μέσα στα επόμενα 3-8 έτη. [28]



Εικόνα 34 : Διαμορφωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου PEM. [28]

5.7.3 Φυσικό αέριο, που καίγεται σε PEM 2 kW_{el}

Μια ηλεκτρική απόδοση 27 έως 28% μετριέται για τη σειρά κυψελών. Για τις μικρές κυψέλες καυσίμου PEM, οι τιμές στόχοι για ηλεκτρικές αποδόσεις κυμαίνονται μεταξύ 28 και 35 % και για συνολικές αποδόσεις μεταξύ 80% και 90 % (πίνακας 13). Οι θερμοκρασίες από 50 έως 70 °C επιτρέπουν μόνο τις εφαρμογές στα νεώτερα συστήματα θέρμανσης.

Πίνακας 13: Ηλεκτρικές, θερμικές αποδόσεις και απώλειες [28]

Παραγωγή ηλεκτρισμού	MJ/MJ _{in}	0.32
Παραγωγή θερμότητας	MJ/MJ _{in}	0.55
Συνολική ενέργεια	MJ/MJ _{in}	0.87
Απώλειες θερμότητας	MJ/MJ _{in}	0.13
Συνολική απώλεια θερμότητας	MJ/MJ _{in}	0.78

Η απαιτούμενη υποδομή ορίζεται από την ολική διάρκεια ζωής και τα διαστήματα συντήρησης της μονάδας. Η διάρκεια ζωής είναι αυτήν την περίοδο περίπου 4,000 έως 8,000 ώρες και στο μέλλον αναμένεται να φτάσει σε 30,000 έως 40,000. Η συντήρηση του συστήματος περιλαμβάνει την αντικατάσταση καταλυτών, η οποία απαιτείται κάθε τρία έως πέντε έτη, και αντικατάσταση των σειρών κάθε τέσσερα και οκτώ έτη. Η διάρκεια ζωής των βοηθητικών συστημάτων υπολογίζεται σε 15 έτη. Η κατανάλωση καυσίμων είναι 6.25 kW σε ονομαστικό φορτίο. Η συντήρηση απαιτείται για κάθε 0.086 TJ_{in} εισερχόμενου καυσίμου. Για την καλύτερη απόδοση του συστήματος κυψέλης καυσίμου PEM απαιτείται μια δεξαμενή αποθήκευσης. Σύμφωνα με τον Heck (2003) για μια δεξαμενή αποθήκευσης όγκου 0.65 m³ η διάρκεια ζωής της δεξαμενής είναι 100,000 h ή 1.51 TJ_{in} εισερχόμενου καυσίμου. [28] Οι διαδικασίες υποδομής περιλαμβάνονται στον πίνακα 14.

Πίνακας 14: Εξοπλισμός και συντήρηση κυψέλης PEM που λειτουργεί με φυσικό αέριο [28]

Διαδικασία	Διάρκεια λειτουργίας	Ποσότητα
Κυψέλη PEM 2kW, μέλλον	80,000 h	8.29E-7 units/MJ _{in}
Συντήρηση κυψέλης PEM 2kW, μέλλον	14 times per 80,000 h	1.16E-5 units/MJ _{in}
Αποθήκευση 650 l, *	100,000 h	5.84 E-7 units/MJ _{in}
*For 0.5 m ³ storage size. 0.88 units are used.		

5.7.3.1 Εκπομπές στον αέρα

Οι εκπομπές CO₂ για το φυσικό αέριο που καταναλώνεται από το ελβετικό δίκτυο αερίου είναι 56 g/MJ_{in}. Λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών, οι εκπομπές των οξειδίων αζώτου είναι πολύ χαμηλές, από 1 έως 4 mg/MJ_{in}. Οι αναφερόμενες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα κυμαίνονται μεταξύ 0.9 και 5.6 mg/MJ_{in}. Η συμπεριφορά των εκπομπών υδρογονανθράκων είναι παρόμοια με αυτήν των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα. Οι αναφερόμενες εκπομπές των άκαυτων υδρογονανθράκων κυμαίνονται μεταξύ 0.12 και 0.4 mg/MJ_{in}. [28]

5.7.3.2 Ποιοτικές εκτιμήσεις στοιχείων

Ο κατάλογος δεν είναι βασισμένος σε μετρήσεις, αλλά αντιπροσωπεύει τη διαθέσιμη πληροφορία από τους κατασκευαστές τέτοιων κυψελών. Επειδή αυτά τα συστήματα έχουν λειτουργήσει μέχρι τώρα μόνο υπό συνθήκες δοκιμής, τα στοιχεία απόδοσης είναι βασισμένα σε τιμές στόχων (αποδοτικότητα) ή προσεγγίσεις (εκπομπές) που αναμένονται να επιτευχθούν μέσα στα επόμενα 5 έτη.

Πίνακας 15: Πολλαπλά αποτελέσματα φυσικού αερίου που καίγεται σε PEM 2 kW[28]

	Όνομα	Μονάδα	Φυσικό αέριο, που καίγεται σε PEM 2 kW (MJ)
Κατανομή	Θερμότητα, φυσικό αέριο, κατανεμημένη εξέργεια στην κυψέλη PEM 2kW	MJ	5.50E-1
	Ηλεκτρισμός, φυσικό αέριο, κατανομή εξέργειας στην κυψέλη PEM 2kW	kWh	8.89E-2
Technosphere	Κυψέλη PEM 2kW, μέλλον	unit	8.29E-7
	Συντήρηση κυψέλης PEM 2kW, μέλλον	unit	1.16E-5
	αποθήκευση 650 l Mini-BHKW	unit	5.84E-7
	Φυσικό αέριο, χαμηλής πίεσης στον καταναλωτή	MJ	1.00E+0
Εκπομπές στον αέρα	Διοξείδιο του άνθρακα	kg	5.60E-2
	μονοξειδίο του άνθρακα,	kg	1.70E-6
	μεθάνιο	kg	4.00E-6
	Οξείδια αζώτου	kg	1.30E-6
	NM VOC, απροσδιόριστη προέλευση	kg	3.00E-7
	PM2,5	kg	2.00E-10
	Διοξείδιο το θείου	kg	5.50E-7
Απορριπτόμενη θερμότητα	MJ	7.81E-1	

5.7.4 Βιοαέριο, που καίγεται σε PEM 2 kW_{el}

Μόνο το βιοαέριο που διανέμεται στο κανονικό δίκτυο φυσικού αερίου εξετάζεται. Αυτό το βιοαέριο έχει μια ποιότητα παρόμοια με το φυσικό αέριο. Η περιεκτικότητα σε μεθάνιό της πρέπει να είναι τουλάχιστον 96 vol.%.

Οι τιμές για τις ηλεκτρικές αποδόσεις κατά μέσο όρο είναι 32 % και για συνολικές αποδόσεις 87 %. Η υποδομή που απαιτείται είναι ίδια με αυτήν του φυσικού αερίου.

5.7.4.1 Εκπομπές στον αέρα

Οι εκπομπές βιογενούς CO₂ υπολογίζονται βάσει της περιεκτικότητας σε άνθρακα του μίγματος βιοαερίων. Σύμφωνα με τη σύνθεση του, το καθαρισμένο βιοαέριο έχει μια ελαφρώς χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άζωτο από το φυσικό αέριο. Εφαρμόζεται ένας συντελεστής εκπομπής NO_x 1.3 mg NO_x/MJ_{in}, 1.7 mg CO/MJ_{in}. Η συμπεριφορά των εκπομπών υδρογονανθράκων είναι παρόμοια με αυτήν των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα. Αυτές οι εκπομπές είναι πολύ χαμηλές. Οι εκπομπές των άκαυστων υδρογονανθράκων κυμαίνονται μεταξύ 0.12 και 0.4 mg/MJ_{in}. Για το μεθάνιο εφαρμόζεται ένας συντελεστής εκπομπής 4 mg/MJ_{in}. [28]

Πίνακας 16: Πολλαπλά αποτελέσματα βιοαερίου που καίγεται σε PEM 2 kW [28]

	Όνομα	Μονάδα	Βιοαέριο, που καίγεται σε PEM 2 kW (MJ)
Κατανομή	Θερμότητα, φυσικό αέριο, κατανεμημένη εξέργεια στην κυψέλη PEM 2kW	MJ	5.50E-1
	Ηλεκτρισμός, βιοαέριο, κατανομή εξέργειας στην κυψέλη PEM 2kW _e	kWh	8.89E-2
Technosphere	Κυψέλη PEM 2kW, μέλλον	unit	8.29E-7
	Συντήρηση κυψέλης PEM 2kW, μέλλον	unit	1.16E-5
	αποθήκευση 650 l Mini-BHKW	unit	5.84E-7
	μεθάνιο, 96 vol-%	MJ	1.00E+0
Εκπομπές στον αέρα	Διοξείδιο του άνθρακα	kg	5.58E-2
	μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο	kg	1.70E-6
	Οξείδια αζώτου	kg	4.00E-6
	NM VOC, απροσδιόριστη προέλευση	kg	1.30E-6
	PM _{2,5}	kg	3.00E-7
	Διοξείδιο το θείου	kg	2.00E-10
	Απορριπτόμενη θερμότητα	kg	5.50E-7
		MJ	7.78E-1

5.7.5 Κατασκευή κυψέλης PEM 2 kW

Για την κατασκευή της κυψέλης PEM 2 kW χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι ο χάλυβας, ο χρωμιούχος χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χυτοσίδηρος και το πολυαιθυλένιο. Στον πίνακα 17 εκτός από αυτές παρουσιάζεται η μεταφορά αυτών των υλικών και η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή της κυψέλης. Για κάθε κυψέλη καυσίμου 2 kW θεωρείται μια επιπλέον ενεργειακή απαίτηση 458 MJ θέρμανσης και 64 kWh ηλεκτρισμού. Επιπλέον για τη μεταφορά των πρώτων υλών χρησιμοποιούνται 200 km για σιδηροδρομικές μεταφορές και 100 km για οδικές μεταφορές.

Πίνακας 17: Πρώτες ύλες, ενέργεια και απαιτήσεις κατασκευής της κυψέλης PEM 2 kW [28]

	Όνομα	Μονάδα	Κυψέλη PEM 2 kW
Προϊόν	Κυψέλη PEM 2kW, μέλλον	unit	1
Technosphere	Χάλυβας	kg	3.94E+1
	Χρωμιούχος χάλυβας 18/8	kg	4.62E+1
	Αλουμίνιο, μείγμα παραγωγής,	kg	4.6
	Χυτοσίδηρος	kg	1.6
	Διοξείδιο τιτανίου	kg	1.4E-1
	ξυλάνθρακας	kg	5E-1
	Πολυαιθυλένιο. HDPE, υπό μορφή κόκκων	kg	4.8
	Πολυπροπυλένιο, υπό μορφή κόκκων	kg	5.00E-1
	Πολυστυρένιο	kg	6.00E-1
	Πλατίνα	kg	1.2E-3
	Inventer, 2500 W, at plant	unit	8.00E-1
	Σειρά PEM 2kW	unit	1
	Θέρμανση , εξοπλισμός υγιεινής, Mini-BHKW	unit	6.50E-1
	Φύλλο χάλυβα	kg	3.94E+1
	Φύλλο χρωμιούχου χάλυβα	kg	4.62E+1
	Φύλλο αλουμινίου	kg	4.6
	Έγχυση	kg	5.3
	Μεταφορά με σιδηρόδρομο	tkm	2.4E+1
	Μεταφορά με φορτηγό >16t	tkm	3.6E+1
	Μεταφορά με επιβατικό	tkm	4E+2
	Φυσικό αέριο που καίγεται σε λέβητα >100 kW	MJ	4.58E+2
	Ελαφρύ μαζούτ, που καίγεται στο λέβητα 100kW	MJ	3.00E+2
	Ηλεκτρική ενέργεια, μέσης τάσης, παραγωγή UCTE	kWh	6.4E+1
	Ηλεκτρισμός χαμηλής τάσης στο δίκτυο	kWh	4.00E+1
	Κτήριο διάθεσης, προϊόντα πολυαιθυλενίου/πολυπροπυλενίου, στην τελική διάθεση	kg	5.30E+0
	Κτήριο διάθεσης, απομόνωση πολυστυρολίου	kg	6E-1
Επεξεργασία λυμάτων, class 2	m ³	1.46E-1	
Πολυώροφο κτήριο	m ³	2.50E-2	
Κτίριο, αίθουσα	m ²	4.2E-3	

	Όνομα	Μονάδα	Κυψέλη PEM 2 kW
Νερό	Νερό	m ³	1.46E-1
Γη	Βιομηχανική περιοχή	m ²	7.50E-1
	Μετασχηματισμός	m ²	1.50E-2
	Μετασχηματισμός	m ²	1.50E-2
Εκπομπές αέρα	Απορριπτόμενη θερμότητα	MJ	3.74E+2

5.7.6 Κατασκευή σειράς PEM 2 kW

Το συνολικό βάρος μιας σειράς PEM 2 kW είναι 12.3 kg. Για κάθε σειρά κυψέλης καυσίμου θεωρείται μια επιπλέον ενεργειακή απαίτηση 47 MJ θέρμανσης και 3.8 MJ/kg ηλεκτρισμού. Επιπλέον για τη μεταφορά των πρώτων υλών χρησιμοποιούνται 200 km για σιδηροδρομικές μεταφορές και 100 km για οδικές μεταφορές. Στον πίνακα 18 αναφέρονται τα υλικά τα οποία απαιτούνται για τη δημιουργία μιας σειράς PEM 2 kW, η μεταφορά αυτών των υλικών και η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή της σειράς. Ακολούθως στον πίνακα 19 παρουσιάζεται η συντήρηση ενός συστήματος κυψέλης PEM 2 kW.

Πίνακας 18: Πρώτες ύλες, ενέργεια και απαιτήσεις κατασκευής σειράς κυψέλης PEM 2 kW [28]

Προϊόν	Όνομα	Μονάδα	Σειρά PEM 2 kW
	Σειρά PEM 2 kW	unit	1
Technosphere	Χρωμιούχος χάλυβας 18/8	kg	2E-1
	Αλουμίνιο, μείγμα παραγωγής γραφίτης	kg	6E-1
	Φενολική ρητίνη	kg	9
	Glass fibre, at plant	kg	2.2
	Μαύρος άνθρακας	kg	0.2
	Tetrafluoroethylene	kg	1.6E-3
	Πλατίνα	kg	1.04E-1
	Ισοπροπανόλη	kg	1.5E-3
	Απιονισμένο νερό	kg	1.9E-2
	Μεταφορά με σιδηρόδρομο	tkm	1.2E-2
	Μεταφορά με φορτηγό >16t	tkm	2.5
	Φυσικό αέριο που καίγεται σε λέβητα >100 kW	MJ	4.7E+1
	Ηλεκτρική ενέργεια, μέσης τάσης παραγωγής UTCE	kWh	3.38E+1
	Διάθεση, πλαστικό, βιομηχανία, ηλεκτρονικά 15.3% νερό	kg	1.32E+1
	Διάθεση, polyvinylfluoride, 0,2% water, to municipal incineration	kg	1.04E-1
	Κτίριο πολυώροφο	m ³	2.6E-3
Κτίριο, αίθουσα	m ²	4.4E-4	
Γη	ιδιοκτησία	m ² a	7.9E-2
	Μετασχηματισμός	m ²	1.6E-3
	Μετασχηματισμός	m ²	1.6E-3
Εκπομπές αέρα	προπανόλη	kg	1.9E-2
	Απορριπτόμενη θερμότητα	MJ	1.22E+2

Πίνακας 19: Συντήρηση συστήματος κυψέλης PEM 2 kW [28]

	Όνομα	Μονάδα	Σύστημα PEM 2 kW
Προϊόν	Συντήρηση κυψέλης PEM	unit	1
Technosphere	Χρωμιούχος χάλυβας 18/8	kg	1.2
	Διοξείδιο τιτανίου	kg	3.5E-2
	Ξυλάνθρακας	kg	1.25E-1
	Πλατίνα	kg	3.75E-4
	Σειρά κυψέλης PEM 2kW	unit	1.67E-1
	Μεταφορά επιβατικού	pkm	2E+2

5.8 Η ανάλυση κύκλου ζωής ενός SOFC με βάση APU

Σε εργασία του Rehnt συγκρίθηκαν οι επιπτώσεις του κύκλου ζωής ενός οχήματος με PEM και ένα συμβατικό όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ο τόπος αναφοράς είναι η Γερμανία και η χρονική περίοδος αναφοράς είναι το 2010. Το πρώτο μέρος του εγγράφου, το οποίο καλύπτει κυρίως μεθοδολογικά ζητήματα, περιλαμβάνει το παράδειγμα κατασκευής ενός 24 kW SOFC. Μερικά από τα πρώτα μοντέλα Απογραφής του Κύκλου Ζωής (LCI) αναπτύχθηκαν από τον M. Delucchi στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, κατά την περίοδο 1987-1993. Συνέχισε με επικαιροποιήσεις προβλέποντας εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

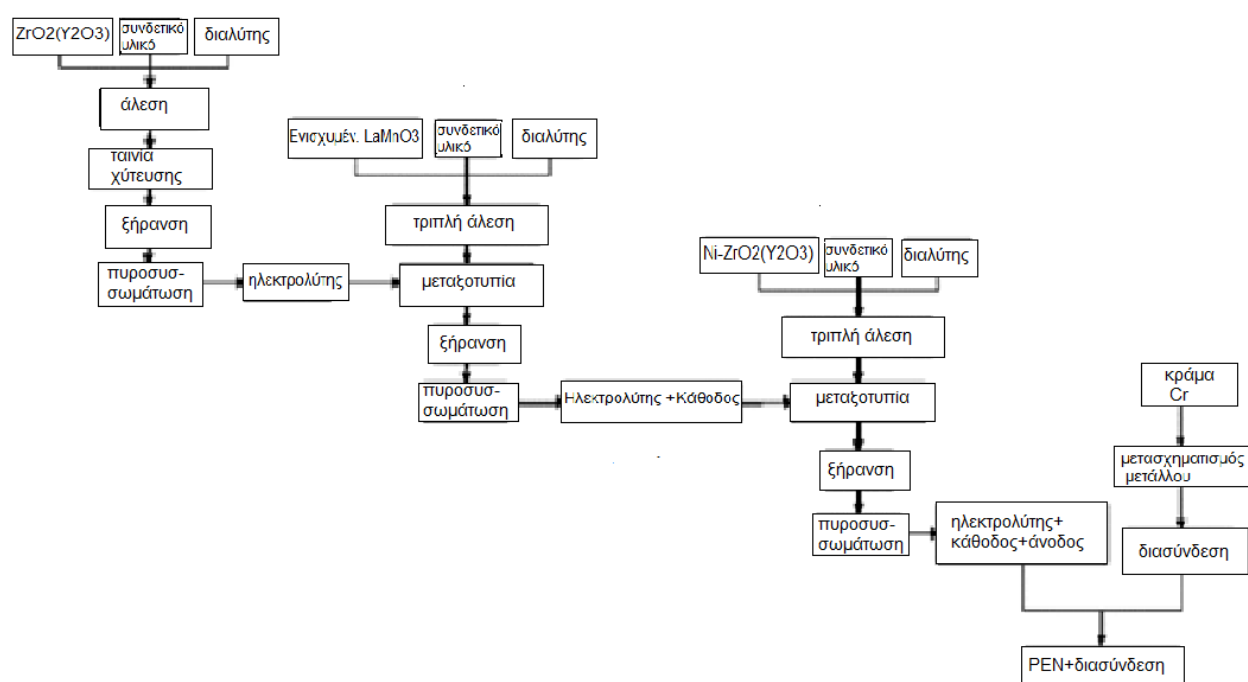
Όσον αφορά στον κύκλο ζωής των καυσίμων ο Contadini δημοσίευσε τρεις εργασίες σε αυτό το θέμα ασχολούμενος με τη μεθοδολογία και επικεντρώνοντας στις αβεβαιότητες AKZ. Ένα μοντέλο που ονομάζεται Fuel Upstream Energy and Emission Model (FUEEM) έχει αναπτυχθεί για την ανάλυση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής των οχημάτων και των κυψέλων καυσίμων. Ο Michael Wang του Argonne National Laboratory έχει παράγει ένα άλλο μοντέλο του κύκλου ζωής, που ονομάζεται Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation (GREET). Ο Hackney και ο de Neufville ανέπτυξαν ένα μοντέλο LC για τη σύγκριση των κριτηρίων των ρύπων, των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, τη χρήση ενέργειας και το κόστος των εναλλακτικών καυσίμων. Ο Zarr ασχολείται με κυψέλες καυσίμου για σταθερές εφαρμογές. Ο Karakoussis μελέτησε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής συστημάτων SOFC. Η επίπεδη διαμόρφωση SOFC αναφέρεται σε μικρής κλίμακας μονάδες ισχύος της τάξης 1-10 kW.

5.8.1 Σύστημα παραγωγής

Τα παρακάτω είναι τα όρια και τις βασικές υποθέσεις της μελέτης:

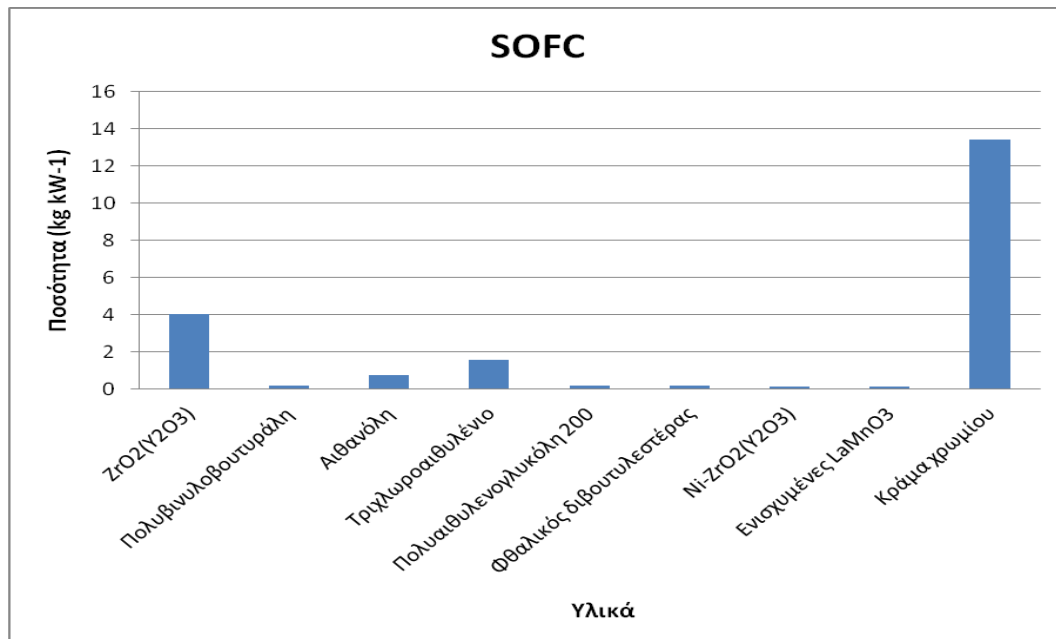
- Η μελέτη δεν λαμβάνει υπόψη την ενέργεια και τα υλικά που απαιτούνται για την κατασκευή του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του συστήματος κυψελών καυσίμου.
- Επίσης παραλείπονται οι επιπτώσεις από τη χρήση γης για την εγκατάσταση του συστήματος παραγωγής κυψελών καυσίμου

Εξετάζεται ένα σύστημα κλίμακας 1-10 kW. Οι κυψέλες έχουν πυκνότητα ισχύος 0.2 W/cm², και έτσι η στοίβα περιέχει περίπου 50 κεραμικές πλάκες 100 cm² ανά παραγόμενο kW. Ένα διάγραμμα κατασκευής PEN και διασύνδεσης για μία κυψέλη SOFC φαίνεται στο σχήμα 2.

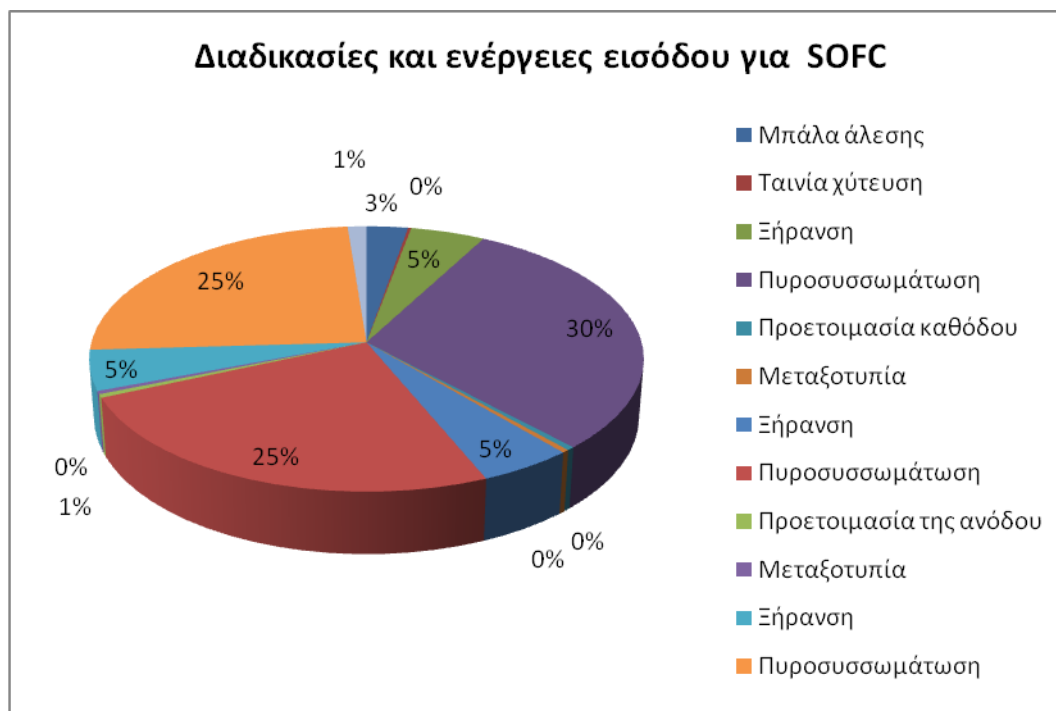


Σχήμα 2: Διάγραμμα κατασκευής PEN(positive- electrolyte-negative) και διασύνδεσης για SOFC [25]

Στην εικόνα 35 απεικονίζονται τα υλικά και οι ποσότητές τους που απαιτούνται για τη δημιουργία μιας κυψέλης SOFC. Ακολουθεί η εικόνα 36 που παρουσιάζει τις ενέργειες για την κατασκευή SOFC ποσοστιαία.



Εικόνα 35: Ποσότητες υλικών SOFC [29]



Εικόνα 36: Ενέργειες για την κατασκευή SOFC σε ποσοστό επί του συνόλου (MJ/kW) [29]

Στον πίνακα 20 παρουσιάζονται οι συνολικές αέριες εκπομπές από την κατασκευή ενός συστήματος SOFC 5 kW. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι CO₂, SO_x, CO και μεθανίου. Ακολουθεί ο πίνακας 21 και 22 στους οποίους φαίνονται οι εκπομπές στο νερό και στο έδαφος αντίστοιχα.

Πίνακας 20: Συνολικές αέριες εκπομπές κύκλου ζωής από την κατασκευή ενός συστήματος SOFC 5 kW [29]

Ουσία	Μονάδα	Εκπομπή
CO ₂	kg	1630
SO _x	kg	23.910
CO	kg	6.9
Μεθάνιο	kg	3.75
NO _x	kg	3.199
Σκόνη	kg	2.334
PM ₁₀ και SPM	kg	1.269
VOC	kg	1.136
Αιθάλη	g	334
Σωματίδια	g	206
HCl	g	125
Υδρογονάνθρακες	g	142.7
K	g	45
HF	g	43.1
Si	g	35.1
N ₂ O	g	30.4
N ₂	g	25
Fe	g	24.1
Αιθάνιο	g	21.6
CFC-14	g	19.8
Al	g	17.8
Πεντάνιο	g	16.3
Προπάνιο	g	15.9
H ₂ S	g	14.5
Βουτάνιο	g	12.9
Mn	g	11.7
Ευλένιο	g	10.2
He	g	8.66
V	g	8.02
Αιθένιο	g	7.93
Zn	g	6.57
Mg	g	6.29
Αλκάνια	g	5.33

Πίνακας 21: Συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής στο νερό από την κατασκευή ενός συστήματος SOFC 5 kW [29]

Ουσία	Μονάδα	Εκπομπή
Μεταλλικά ιόντα	kg	15.7
Ανόργανα γενικά	kg	8.88
Cl ⁻	kg	8.78
Θειικά	kg	3.999
Na	kg	2.75
Ιόντα ασβεστίου	g	802
Al	g	711
Mg	g	585
Αδιάλυτες ουσίες	g	572
TOC	g	416
Fe	g	335
Διαλυμένα στερεά	g	511
Άλατα	g	288

Ουσία	Μονάδα	Εκπομπή
K	g	243
Βαρύτης	g	137
Λίπη / έλαια	g	120
Ba	g	72.5
Αιωρούμενα στερεά	g	66.57
Sr	g	46.6
Ιόντα φθορίου	g	43.6
Φωσφορικό άλας	g	42.6
Ti	g	42.5
COD	g	36.1
Λιπαρά οξέα	g	32.1
BOD	g	27.8
Mn	g	15.3
NH ₃ (ως N)	g	11.9
Νιτρικά	g	11
Zn	g	9.72
Pb	g	8.26
Cr (III)	g	7.76
N-top	g	7.5

Πίνακας 22 : Συνολικές εκπομπές κύκλου ζωής τους στο έδαφος από την κατασκευή ενός συστήματος SOFC 5 kW

Ουσία	Μονάδα	Εκπομπή
Ορυκτά	kg	2.77
Σκουριές / τέφρα	g	625
αδρανή χημικά	g	470
Μικτή βιομηχανική	g	49.1
Ρυθμιζόμενες χημικές ουσίες	g	43.9
Ca	g	35.7
C	g	27.6
Fe	g	17.9
Al	g	8.92
Πετρέλαιο	g	5.54
S	g	5.37

Ο ηλεκτρολύτης, σε μια 24 kW σειρά SOFC (σχήμα 3), από ύτριο και οξείδιο του ζirkονίου(YSZ) λόγω της αγωγιμότητας θα πρέπει να είναι όσο πιο λεπτός γίνεται και παράλληλα να τηρεί τις απαιτήσεις της πυκνότητας του φυσικού αερίου και της χημικής σταθερότητας.

Μετά από κάθε στάδιο της μεθόδου το ηλεκτρόδιο ξεραίνεται. Η άνοδος αποτελείται από ένα μείγμα οξειδίων του νικελίου και YSZ. Είναι επιθυμητό ένα όσο το δυνατόν συνεχές στρώμα νικελίου ώστε να διοχετεύσει τα ηλεκτρόνια και να υποστηρίξει την απελευθέρωση των ηλεκτρονίων καταλυτικά.

Για την κάθοδο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο μέταλλο εξαιτίας του κινδύνου διάβρωσης. Ένα κεραμικό υλικό ($\text{La}_{0,84}\text{Sr}_{0,16}\text{MnO}_3$), του οποίου η προσθήκη του

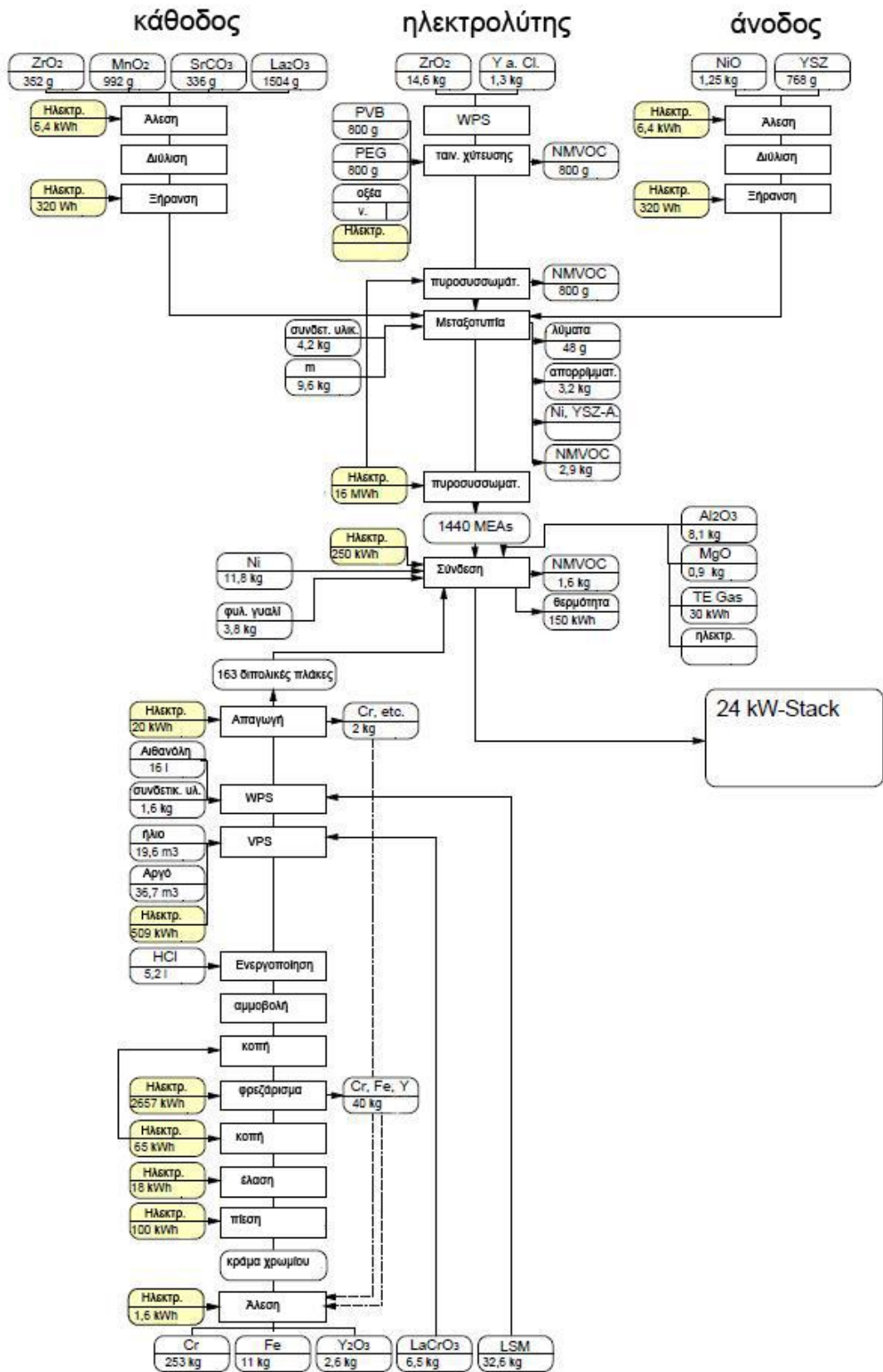
στροντίου σε επαρκή ηλεκτρική αγωγιμότητα οδηγεί σε βλάβη των ηλεκτρονίων, ενδείκνυται λόγω των παρόμοιων συντελεστών θερμικής επέκτασης με το YSZ.

Η Μονάδα Μembrάνης ηλεκτροδίων (MEA) προωθείται στην ηλεκτρική συσκευή για τη δεύτερη διαδικασία ξήρανσης. Η διπολική πλάκα πρέπει να είναι ανθεκτική στη διάβρωση και αεροστεγής, όπως και εξαιρετικά αγωγήμη ηλεκτρικά και θερμικά. Ο συντελεστής διαστολής πρέπει να συμμορφώνεται με τις κεραμικές πλάκες. Στο σχέδιο της Siemens γίνεται χρήση βάσεων κραμάτων χρωμίου.

Στην εξεταζόμενη σειρά αναφοράς χρησιμοποιείται ως υλικό το Ducrolloy CrFe5Y₂O₃l. Η πρώτη ύλη πρώτα αλέθεται και στη συνέχεια πιέζεται ζεστά και ισοστατικά.

Στη συνέχεια δημιουργείται μέσω του κενού ψεκασμού πλάσματος μια προστατευτική επίστρωση από LaCrO₃, η οποία εμποδίζει την εξάτμιση των οξειδίων του χρωμίου, ανάλογα με την περιεκτικότητα νερού στον αέρα, από τη διπολική πλάκα.

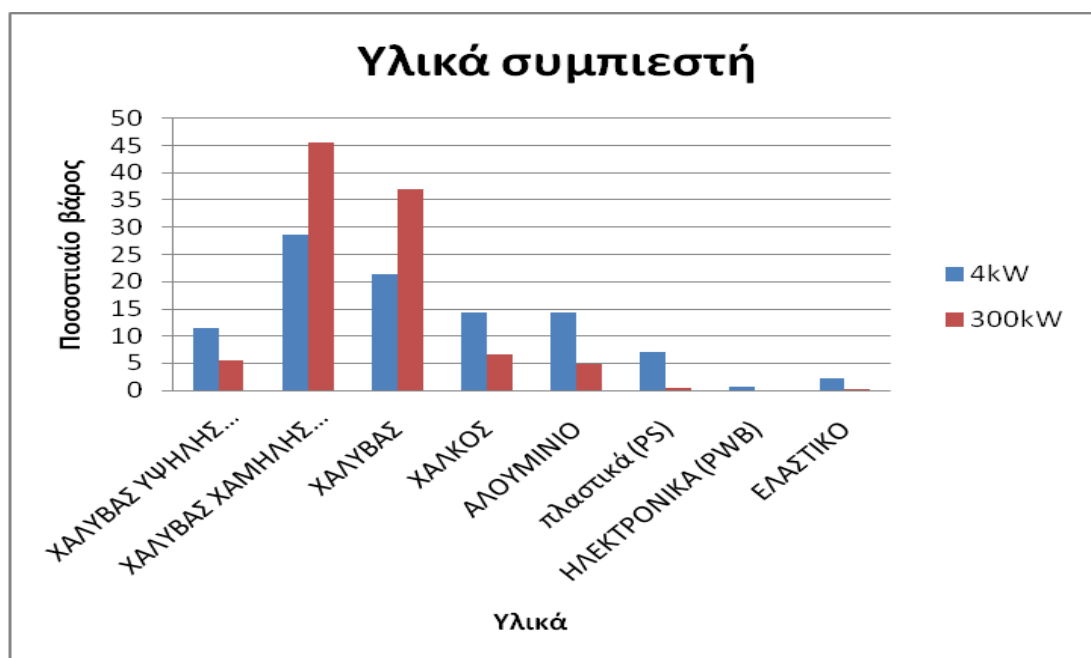
Σαν υλικό για το πλαίσιο σπινελίου επιλέγεται ένα μείγμα από Al₂O₃, MgO και ένα υλικό πληρώσεως. Το πλαίσιο επεξεργάζεται θερμικά σε θερμοκρασία μεταξύ 1000 - 1300 ° C σε ένα θερμοθάλαμο. Τέλος, τα επιμέρους επίπεδα πλάκας αλληλεπικαλύπτονται, σφραγίζονται με μονωτικό γυαλί για και τοποθετούνται μαζί. Η χρήση ηλεκτρισμού για τη θερμοσυσσωμάτωση του MEA και η χρήση του χρωμίου εμφανίζονται ως ιδιαίτερα συσχετιζόμενα βήματα διαδικασίας. [30]



Σχήμα 3: Διάγραμμα κατασκευής SOFC- 24 kW [30]

5.9 Ανάλυση κύκλου ζωής συμπιεστή

Το ποσό συμπιεσμένου αέρα που παράγεται ανά συμπιεστή όχι μόνο ποικίλλει μεταξύ των επιχειρήσεων αλλά εξαρτάται επίσης από το ποσοστό διαρροής. Επομένως, η παραγωγή συμπιεσμένου αέρα ενός ενιαίου συμπιεστή υπολογίζεται χωριστά για τις μέσες, βελτιστοποιημένες και καλύτερες εγκαταστάσεις καθώς επίσης και για τις μικρές. Ο μέσος συμπιεστής λειτουργεί 750 ώρες το χρόνο. Στην εικόνα 37 παρουσιάζονται τα υλικά για συμπιεστή 4 και 300 kW.



Εικόνα 37: Υλικά συμπιεστή 4 KW και 300 KW [31]

Στον πίνακα 23 παρατηρείται ο υπολογισμός συμπιεσμένου αέρα που παράγεται από μια ενιαία μονάδα του συμπιεστή.

Πίνακας 23: Υπολογισμός συμπιεσμένου αέρα που παράγεται από μια ενιαία μονάδα του συμπιεστή [31]

Διαρροή Ποσοστό διαρροής	<30 kW network		>30 kW network		
	Μέση	Βελτιστοποιημένη	Μέση	Βελτιστοποιημένη	Βέλτιστη
	50%	5%	50%	15%	10%
Μονάδες	2	2	4	4	4
Συμπιεσμένος αέρας (Nm ³ /h)	2.15	1.13	5641	4646	4387
Συμπιεσμένος αέρας στη διάρκεια ζωής του συμπιεστή Nm ³ /life	1.21 E+04	6.37E+03	1.59E+07	1.31E+07	1.23E+07
Ζήτηση μονάδα/Nm ³	8.26E-05	1.57E-04	6.30E-08	7.65E-08	8.10E-08

5.9.1 Λειτουργία ενός δικτύου παροχής συμπιεσμένου αέρα

Ένα οικονομικά ανεκτό ποσοστό διαρροής είναι 15% ή χαμηλότερο. Στον πίνακα 24 παρουσιάζεται το οικονομικό ανεκτό ποσοστό διαρροής.

Πίνακας 24: Οικονομικά ανεκτό ποσοστό διαρροής [31]

	Ανεκτό ποσοστό διαρροής
Μικρό δίκτυο	5%
Μέσο	7%
Μεγάλο	10%
Πολύ μεγάλο	15%

Μια αλλαγή στο επίπεδο πίεσης από 1 bar οδηγεί σε μια αλλαγή περίπου 7% στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στον πίνακα 25 παρουσιάζεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και ποσοστό διαρροής που χρησιμοποιείται για τις εγκαταστάσεις συμπιεσμένου αέρα >30kW. Στον πίνακα 26 παρουσιάζονται τα δεδομένα για συμπιεστή αέρα τύπου screw-type. Ακολουθούν οι πίνακες 27 και 28 με τα δεδομένα του συμπιεστή μέσης παραγωγής και βελτιστοποιημένης παραγωγής μεγαλύτερης των 30 kW στον συμπιεστή αντίστοιχα. Επιπλέον σε ότι αφορά στις περιπτώσεις βελτιστοποιημένης και μέσης εγκατάστασης παροχής δικτύου μεγαλύτερη των 30 kW τα δεδομένα τους παρουσιάζονται στους πίνακες 29 και 30 αντίστοιχα. Στην συνέχεια στον πίνακα 31 αναγράφονται τα δεδομένα του συμπιεστή, βέλτιστης παραγωγής με εφαρμοζόμενη ισχύ μεγαλύτερη των 30 kW. Ο πίνακας 32 αναφέρει τα δεδομένα βέλτιστης εγκατάστασης παροχής δικτύου μεγαλύτερης από τα 30 kW. [31]

Πίνακας 25: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και ποσοστό διαρροής που χρησιμοποιείται για τις εγκαταστάσεις συμπιεσμένου αέρα >30kW [31]

Εγκατάσταση σε >30kW		6 bar	7 bar	8 bar
Μέσες τιμές Ποσοστό διαρροής Κατανάλωση ηλεκτρισμού ανά όγκο αέρα	% kWh/m ³	30% 0.139	30% 0.149	30% 0.159
Βελτιστοποιημένες τιμές Ποσοστό διαρροής Κατανάλωση ηλεκτρισμού ανά όγκο αέρα	% kWh/m ³	15% 0.119	15% 0.128	15% 0.137
Βέλτιστες τιμές Ποσοστό διαρροής Κατανάλωση ηλεκτρισμού ανά όγκο αέρα	% kWh/m ³	10% 0.091	10% 0.097	10% 0.104

Πίνακας 26: Δεδομένα για συμπιεστή αέρα τύπου screw-type [31]

	Όνομα	Μονάδα	4 kW	300 kW
Technosphere	Χρωμιούχος χάλυβας 18/8	kg	1.60E+1	2.50E+2
	χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης	kg	4.00E-1	2.10E+3
	Χυτοσίδηρος	kg	3.00E-1	1.70E-3
	Χαλκός	kg	2.00E+1	3.00E+2
	Αλουμίνιο, μείγμα παραγωγής	kg	2.00E+1	2.20E+2
	Πολυστυρένιο, HIPS	kg	1.00E+1	2.00E-1
	Τυπωμένο κύκλωμα	m ²	2.51E-1	2.51 E-1
	Συνθετικό ελαστικό	kg	3.00E+0	9.00E+0
	Φύλλο χρωμιούχου χάλυβα	kg	1.60E+1	2.50E+2
	Φύλλο χάλυβα	kg	4.00E+1	2.10E+3
	Φύλλο αλουμινίου	kg	2.00E-1	2.20E+2
	Σχεδιασμός κυκλώματος, χαλκός	kg	2.00E+1	3.00E+2
	έγχυση	kg	1.00E+1	2.00E+1
	Διάθεση, πολυστυρένιο, 0.2% νερό	kg	1.00E+1	2.00E+1
	Διάθεση, ελαστικό, 0% νερό	kg	3.00E+0	9.00E+0
	Μεταφορά, φορτηγό 32t	tkm	1.40E+1	4.60E+2
Μεταφορά, σιδηρόδρομος	tkm	2.80E+1	9.20E-2	

Πίνακας 27: Δεδομένα συμπιεστή, μέσης παραγωγής >30 kW στον συμπιεστή [31]

	Όνομα	Μονάδα	6 bar	7 bar	8 bar
Technosphere	Συμπιεστής αέρα τύπου screw-type, 300 kW	unit	6.30E-8	6.30E-8	6.30E-8
	Λιπαντικό λάδι	kg	2.08E-6	2.08E-6	2.08E-6
	διάθεση, χρησιμοποιημένο ορυκτέλαιο, 10% νερό	kg	2.08E-6	2.08E-6	2.08E-6
	Ηλεκτρισμός, χαμηλής τάσης παραγωγής UCTE	kWh	1.39E-1	1.49E-5	1.59E-1
	Μεταφορά, φορτηγό >16t	tkm	2.90E-5	2.90E-5	2.90E-5
	Μεταφορά, σιδηρόδρομος	tkm	5.80E-5	5.80E-5	5.80E-5
Εκπομπές αέρα	Απορριπτόμενη θερμότητα	MJ	4.99E-1	5.36E-1	5.74E-1

Πίνακας 28: Δεδομένα συμπιεστή, βελτιστοποιημένης παραγωγής >30 kW στον συμπιεστή [31]

	Όνομα	Μονάδα	6 bar	7 bar	8 bar
Technosphere	Συμπιεστής αέρα τύπου screw-type, 300 kW	unit	7.65E-8	7.65E-8	7.65E-8
	Λιπαντικό λάδι	kg	2.08E-6	2.08E-6	2.08E-6
	Διάθεση, χρησιμοποιημένο ορυκτέλαιο, 10% νερό	kg	2.08E-6	2.08E-6	2.08E-6
	Ηλεκτρισμός, χαμηλής τάσης παραγωγής UCTE	kWh	1.19E-1	1.28E-5	1.37E-1
	Μεταφορά, φορτηγό >16t	tkm	3.52E-5	3.52E-5	3.52E-5
	Μεταφορά, σιδηρόδρομος	tkm	7.04E-5	7.04E-5	7.04E-5
Εκπομπές αέρα	Απορριπτόμενη θερμότητα	MJ	4.29E-1	4.61E-1	4.93E-1

Πίνακας 29: Δεδομένα συμπιεστή, βέλτιστης παραγωγής >30 kW στον συμπιεστή [31]

	Όνομα	Μονάδα	6 bar	7 bar	8 bar
Technosphere	Συμπιεστής αέρα τύπου screw-type, 300 kW	unit	8.10E-8	8.10E-8	8.10E-8
	Λιπαντικό λάδι	kg	2.08E-6	2.08E-6	2.08E-6
	διάθεση, χρησιμοποιημένο ορυκτέλαιο, 10% νερό	kg	2.08E-6	2.08E-6	2.08E-6
	Ηλεκτρισμός, χαμηλής τάσης παραγωγής UCTE	kWh	9.10E-2	9.74E-2	1.04E-1
	Μεταφορά, φορτηγό >16t	tkm	3.73E-5	3.73E-5	3.73E-5
	Μεταφορά, σιδηρόδρομος	tkm	7.46E-5	7.46E-5	7.46E-5
Εκπομπές αέρα	Απορριπτόμενη θερμότητα	MJ	3.28E-1	3.51E-1	3.75E-1

Πίνακας 30: Δεδομένα μέσης εγκατάστασης >30 kW παροχής δικτύου [31]

	Όνομα	Μονάδα	6 bar	7 bar	8 bar
Technosphere	Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης	kg	9.79E-5	9.79E-5	9.79E-5
	Section bar rolling, steel	kg	9.79E-5	9.79E-5	9.79E-5
	Μεταφορά, φορτηγό >16t	tkm	9.79E-6	9.79E-6	9.79E-6
	Μεταφορά, σιδηρόδρομος	tkm	1.96E-5	1.96E-5	1.96E-5
	Μέση παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 6 bar	m ³	1.3		
	Μέση παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 7 bar	m ³		1.3	
	Μέση παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 8 bar	m ³			1.3

Πίνακας 31: Δεδομένα βελτιστοποιημένων εγκατάστασης >30 kW παροχής δικτύου [31]

	Όνομα	Μονάδα	6 bar	7 bar	8 bar
Technosphere	Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης	kg	9.79E-5	9.79E-5	9.79E-5
	Section bar rolling, steel	kg	9.79E-5	9.79E-5	9.79E-5
	Μεταφορά, φορτηγό >16t	tkm	9.79E-6	9.79E-6	9.79E-6
	Μεταφορά, σιδηρόδρομος	tkm	1.96E-5	1.96E-5	1.96E-5
	Βελτιστοποιημένη παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 6 bar	m ³	1.15		
	Βελτιστοποιημένη παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 7 bar	m ³		1.15	
	Βελτιστοποιημένη παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 8 bar	m ³			1.15

Πίνακας 32: Δεδομένα βέλτιστης εγκατάστασης >30 kW παροχής δικτύου [31]

	Όνομα	Μονάδα	6 bar	7 bar	8 bar
Technosphere	Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης	kg	9.79E-5	9.79E-5	9.79E-5
	Section bar rolling, steel	kg	9.79E-5	9.79E-5	9.79E-5
	Μεταφορά, φορτηγό >16t	tkm	9.79E-6	9.79E-6	9.79E-6
	Μεταφορά, σιδηρόδρομος	tkm	1.96E-5	1.96E-5	1.96E-5
	Βέλτιστη παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 6 bar	m ³	1.1		
	Βέλτιστη παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 7 bar	m ³		1.1	
	Βέλτιστη παραγωγή >30 kW στον συμπιεστή, 8 bar	m ³			1.1

5.10 Ανάλυση κύκλου ζωής υπερπυκνωτή

Ο υπερπυκνωτής (supercapacitor ή ultracapacitor) είναι μία συσκευή αποθήκευσης ενέργειας για πολλές εφαρμογές αφού έχει ένα μοναδικό χαρακτηριστικό: την πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος του. Μπορεί δηλαδή να παρέχει ενέργεια και σε πολύ γρήγορες μεταβολές του φορτίου. Δύο είναι οι κύριες παράμετροι που εξετάζονται στις συσκευές αποθήκευσης ενέργειας: η πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg) και ισχύος (W/Kg).

Όσον αφορά στα βοηθητικά συστήματα υπολογίζεται μία ποσότητα 0.99 kg/kg πυκνωτή. Σε σχέση με την ενέργεια υπολογίζεται μια μέση ηλεκτρική ενέργεια 48.7 kWh/kg πυκνωτή και 25.3 MJ φυσικού αερίου για ένα kg πυκνωτή.

Σε ότι έχει να κάνει με τις εκπομπές στον αέρα υπολογίζεται μία ποσότητα 0.34 kg/kg πυκνωτή. Επιπλέον παράγονται 1.13 kg αποβλήτων. Στον πίνακα 33 παρουσιάζονται δεδομένα σχετικά με το τι απαιτείται για την παραγωγή του πυκνωτή καθώς και τι απόβλητα δημιουργεί η συγκεκριμένη διαδικασία. [33]

Πίνακας 33: Δεδομένα παραγωγής πυκνωτή [33]

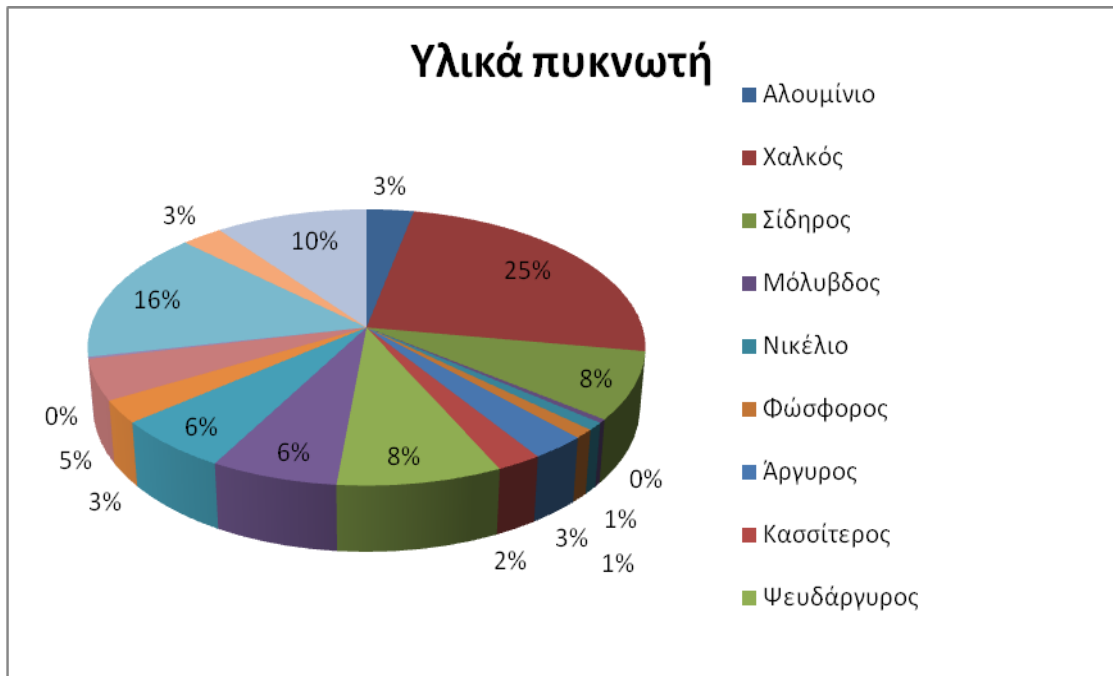
Είσοδος	Έξοδος	Κατηγορία	Όνομα στο ecoinvent	Μέση τιμή	Μονάδα
Νερό (διαδικασία)		Πόροι	Νερό, αδιευκρίνιστης προέλευσης	1.50 E-01	m ³
Νερό (ψύξη)		Πόροι	Νερό, αδιευκρίνιστης προέλευσης	1.30E-01	m ³
Ακετόνη		Χημικά	Ακετόνη	9.90E-02	kg
Ethyl acetate		Χημικά	ethyl acetate από βουτάνιο	3.96E-01	kg
Methyl ethyl ketone		Χημικά	methyl ethyl ketone από βουτάνιο	3.96E-01	kg
Σκληρυντικό		Χημικά	Οργανικά χημικά	9.90E-02	kg
ηλεκτρισμός		ηλεκτρισμός	Ηλεκτρισμός, μέσης τάσης	4.87E+01	kWh
Φυσικό αέριο		Φυσικό αέριο	Θερμότητα, Φ.Α.	2.53E+01	MJ
μεταφορά (φορτηγό)		συστήματα μεταφοράς	Μεταφορά, φορτηγό >16t	2.47E-01	tkm
Μεταφορά (τρένο)		συστήματα μεταφοράς	Μεταφορά, σιδηρόδρομος	1.48E+00	tkm
Υποδομή		ηλεκτρονικά	Ηλεκτρονικό συστατικό παραγωγής	2.00E-08	unit
	Απόβλητα	Διαχείριση αποβλήτων	Διάθεση, μείγμα διαλυμάτων. 16.5% νερό σε επικίνδυνα απόβλητα από καύση	6.50E-01	kg
	Απόβλητα	Διαχείριση αποβλήτων	διάθεση, πλαστικά, 15.3% νερό σε ΧΥΤΑ	2.40E-01	kg
	Απόβλητα	Διαχείριση αποβλήτων	Διάθεση, απόβλητα, Si, ανόργανα, 9.4% νερό σε ΧΥΤΑ	2.40E-01	kg
	Διαχείριση λυμάτων	Διαχείριση αποβλήτων	Διαχείριση λυμάτων δεύτερης γενιάς	1.50E-01	m ³
	Θερμότητα	Αέρας	Απορριπτόμενη θερμότητα	1.75E+02	MJ
	Ακετόνη	Αέρας	Ακετόνη	3.40E-02	kg
	ethyl acetate,	Αέρας	Ethyl acetate	1.36E-01	kg
	methyl ethyl	Αέρας	Methyl ethyl ketone	1.36E-01	kg

	ketone				
	Σκληρυντικό	Αέρας	NM VOC	3.40E-02	kg

5.10.1 Πυκνωτής τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση (Capacitor, film, through-hole mounting)

Ένας πυκνωτής τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση αποτελείται από υλικά όπως αλουμίνιο, χαλκό, σίδηρο, μόλυβδο και άλλα υλικά τα οποία φαίνονται στην εικόνα 38. Ένας πυκνωτής τέτοιου τύπου έχει ως λειτουργική μονάδα το 1 kg πυκνωτή με βάση ένα μέσο μέγεθος 0.7 g.

Σύμφωνα με τα στοιχεία «παραγωγής πυκνωτών» η παραγωγή 1 kg πυκνωτή οδηγεί σε 1.13 kg αποβλήτων – από τα οποία το 0.48 kg είναι αχρησιμοποίητες πρώτες ύλες. Ο πίνακας 34 παρουσιάζει τα δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση. Πιο συγκεκριμένα αναφέρει ποια είναι η μέση τιμή το βάρους του κάθε ενός υλικού στοιχείου που τον αποτελεί.



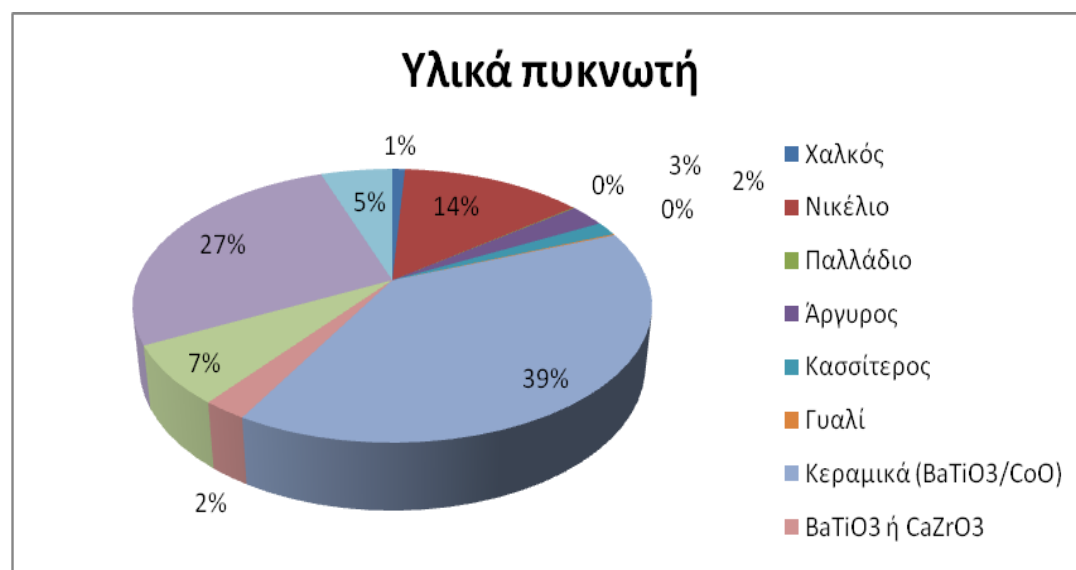
Εικόνα 38: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση [33]

Πίνακας 34: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση [33]

Είσοδος	Κατηγορία	Όνομα στο ecoinvent	Μέση τιμή	Μονάδα
Προσπάθειες παραγωγής	Ηλεκτρονικά	Προσπάθειες παραγωγής	1.00E+00	kg
Αλουμίνιο	μέταλλα	Αλουμίνιο	4.65E-02	kg
Χαλκός	μέταλλα	Χαλκός	3.64 E-01	kg
Σίδηρος	μέταλλα	Σίδηρος	1.17E-01	kg
Μόλυβδος	μέταλλα	Μόλυβδος	6.07E-03	kg
Νικέλιο	μέταλλα	Νικέλιο 99.5%	1.33E-02	kg
Φώσφορος	χημικά	Φώρφορος, λευκός, υγρός,	1.55E-02	kg
Ασήμι	μέταλλα	Ασήμι	4.16 E-02	kg
Κασσίτερος	Μέταλλα	Κασσίτερος	3.39E-02	kg
Ψευδάργυρος	Μέταλλα	Ψευδάργυρος	1.24E-01	kg
PPS	Πλαστικά	PPS	2.60E-01	kg
Πολυπροπυλένιο	Πλαστικά	Πολυπροπυλένιο	7.41E-02	kg
PET	Πλαστικά	polyethylene terephthalate	3.52E-02	kg
Φαινολική ρητίνη	Χρώματα	Φαινολική ρητίνη	3.55E-03	kg
Εποξική ρητίνη	Πλαστικά	Εποξική ρητίνη	3.45E-01	kg

5.10.2 Πυκνωτής τύπου SMD

Ο πυκνωτής τύπου SMD έχει λειτουργική μονάδα το 1 kg πυκνωτή με βάση ένα μέσο μέγεθος 0.086 g. Το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει μόνο τις πρώτες ύλες. Σύμφωνα με το σύνολο δεδομένων " παραγωγή πυκνωτών" , η παραγωγή 1 kg πυκνωτή οδηγεί σε ένα ποσό αποβλήτων 1.13 kg. Τα υλικά και η ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου SMD απεικονίζεται στην εικόνα 39. Στον πίνακα 35 παρουσιάζονται τα δεδομένα απογραφής για τον συγκεκριμένο τύπο πυκνωτή.



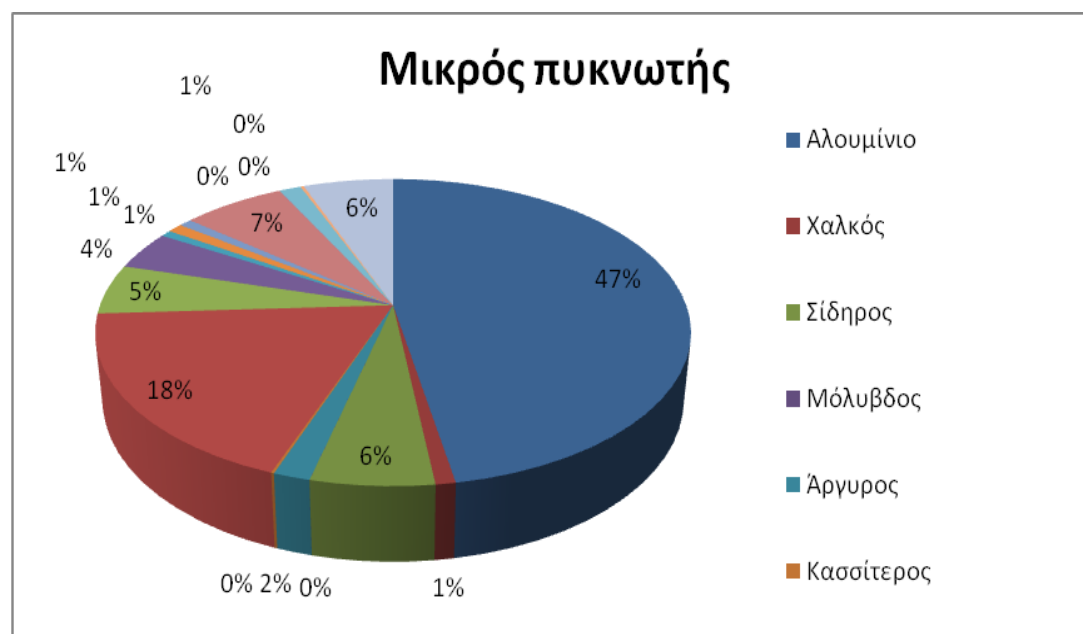
Εικόνα 39: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου SMD [33]

Πίνακας 35: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου SMD [33]

Είσοδος	Κατηγορία	Όνομα στο ecoinvent	Μέση τιμή	Μονάδα
Προσπάθειες παραγωγής	Ηλεκτρονικά	Προσπάθειες παραγωγής	1.00E+00	kg
Χαλκός	μέταλλα	Χαλκός	1.41E-02	kg
Νικέλιο	μέταλλα	Νικέλιο 99.5%	2.01E-01	kg
Παλλάδιο	μέταλλα	Παλλάδιο	1.33E-03	kg
Άργυρος	μέταλλα	Άργυρος	3.92E-02	kg
Κασσίτερος	μέταλλα	Κασσίτερος	2.44E-02	kg
Γυαλί	γυαλί	Επίπεδο γυαλί	2.22E-03	kg
Κεραμικά (BaTiO ₃)	χημικά	Βαρύτης	7.91E-01	kg

5.10.3 Πυκνωτής τύπου ηλεκτρολύτη

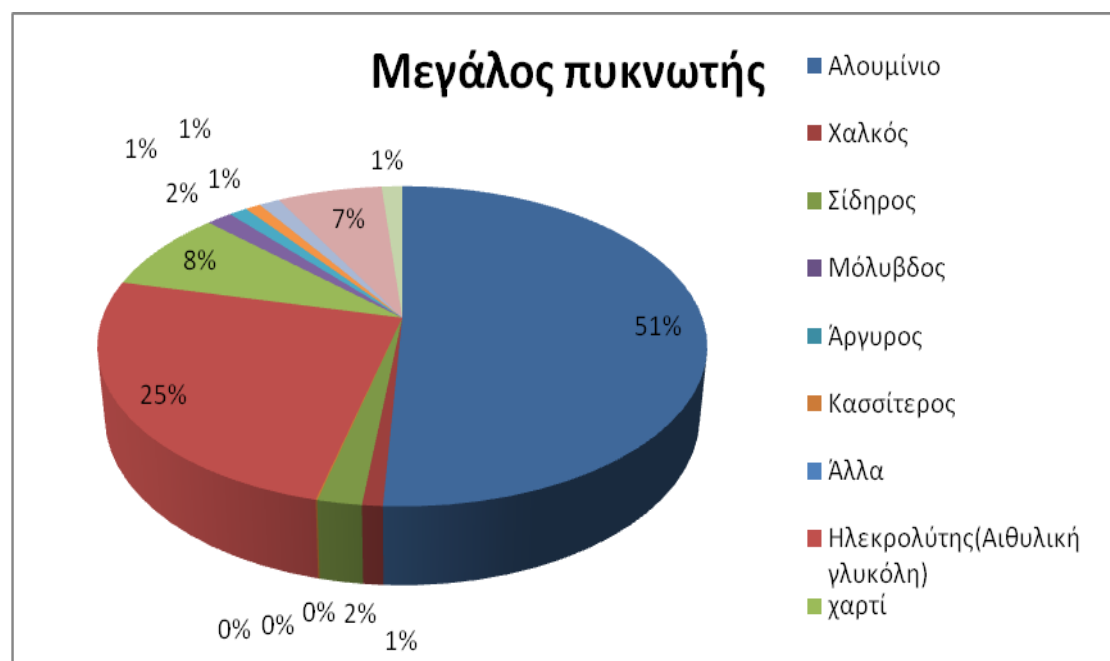
Τα δύο σύνολα δεδομένων περιγράφουν εδώ την υλική σύνθεση της παραγωγής των μικρών και μεγάλων πυκνωτών τύπου ηλεκτρολύτη (εικόνες 40 και 41 και πίνακες 36 και 37 αντίστοιχα). Έχουν ως λειτουργική μονάδα το 1 kg πυκνωτή με βάση ένα μέσο μέγεθος μικρού πυκνωτή 1.29 g και ένα μέσο μέγεθος μεγάλου πυκνωτή 50.5 g. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 40 και 41 τόσο ο μικρός όσο και ο μεγάλος πυκνωτής αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από αλουμίνιο και χαλκό.



Εικόνα 40: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη <2 cm σε ύψος [33]

Πίνακας 36: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη <2 cm σε ύψος[33]

Είσοδος	Κατηγορία	Όνομα στο ecoinvent	Μέση τιμή	Μονάδα
Προσπάθειες παραγωγής	Ηλεκτρονικά	Προσπάθειες παραγωγής	1.00E+00	kg
Αλουμίνιο	μέταλλα	Αλουμίνιο	6.99E-01	kg
Χαλκός	μέταλλα	Χαλκός	1.36E-02	kg
Σίδηρος	μέταλλα	Σίδηρος	8.44E-02	kg
Μόλυβδος	μέταλλα	Μόλυβδος	4.88E-05	kg
Ασήμι	μέταλλα	Ασήμι	2.52E-02	kg
Κασσίτερος	μέταλλα	Κασσίτερος	2.07E-03	kg
Ηλεκτρολύτης (ethylene glycol)	χημικά	Ethylene glycol	2.74E-01	kg
Χαρτί	χαρτικά	Χαρτί Kraft	8.35E-02	Kg
Ελαστικό	Πλαστικά	Συνθετικό ελαστικό	6.58E-02	Kg
PVC	Πλαστικά	Πολυβινυλοχλωρίδιο	6.96E-02	Kg
PET	Πλαστικά	Polyethylene terephthamate, granulate. amorphous,	5.48 E-02	Kg
Nylon 6	Πλαστικά	Nylon 6	3.70E-04	kg
PPS	Πλαστικά	Polyphenylene sulfide	2.38 E-02	kg
Εποξική ρητίνη	Πλαστικά	Εποξική ρητίνη, υγρό	8.58 E-02	kg



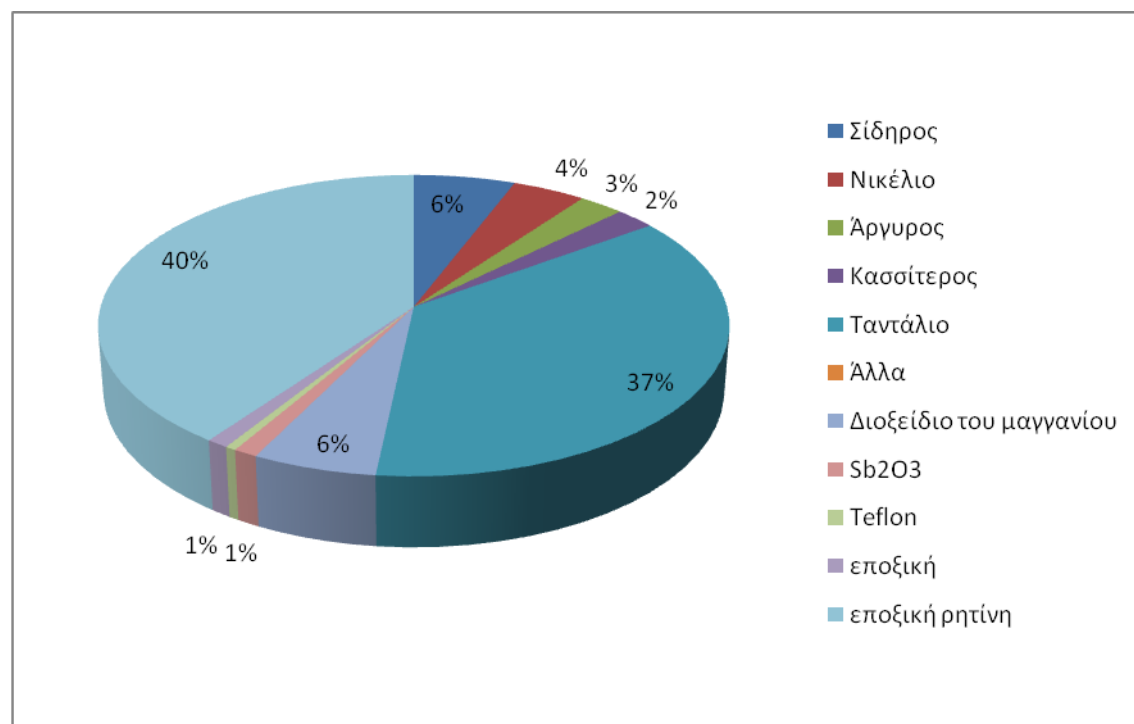
Εικόνα 41: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη >2 cm σε ύψος [33]

Πίνακας 37: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη >2 cm σε ύψος[33]

Είσοδος	Κατηγορία	Όνομα στο ecoinvent	Μέση τιμή	Μονάδα
Προσπάθειες παραγωγής	Ηλεκτρονικά	Προσπάθειες παραγωγής	1.00E+00	kg
Αλουμίνιο	μέταλλα	Αλουμίνιο	7.53E-01	kg
Χαλκός	μέταλλα	Χαλκός	1.36E-02	kg
Σίδηρος	μέταλλα	Σίδηρος	2.96E-02	kg
Κασσίτερος	μέταλλα	Κασσίτερος	1.08E-03	kg
Ηλεκτρολύτης (ethylene glycol)	χημικά	ethylene glycol	3.70E-01	kg
Χαρτί	χαρτικά	Χαρτί Kraft	1.32E-01	kg
Ελαστικό	Πλαστικά	Συνθετικό ελαστικό	3.26E-02	kg
PVC	Πλαστικά	Πολυβινυλοχλωρίδιο	7.33E-02	kg
PET	Πλαστικά	Polyethylene terephthamate, granulate amorphous	5.85 E-02	kg
Nylon 6	Πλαστικά	Nylon 6.	9.62E-03	kg
Φαινολική ρητίνη	χρώματα	Φαινολική ρητίνη	9.62 E-03	kg

5.10.4 Πυκνωτής τανταλίου ενδιάμεσης οπής

Ο πυκνωτής τανταλίου ενδιάμεσης οπής (capacitor tantalum through-hole mounting) αποτελείται ως επί ο πλείστον από ταντάλιο που φτάνει το ποσοστό του 37% και από εποξική ρητίνη που φτάνει το 40% (εικόνα 42). Έχουν ως λειτουργική μονάδα το 1 kg πυκνωτή με βάση ένα μέσο μέγεθος πυκνωτή 0.254 g. Ο πίνακας 38 παρουσιάζει τα δεδομένα σχετικά με το μέσο βάρος του κάθε υλικού από τα οποία αποτελείται ένας πυκνωτής τύπου τανταλίου ενδιάμεσης οπής.



Εικόνα 42: Υλικά και ποσοστιαία σύνθεση του πυκνωτή τύπου τανταλίου ενδιάμεσης οπής [33]

Πίνακας 38: Δεδομένα απογραφής πυκνωτή τύπου τανταλίου ενδιάμεσης οπής (capacitor tantalum through- hole mounting) [33]

Είσοδος	Κατηγορία	Όνομα στο ecoinvent	Μέση τιμή	Μονάδα
Προσπάθειες παραγωγής	ηλεκτρονικά	Προσπάθειες παραγωγής	1.00E+00	kg
Σίδηρος	μέταλλα	Σίδηρος	8.67E-02	kg
Νικέλιο	μέταλλα	Νικέλιο, 99.5%	6.28E-02	kg
Ασήμι	μέταλλα	Ασήμι	3.85E-02	kg
Κασσίτερος	μέταλλα	Κασσίτερος	3.4E-02	kg
Ταντάλιο	μέταλλα	Ταντάλιο, σκόνη	5.43E-01	kg
Διοξείδιο μαγνησίου	μέταλλα	Μαγνήσιο	5.31E-02	kg
Sb ₂ O ₃	χημικά	Χημικά ανόργανα	1.63E-02	kg
Teflon	χημικά	Tetrafluoroethylene,	7.4E-02	kg
Εποξική ρητίνη	πλαστικά	Εποξική ρητίνη	6.07 E-01	kg

6. ΕΞΕΡΓΕΙΑ

Η αυξημένη ανησυχία για τους περιορισμένους ενεργειακούς πόρους του πλανήτη μας ώθησε αρκετές κυβερνήσεις να επανεξετάσουν την ενεργειακή τους πολιτική και να πάρουν μέτρα για την εξοικονόμηση της ενέργειας και τον περιορισμό της σπατάλης. Επιπλέον η επιστημονική κοινότητα αναγκάστηκε να εξετάσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις συσκευές μετατροπής ενέργειας και να αναπτύξει νέες τεχνικές για την καλύτερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων.

Ως γνωστόν ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος ασχολείται με την ποσότητα της ενέργειας και υποστηρίζει ότι η ενέργεια ούτε δημιουργείται ούτε καταστρέφεται. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος ασχολείται με την ποιότητα της ενέργειας . ειδικότερα αφορά τον υποβιβασμό της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, στην παραγωγή εντροπίας και στις χαμένες ευκαιρίες παραγωγής έργου. Η εξέργεια τώρα αποτελεί το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα το οποίο βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση και είναι σε συγκεκριμένο περιβάλλον.

Κάθε φορά που ανακαλύπτεται μια νέα πηγή ενέργειας, όπως για παράδειγμα ένα γεωθερμικό πηγάδι, το πρώτο μέλημα των επιστημόνων είναι να εκτιμήσουν την ποσότητα της ενέργειας που περιέχεται σ' αυτή την πηγή. Όμως η πληροφορία αυτή από μόνη της δεν είναι αρκετή για να αποφασιστεί η όχι η εγκατάσταση μιας μονάδας παραγωγής ισχύος στην περιοχή. Αυτό που πραγματικά πρέπει να γνωρίζει κανείς είναι η δυνατότητα παραγωγής έργου η το δυναμικό έργο της πηγής ή μ' αλλά λόγια η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να εξαχθεί με τη μορφή ωφέλιμου έργου για να τροφοδοτηθεί λ.χ. κάποια γεννήτρια. Το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας θα απορριφθεί τελικά σε χαμένη ενέργεια και δεν αξίζει να λαμβάνεται υπόψη. Έτσι, θα ήταν ιδιαίτερα επιθυμητό να υπάρχει μια ιδιότητα η οποία θα επιτρέπει τον καθορισμό της δυνατότητας παραγωγής ωφέλιμου έργου μιας δεδομένης ποσότητας ενέργειας σε συγκεκριμένη κατάσταση. Η ιδιότητα αυτή είναι η εξέργεια, η οποία ονομάζεται επίσης διαθεσιμότητα ή διαθέσιμη ενέργεια.

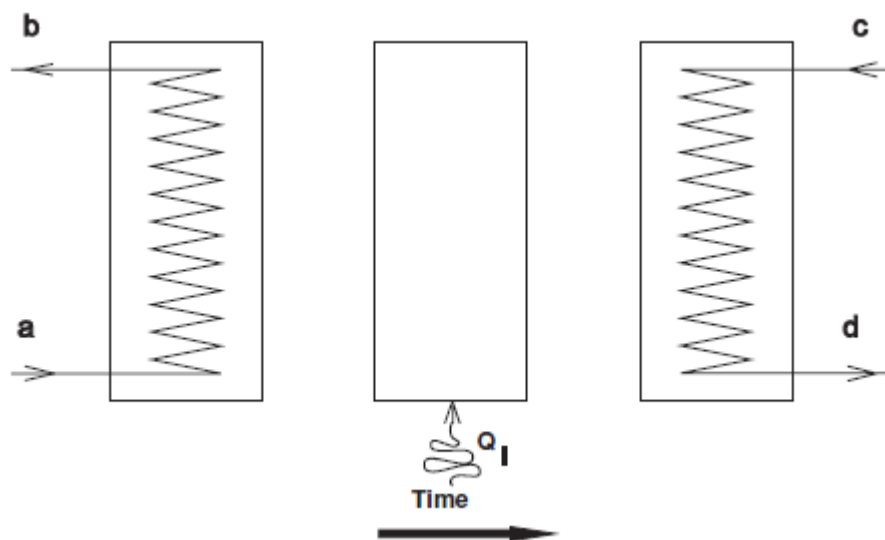
Το δυναμικό έργο της ενέργειας, που περιέχεται μέσα σ' ένα σύστημα σε μια συγκεκριμένη κατάσταση, είναι απλά το μέγιστο ωφέλιμο έργο που είναι το δυνατό να ληφθεί από το σύστημα. Όπως είναι ήδη γνωστό, το έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας εξαρτάται: (α) από την αρχική κατάσταση, (β) την τελική κατάσταση και (γ) από τη διαδρομή μέσα από την οποία πραγματοποιείται η διεργασία.

Στην ανάλυση της εξέργειας, η αρχική κατάσταση είναι πάντοτε καθορισμένη με αποτέλεσμα να μην αποτελεί μεταβλητή. Το έργο εξόδου μεγιστοποιείται όταν πραγματοποιείται αντιστρεπτά μια διεργασία μεταξύ δύο καθορισμένων

καταστάσεων. Προκειμένου επομένως να καθορισθεί η δυνατότητα του έργου αγνοούνται όλες οι αντιστρεπτότητες (απώλειες). Τελικά, για να μεγιστοποιηθεί το έργο εξόδου θα πρέπει το σύστημα στο τέλος της διεργασίας να βρεθεί σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας με το περιβάλλον του. [38]

6.1 Εξεργειακή ανάλυση CTES

Μία σημαντική εφαρμογή TES (αποθήκευσης θερμικής ενέργειας) είναι στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για την παροχή θέρμανσης ή ψύξης σε ένα κτήριο. Πρόσφατα, ιδιαίτερη προσοχή έχει συγκεντρωθεί στην κρύα TES (CTES), που αποτελεί μια οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία (εικόνα 43). Η εξεργειακή ανάλυση υπερνικά κάποιες ανεπάρκειες στις αξιολογήσεις CTES σε αντίθεση με την ενεργειακή ανάλυση. Καταδεικνύεται ότι η εξεργειακή ανάλυση παρέχει ρεαλιστικότερες αξιολογήσεις της αποδοτικότητας και της απόδοσης των συστημάτων CTES. [34]



Εικόνα 43: Φόρτιση (αριστερά), αποθήκευση (μέση), αποφόρτιση (δεξιά) [34]

Μια ενεργειακή ισορροπία για έναν κύκλο ενός CTES (cold thermal energy storage) έχει ως εξής:

Κρύο εισαγωγή - [Κρύο ανάκτηση + Κρύο απώλεια] = Κρύο συσσώρευση.

Το «Κρύο εισαγωγή» είναι η θερμότητα που αφαιρείται από το αποθηκευμένο ρευστό κατά τη διάρκεια της φόρτισης, το «Κρύο ανάκτηση» είναι η θερμότητα που αφαιρείται από το ρευστό αποθήκευσης, το «Κρύο απώλεια» είναι το κέρδος θερμότητας από το περιβάλλον κατά τη διάρκεια της φόρτισης, της αποθήκευσης και της αποφόρτισης και το «Κρύο συσσώρευση» είναι η μείωση στην εσωτερική ενέργεια του ρευστού αποθήκευσης κατά τη διάρκεια του κύκλου.

Η γενική ενεργειακή ισορροπία για το απλουστευμένο σύστημα CTES γίνεται

$$(H_b - H_a) - [(H_c - H_d) + Q_l] = -\Delta E \quad (25)$$

όπου H_a, H_b, H_c και H_d είναι οι ενθαλπίες των ροών στα σημεία a, b, c και d. Q_l είναι το συνολικό κέρδος θερμότητας κατά τη διάρκεια της φόρτισης, αποθήκευσης, και διαδικασίες αποφόρτισης και το ΔE είναι η διαφορά μεταξύ τελικής και αρχικής εσωτερικής ενέργειας.

Η μεταφορά ενέργειας που συνδέεται με το ρευστό φόρτισης μπορεί να εκφραστεί:

$$H_b - H_a = m_a (T_b - T_a) \quad (26)$$

όπου το m_a είναι η ροή μάζας του ρευστού στο σημείο α (και στο σημείο β). Μια παρόμοια έκφραση μπορεί να γραφτεί για τη $H_c - H_b$.

Το ενεργειακό περιεχόμενο της αποθηκευμένης μάζας είναι

$$E = m(u - u_o) \quad (27)$$

Για αισθητή θερμότητα μπορεί να γραφεί

$$E = m c (T - T_o) \quad (28)$$

Όπου c η ειδική θερμότητα (σταθερά), m η μάζα, u η ειδική εσωτερική ενέργεια και T η θερμοκρασία, επίσης, u_o η εσωτερική ενέργεια στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για ένα μίγμα στερεού και υγρού, το ενεργειακό περιεχόμενο του στερεού και του υγρού μπορούν να αξιολογηθούν χωριστά και να αθροιστούν ως εξής:

$$E = m[(1 - F)(u_s - u_o) + F(u_t - u_o)] \quad (29)$$

όπου u_s και u_t είναι οι ειδικές εσωτερικές ενέργειες του στερεού και του υγρού, αντίστοιχα, και F είναι το μέρος της ρευστής αποθηκευμένης μάζας στην υγρή φάση.

Για ένα ρευστό που είναι θερμικά στρωματοποιημένο, το ενεργειακό περιεχόμενο μπορεί να παρουσιαστεί με την εξίσωση

$$E = m c \left(\frac{T_t + T_b}{2} - T_o \right) \quad (30)$$

Όπου T_t και T_b είναι οι θερμοκρασίες στο άνω και στο κάτω τμήμα του στρώματος.

Η αλλαγή στο ενεργειακό περιεχόμενο της CTES από την αρχική (i) στην τελική (f) κατάσταση της διαδικασίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Delta E = E_f - E_i \quad (31)$$

Στην περίπτωση πανομοιότυπων καταστάσεων $\Delta E = 0$.

Μια εξεργειακή ισορροπία για έναν κύκλο ενός CTES έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Εξέργεια εισαγωγή} - [\text{Εξέργεια ανάκτηση} + \text{Εξέργεια απώλεια}] - \text{Εξέργεια} \\ \text{κατανάλωση} = \text{Εξέργεια συσσώρευση} \quad \text{ή} \\ (\epsilon_a - \epsilon_b) - [(\epsilon_d - \epsilon_c) + X_l] - I = \Delta \Xi \end{aligned} \quad (32)$$

όπου \in_a, \in_b, \in_c και \in_d είναι οι εξέργειες των ρών στις καταστάσεις a, b, c και d, αντίστοιχα; και X_l υποδηλώνει την απώλεια εξέργειας που σχετίζεται με Q_l ; I είναι η κατανάλωση εξέργειας και $\Delta \Xi$ είναι η συσσωρευμένη εξέργεια.

$H (\in_a - \in_b)$ αντιπροσωπεύει την καθαρή εξέργεια εισαγωγής και $(\in_d - \in_c)$ είναι η καθαρή ανακτημένη εξέργεια. Μέσα στην αγκύλη φαίνεται η καθαρή παραγωγή εξέργειας.

Οι όροι I, X_l και $\Delta \Xi$ δίνονται αντίστοιχα από

$$I = \sum_{j=1}^3 I_j, \quad X_l = \sum_{j=1}^3 X_{l,j}, \quad \Delta \Xi = \Xi_f - \Xi_i \quad (33)$$

όπου, I_1, I_2 και I_3 δείχνουν αντίστοιχα τις καταναλώσεις εξέργειας κατά τη διάρκεια της φόρτισης, αποθήκευσης και αποφόρτισης $X_{1,1}, X_{1,2}$ και $X_{1,3}$ δείχνουν τις απώλειες εξέργειας που συνδέονται με τις απώλειες θερμότητας κατά τη διάρκεια των ίδιων περιόδων και Ξ_i και το Ξ_f δείχνει το αρχικό και τελικό περιεχόμενο της εξέργειας.

Το περιεχόμενο της εξέργειας του ρευστού μπορούν να εκφραστούν όπως

$$\in_k = (H_k - H_o) - (S_k - S_o) \quad (34)$$

όπου \in_k , το H_k και το S_k δείχνουν την εξέργεια, την ενθαλπία και την εντροπία αντίστοιχα.

Οι διαφορές εξέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου για περιόδους φόρτισης και αποφόρτισης είναι, αντίστοιχα:

$$\in_a - \in_b = (H_a - H_b) - T_o (S_a - S_b) \quad (35)$$

και

$$\in_d - \in_c = (H_d - H_c) - T_o (S_d - S_c) \quad (36)$$

Η απώλεια εξέργειας μπορεί να εκφραστεί όπως

$$X_{l,j} = X_{l,j} = \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_{l,j} \quad (37)$$

όπου το j αντιπροσωπεύει την περίοδο, και το T_1 , το T_2 και T_3 είναι σταθερά κατά τις περιόδους φόρτισης, αποθήκευσης και αποφόρτισης. Μερικές φορές το T_j αντιπροσωπεύει μια μέση θερμοκρασία μέσα στη δεξαμενή για την περίοδο j .

Το περιεχόμενο εξέργειας μιας ομογενούς αποθήκευσης μπορεί να εκφραστεί

$$\Xi = m[(u - u_o) - T_o(s - s_o)] \quad (38)$$

Εάν υπάρχουν μόνο αλληλεπιδράσεις αισθητής θερμότητας η εξίσωση μπορεί να γραφεί σαν

$$\Xi = mc[(T - T_o) - T_o \ln(T/T_o)]. \quad (39)$$

Για ένα μίγμα στερεού και υγρού, το περιεχόμενο μπορεί να γραφεί όπως

$$\Xi = m\{(1 - F)[(u_s - u_o) - T_o(S_s - S_o)] + F[(u_t - u_o) - T_o(S_t - S_o)]\} \quad (40)$$

όπου τα S_s και το S_t είναι οι ειδικές εντροπίες των στερεών και υγρών στο ρευστό αντίστοιχα.

Συνεπώς, το περιεχόμενο που είναι γραμμικά στρωματοποιημένο υπολογίζεται :

$$\Xi = E - mcT_o \left(\frac{T_t (\ln T_t - 1) - T_b (\ln T_b - 1)}{T_t - T_b} - \ln T_o \right) \quad (41)$$

Η γενική ενεργειακή απόδοση η μπορεί να υπολογιστεί σαν

$$\eta = \frac{\text{Ενέργεια στην έξοδο}}{\text{Ενέργεια στην είσοδο}} = 1 - \frac{\text{Απώλεια Ενέργειας}}{\text{Ενέργεια στην είσοδο}} \quad (42)$$

ή

$$\eta = \frac{H_d - H_c}{H_a - H_b} = 1 - \frac{Q_l}{H_a - H_b} \quad (43)$$

$$\eta_1 = \frac{\text{Συσσώρευση Ενέργειας TES φόρτισης}}{\text{Ενέργεια στην είσοδο φόρτισης}} = \frac{\Delta E_1}{H_a - H_b} \quad (44)$$

Για την αποθήκευση και την αποφόρτιση αντίστοιχα υπάρχει

$$\eta_2 = \frac{\Delta E_1 + Q_l}{\Delta E_1} \quad (45)$$

$$\eta_3 = \frac{H_c - H_d}{\Delta E_3} \quad (46)$$

Η γενική απόδοση της εξέργειας υπολογίζεται

$$\psi = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} = 1 - \frac{X_l + I}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (47)$$

Αν το TES είναι αδιαβατικό τότε $Q_{l,j} = X_{l,j} = 0$ για όλες τις j καταστάσεις. Έτσι το ψ γίνεται

$$\psi = 1 - \frac{I}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (48)$$

Επεξηγηματικό παράδειγμα

Τα κύρια χαρακτηριστικά των περιπτώσεων κρύας αποθήκευσης είναι:

- (i) αποθήκευση αισθητής θερμότητας, με ένα πλήρως αναμεμιγμένο ρευστό.
- (ii) αποθήκευση αισθητής θερμότητας, με ένα γραμμικά στρωματοποιημένο ρευστό.
- (iii) λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, με πλήρως αναμεμιγμένο ρευστό.
- (iv) συνδυασμένη αποθήκευση λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας, με πλήρως αναμεμιγμένο ρευστό.

Οι υποθέσεις που γίνονται είναι οι εξής :

Τα όρια αποθήκευσης είναι μη αδιαβατικά.

Το κέρδος θερμότητας από το περιβάλλον κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της αποφόρτισης είναι αμελητέο σε σχέση με το κέρδος θερμότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης.

Η εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής αποθήκευσης είναι σε θερμοκρασία $2 \text{ }^\circ\text{C}$ μεγαλύτερη από τη μέση θερμοκρασία αποθήκευσης του ρευστού.

Το ποσοστό ροής μάζας του ρευστού ελέγχεται ώστε να παράγει

σταθερές θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου.

Οι αλληλεπιδράσεις έργου, είναι αμελητέες. [34]

Πίνακας 39: Πίνακας δεδομένων [34]

Θερμοκρασία (°C)	I	II	III	IV
T _b	4	15	-1	-1
T _d	11	11	10	10
T ₁	10.5	19/2	0	8
T ₂	5	17/-7	0	-8
T ₃	6	18/-6	0	0

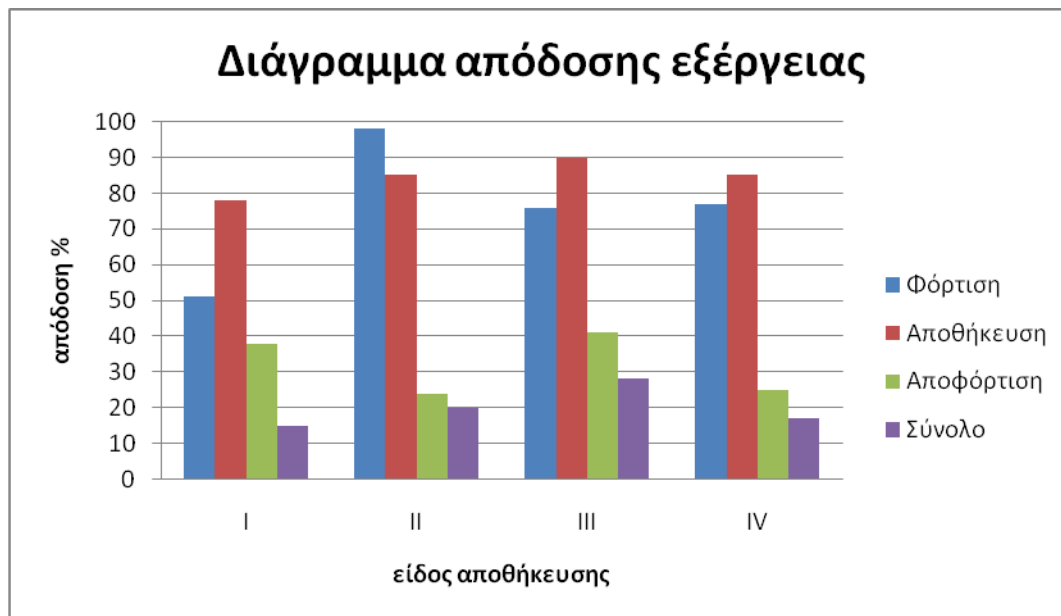
Στον πίνακα , η T_b και η T_d είναι οι θερμοκρασίες εξόδου του ρευστού φόρτισης και αποφόρτισης αντίστοιχα. Οι T₁, 2 και 3 δείχνουν τη θερμοκρασία του ρευστού αποθήκευσης στην αρχή της φόρτισης, της αποθήκευσης ή της αποφόρτισης, αντίστοιχα.

Επιπλέον, για όλες τις περιπτώσεις, οι θερμοκρασίες εισόδου καθορίζονται για τη ροή φόρτισης σε T_a = -10 °C και για τη ροή αποφόρτιση T_c = 20°C. Για τις περιπτώσεις που περιλαμβάνουν λανθάνουσα θερμότητα, F = 10%. η ειδική θερμότητα c είναι 4.18 kJ/kg K . Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ρευστού είναι 0 °C. Η δεξαμενή είναι κυλινδρική με μια εσωτερική διάμετρο 2 m και εσωτερικό ύψος 5 m. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι 20 °C και 1 atm.

Πίνακας 40: Αποτελέσματα ενεργείας και εξέργειας [34]

	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Αποδοτικότητα(%)	Ενέργεια				Εξέργεια			
Φόρτιση(1)	100	100	100	100	51	98	76	77
Αποθήκευση(2)	82	82	90	90	78	85	90	85
Αποφόρτιση(3)	100	100	100	100	38	24	41	25
Σύνολο	82	82	90	90	15	20	28	17
Είσοδος (MJ)	361.1	361.1	5237.5	6025.9	30.9	23.2	499.8	575.1
Ανάκτηση (MJ)	295.5	295.5	4713.8	5423.3	4.6	4.6	142.3	94.7
Απώλεια (εξωτερική) (MJ)	65.7	65.7	523.8	602.6	2.9	2.9	36.3	8.9
Απώλεια (εσωτερική) (MJ)	-	-	-	-	23.3	15.6	321.2	431.4

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα απόδοσης εξέργειας (εικόνα 44) συμφερότερη από πλευράς εξέργειας ως προς το σύνολο η λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, με πλήρως αναμεμιγμένο ρευστό. Μεγαλύτερη εξεργειακή απόδοση παρουσιάζει η φόρτιση στην περίπτωση αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, με ένα γραμμικά στρωματοποιημένο ρευστό.



Εικόνα 44: Διάγραμμα απόδοσης εξέργειας

6.2 Εξεργειακή ανάλυση συστήματος CAES και TES

Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν όγκο συμπιεσμένου αέρα εξαρτάται από το λόγο συμπίεσης β . Μια σημαντική παράμετρος είναι η αποθηκευμένη ενέργεια E ανά όγκο αποθήκευσης V :

$$\frac{E}{V} = p_o \beta \ln \beta \quad (49)$$

όπου p_o είναι η πίεση περιβάλλοντος.

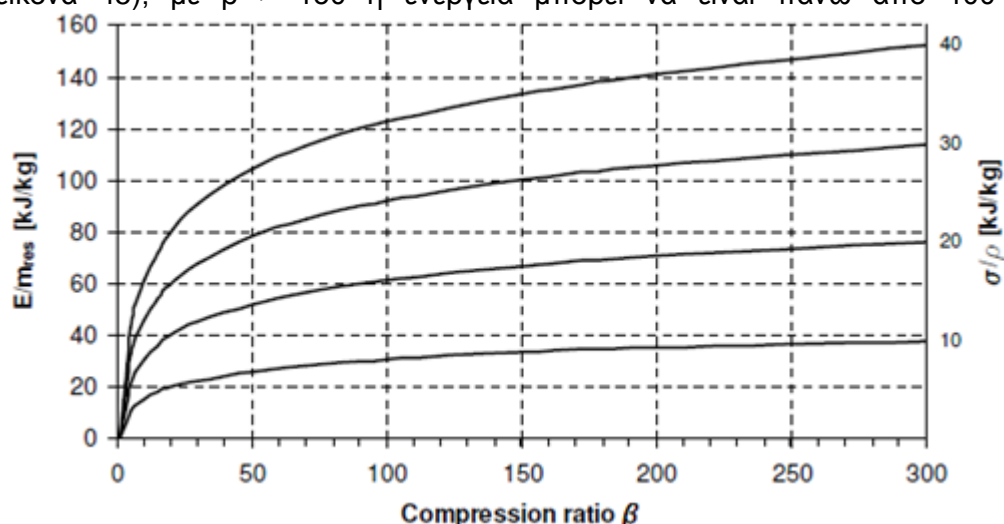
Ο όγκος αποθήκευσης μειώνεται με το β . Εάν το πάχος της δεξαμενής s είναι μικρό, μπορεί να υπολογιστεί ως $s/D = p/4\sigma$ όπου το p είναι η πίεση, D η διάμετρος δεξαμενής, σ η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση και V_{mat} όγκος υλικού δεξαμενής. Με απλοποίηση:

$$\frac{V_{mat}}{V} = \frac{3\rho}{2\sigma} \quad (50)$$

Εισάγοντας την πυκνότητα ρ του υλικού δεξαμενών, η αποθηκευμένη ενέργεια ανά μάζα της δεξαμενής m_{res} είναι:

$$\frac{E}{m_{res}} = \frac{2\sigma}{3\rho} \ln(\beta) \quad (51)$$

Ο χάλυβας με επιτρεπόμενη πίεση $\sigma = 234$ MPa έχει $\sigma/\rho \cong 30$ kJ/kg. Όπως φαίνεται (εικόνα 45), με $\beta > 150$ η ενέργεια μπορεί να είναι πάνω από 100 kJ/kg.



Εικόνα 45: Αποθηκευμένη ενέργεια ανά μονάδα μάζας δεξαμενής σαν συνάρτηση της αντοχής του υλικού [35]

Το σχήμα δείχνει ότι η αποθηκευμένη ενέργεια έχει μια μέτρια αύξηση για $\beta > 150$. Η θερμοκρασία συμπιεσμένου αέρα T_c αυξάνεται σύμφωνα με:

$$T_c = T_o (\beta)^{\frac{m-1}{m}} \quad (52)$$

όπου m πολυτροπικός εκθέτης.

Προκειμένου να περιοριστεί η απώλεια θερμοκρασίας και ενέργειας, η συμπίεση μπορεί να γίνει τμηματικά με ψύξη. Εάν οι εναλλάκτες θερμότητας που

χρησιμοποιούνται για την ψύξη έχουν απόδοση ε και το μέσο ψύξης εισάγεται σε θερμοκρασία T_{AF} , η θερμοκρασία εξόδου του σταδίου i είναι:

$$T_i = (1 - \varepsilon)\beta_i^\lambda T_{i-1} + \varepsilon T_{AF} \quad (53)$$

όπου

$$\lambda = (m-1)/m \quad (54)$$

Για τα στάδια n , το αδιάστατο έργο συμπίεσης

$$\tilde{W}_c = W_c / c_p T_o \quad (55)$$

είναι:

$$\tilde{W}_c = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{T_i}{T_o} (\beta_i^\lambda - 1) \quad (56)$$

Η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί και να επαναχρησιμοποιηθεί στη φάση εκτόνωσης, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του αέρα και το ανακτώμενο έργο. Η θερμοκρασία ζεστής αποθήκευσης T_{AC} συσχετίζεται με την κρύα αποθήκευση T_{AF} και με τη θερμοκρασία εξόδου T_c του συμπιεστή:

$$T_{AC} = T_{AF} + \varepsilon(T_c - T_{AF}) \quad (57)$$

Ο αέρας εισάγεται στον αποσυμπιεστή σε μια θερμοκρασία:

$$T_h = T_o + \varepsilon(T_{AC} - T_o) \quad (58)$$

Κατόπιν, ο αέρας εκτονώνεται σε μια θερμοκρασία

$$T_e = T_h (\beta)^{-\lambda} \quad (59)$$

όπου το λ έχει μια διαφορετική τιμή από τη συμπίεση.

Η θερμοκρασία εξόδου του σταδίου i είναι:

$$T_i = [T_{i-1}(1 - \varepsilon) + \varepsilon T_{AC}] \beta_i^{-\lambda} \quad (60)$$

Για τα στάδια n , το αδιάστατο έργο εκτόνωσης

$$\tilde{W}_e = W_e / c_p T_o \quad (61)$$

είναι:

$$\tilde{W}_e = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{T_i}{T_o} (\beta_i^{-\lambda} - 1) \quad (62)$$

Ανάλυση εξέργειας

Το έργο συμπίεσης αντιπροσωπεύει μία εξέργεια εισόδου:

$$E_{X_{in}} = \dot{W} t_c = 16.1 \times 10^6 \text{ kJ} \quad (63)$$

Η αποθηκευμένη εξέργεια σε θερμοκρασία T_o και πίεση $p_o \beta$:

$$E_{X_{CAES}} = p_o V \beta (\ln \beta + 1/\beta - 1) = 11.7 \times 10^6 \text{ kJ} \quad (64)$$

Η ίδια πηγή δίνει την αποθηκευμένη εξέργεια σε μορφή ζεστού νερού στην θερμοκρασία T_{AC} :

$$E_{X_{TES}} = m_{TES} c_{TES} T_o [T_{AC}/T_o - 1 - \ln (T_{AC}/T_o)] = 1.78 \cdot 10^6 \text{ kJ} \quad (65)$$

όπου c_{TES} είναι η ειδική θερμότητα του ρευστού TES .

Έτσι η TES συγκρατεί το 15% της αποθηκευμένης εξέργειας του CAES.

Η απώλεια εξέργειας κατά τη συμπίεση είναι:

$$E_{\text{loss}} = E_{\text{in}} - E_{\text{CAES}} - E_{\text{TES}} = 2.63 \cdot 10^6 \text{ kJ} \quad (66)$$

που αποτελεί το 16% της E_{in} .

Αυτή η απώλεια οφείλεται στις αναντιστρεπτότητες της μεταφοράς θερμότητας μέσα στους εναλλάκτες θερμότητας και τη μίξη των ροών με διαφορετικές θερμοκρασίες.

Στην φάση αποφόρτισης το έργο αντιπροσωπεύει μία εξέργεια εξόδου:

$$E_{\text{out}} = \dot{W} t_e = 10.9 \times 10^6 \text{ kJ} \quad (67)$$

Η απώλεια εξέργειας σε αυτήν την φάση είναι

$$E_{\text{loss}} = E_{\text{CAES}} + E_{\text{TES}} - E_{\text{out}} = 2.61 \times 10^6 \text{ kJ} \quad (68)$$

που είναι περίπου το 24% της παραδοθείσης εξέργειας. [35] Η ολική εξεργειακή απόδοση του συστήματος είναι:

$$\eta_{\text{rec}} = E_{\text{out}}/E_{\text{in}} = 0.675 \quad (69)$$

6.3 Εξεργειακή ανάλυση κυψέλης καυσίμου

$$\varepsilon_{\text{energy,system}} = \frac{\dot{W}_{net}}{(\dot{E}_{air,R} + \dot{E}_{H_2,R}) - (\dot{E}_{air,P} + \dot{E}_{H_2O,P})} \quad (70)$$

Η συνολική μεταφορά εξέργειας αποτελείται από το συνδυασμό και φυσικών και χημικών εξεργειών όπως :

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (71)$$

Φυσική εξέργεια

Η φυσική εξέργεια συνδέεται με τη θερμοκρασία και την πίεση των αντιδραστηρίων και των προϊόντων στο σύστημα κυψέλης καυσίμου.

Η γενική έκφραση είναι:

$$ex_{ph} = (h - h_o) - T_o (s - s_o) \quad (72)$$

Αν τα αντιδρώντα θεωρηθούν ιδανικά αέρια τότε η σχέση μετασχηματίζεται:

$$ex_{ph} = c_p T_o (T/T_o) - 1 - \ln(T/T_o) + \ln(P/P_o)^{(k-1)/k} \quad (73)$$

Χημική εξέργεια

$$ex_{ch} = \sum x_n ex_{ch}^n + RT_o \sum x_n \ln x_n \quad (74)$$

Ροή μάζας

$$\dot{m}_{air,R} = 3.57 \times 10^{-7} \left(\frac{\lambda \dot{W}}{V} \right) \quad (75)$$

$$\dot{m}_{H_2,R} = 1.05 \times 10^{-8} \left(\frac{\dot{W}}{V} \right) \quad (76)$$

$$\dot{m}_{air,P} = 3.57 \times 10^{-7} \left(\frac{\lambda \dot{W}}{V} \right) - 8.29 \times 10^{-8} \left(\frac{\dot{W}}{V} \right) \quad (77)$$

$$\dot{m}_{H_2O,P} = 9.34 \times 10^{-8} \left(\frac{\dot{W}}{V} \right) \quad (78)$$

$$\dot{E}_{H_2,R} = \dot{m}_{H_2,R} e_{H_2,R} = \dot{m}_{H_2,R} (e^{CH} + e^{PH})_{H_2,R} \quad (79)$$

$$\dot{E}_{air,R} = \dot{m}_{air,R} e_{air,R} = \dot{m}_{air,R} (e^{CH} + e^{PH})_{air,R} \quad (80)$$

$$\dot{E}_{H_2O,P} = \dot{m}_{H_2O,P} e_{H_2O,P} = \dot{m}_{H_2O,P} (e^{CH} + e^{PH})_{H_2O,P} \quad (81)$$

$$\dot{E}_{air,P} = \dot{m}_{air,P} e_{air,P} = \dot{m}_{air,P} (e^{CH} + e^{PH})_{air,P} \quad (82)$$

Ακολουθεί παράδειγμα προς κατανόηση. Στον πίνακα 41 φαίνονται οι ιδιότητες και οι τιμές κανονικών συνθηκών.

Πίνακας 41: Ιδιότητες και τιμές κανονικών συνθηκών [37]

Ιδιότητες	τιμή
T_o	298 K
P_o	1 atm
$C_{p, air}$	1.005 kJ/kg K
C_{p, H_2}	14.3 kJ/kg K
k ειδικός λόγος θερμότητας αέρα και υδρογόνου	1.4
$h_{o, water}$ ενθαλπία νερού	104.88 kJ/kg
$s_{o, water}$ εντροπία νερού	0.3674 kJ/kg K
$h_{o, air}$ ενθαλπία αέρα	-21120 kJ/kmol K
$s_{o, air}$ εντροπία αέρα	129.17 kJ/kmol K
\dot{W}	10 KW
λ	3

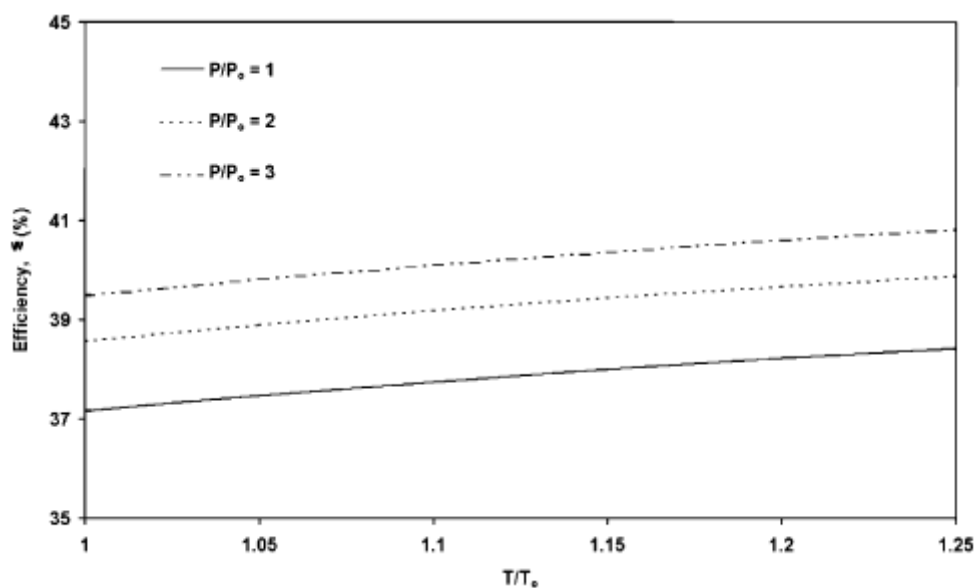
Οι διαφορές στην εξεργειακή αποδοτικότητα σε μια κυψέλη καυσίμου PEM με μεταβλητή πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας απεικονίζονται στην εικόνα 46. Αυτό αποδίδεται κυρίως στην αύξηση της τάσης. Για παράδειγμα, μια αύξηση 2% στην εξεργειακή απόδοση συμβαίνει εάν η πίεση λειτουργίας του συστήματος αυξάνεται από $P/P_o = 1$ σε $P/P_o = 3$. Ομοίως, μία παρόμοια αύξηση της απόδοσης 2.5% μπορεί να επιτευχθεί εάν η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου αυξηθεί από τη θερμοκρασία 298 K ($T/T_o = 1$) στην 373 K ($T/T_o = 1.25$).

Οι μεταβλητές τάσεις κυτάρων καυσίμου PEM διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στην απόδοση της κυψέλης καυσίμου όπως απεικονίζεται στην εικόνα 47. Όσο χαμηλότερη η τάση της κυψέλης, τόσο μεγαλύτερα είναι τα ποσοστά ροής μάζας που απαιτούνται για τα αντιδραστήρια και τα προϊόντα προκειμένου να ενεργοποιηθεί η κυψέλη PEM προκειμένου να παραχθεί μια ισχύ 10 KW. Αυτό θα οδηγήσει σε μία αύξηση της διαφοράς μεταξύ των συνολικών εξεργειών των αντιδραστηρίων και των προϊόντων, που οδηγούν σε χαμηλότερη απόδοση. Παραδείγματος χάριν, μια αύξηση στην απόδοση 7% θα μπορούσε να επιτευχθεί εάν η κυψέλη λειτουργεί σε μια τάση 0.6 V παρά σε 0.5 V. Επίσης, η αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας παρά το μικρό εύρος και τη χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, σε αντιδιαστολή με άλλους τύπους κυψέλης καυσίμου που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως στις κυψέλες στερεών οξειδίων.

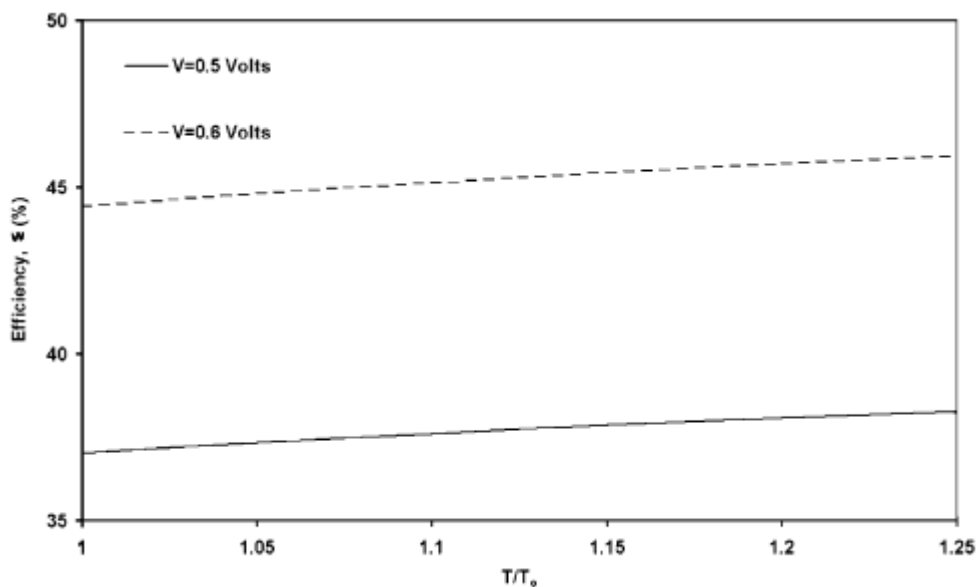
Οι υπολογισμοί των ποσοστών ροής μάζας των αντιδραστηρίων και των προϊόντων παρουσιάζονται στον πίνακα 42. Η διαφορά μεταξύ τα ποσοστών ροής του αέρα εισόδου και εξόδου αντιπροσωπεύει την ποσότητα οξυγόνου που καταναλώνεται με

το υδρογόνο. Η χρήση οξυγόνου σε μία PEM που λειτουργεί στις τάσεις $V = 0.5V$ και $V = 0.6 V$ υπολογίζονται 0.00166 kg/s και 0.00138 kg/s , αντίστοιχα.

Ανάλογα με τη στοιχειομετρία του αέρα λ η αποδοτικότητα της κυψέλης καυσίμου μπορεί να βελτιωθεί πολύ εάν το λ αυξηθεί. Προκειμένου να καταδειχθεί η σχέση μεταξύ της στοιχειομετρίας αέρα και της απόδοσης, εκτελείται μία εξεργειακή ανάλυση για $\lambda=2$ και $\lambda=4$ και τάση λειτουργίας $V = 0.5V$ συγκρινόμενα για $\lambda = 3$ όπως φαίνεται στην εικόνα 48. Χωρίς αμφιβολία, μία κυψέλη με υψηλότερη στοιχειομετρία αέρα έχει την καλύτερη αποδοτικότητα. Για παράδειγμα, μία βελτίωση στην αποδοτικότητα 7% θα μπορούσε να επιτευχθεί εάν η στοιχειομετρία αέρα μεταπηδούσε από 2 σε 4. [37]



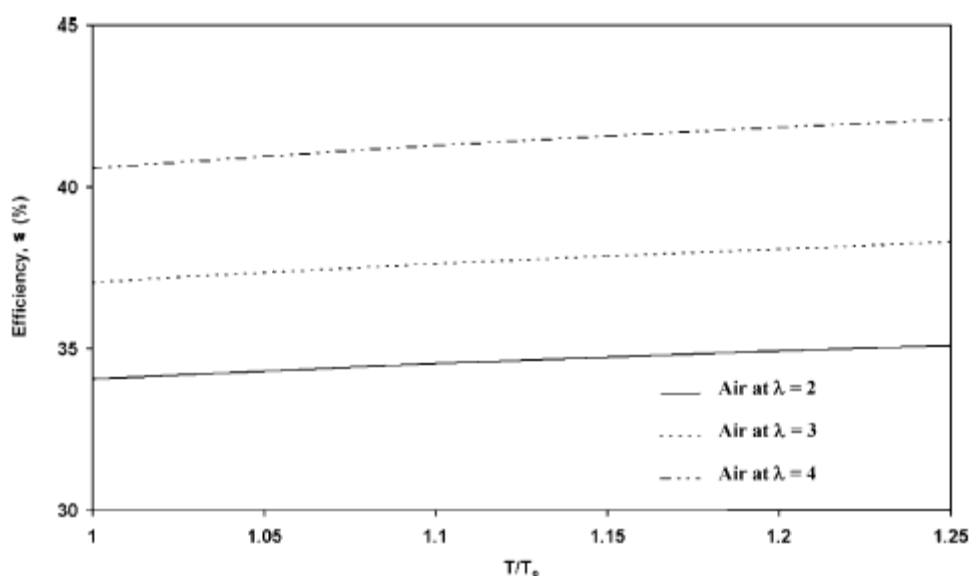
Εικόνα 46: Απόδοση εξέργειας κυψέλης PEM σε μεταβλητή πίεση και θερμοκρασία και τάση $V=0,5V$ [37]



Εικόνα 47: Απόδοση εξέργειας κυψέλης PEM σε τάση $V=0,5V$ και $V=0,6 V$ [37]

Πίνακας 42: Χημική εξέργεια και ρυθμός ροής μάζας στην τάση V=0,5V και V=0,6V σε αντιδρώντα και προϊόντα [37]

Αντιδρών/προϊόν	Χημική εξέργεια e^{CH} (kJ/kg)	Ρυθμός ροής μάζας στην τάση V= 0.5V (kg/s)	Ρυθμός ροής μάζας στην τάση V= 0.6V (kg/s)
Αντιδρών-Αέρας	0	0.02142	0.01785
Αντιδρών-Υδρογόνο	159138	0.00021	0.000175
Προϊόν-νερό	2.5	0.001868	0.001557
Προϊόν-Αέρας	8.58	0.019762	0.01647



Εικόνα 48: Απόδοση εξέργειας κυψέλης PEM σε διαφορετικό λόγο αέρα λ [37]

Γίνονται γενικά οι ακόλουθες γενικές παραδοχές σχετικά με μια κυψέλη καυσίμου PEM :

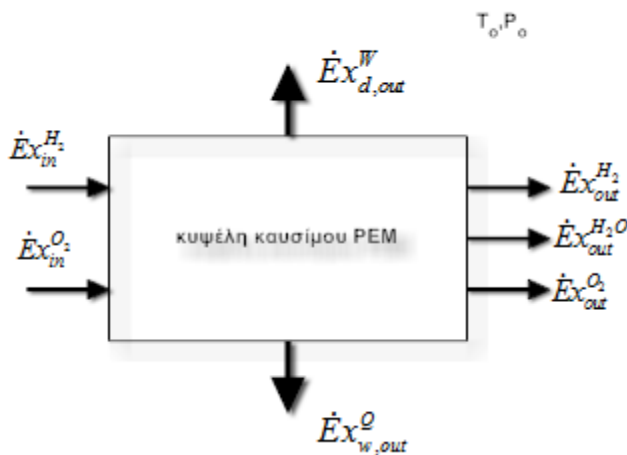
- Το υδρογόνο και το οξυγόνο χρησιμοποιούνται ως αντιδραστήρια.
- Η κυψέλη PEM είναι κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης.
- Η ροή των αντιδρώντων είναι σταθερή, ασυμπίεστη και στρωτή.
- Το παραγόμενο νερό είναι σε υγρή φάση.
- Όλα τα αέρια είναι ιδανικά.
- Η κινητική και δυναμική εξέργεια αμελούνται.
- Η θερμοκρασία κυψέλης είναι ίση με 323 K, σύμφωνα με τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης.
- Η πίεση λαμβάνει την τιμή 3 atm,
- Πάχος της μεμβράνης 0,016 cm.
- Ποσοστό απώλειας θερμότητας (r_{hi}) λαμβάνεται ως 20%. Τονίζεται ότι το 20% της συνολικής θερμότητας που παράγεται στην κυψέλη χάνεται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας.

- Ο ρυθμός ροής της μάζας του νερού που χρησιμοποιείται για να υγραπποιείται το οξυγόνο και το υδρογόνο είναι αμελητέος.
- Οι αναλογίες χρήσης υδρογόνου και οξυγόνου, λαμβάνονται 80% και 50%, αντίστοιχα
- χρησιμοποιείται υγραπποιημένο οξυγόνο στην κάθοδο.

Η γενική σχέση εξέργειας μπορεί να γραφεί ως εξής:

(Total exergy input)=(Total exergy of desired output)+(Total waste exergy output) + (Total exergy destruction) [36]

$$\sum \dot{E}x_{in}^{fc} = \sum \dot{E}x_{d,out}^{fc} + \sum \dot{E}x_{w,out}^{fc} + \sum \dot{E}x_d^{fc} \quad (83)$$



Εικόνα 49: διάγραμμα ισοζυγίου εξέργειας ενός κελιού καυσίμου τύπου PEM [36]

$$\sum \dot{E}x_{in}^{fc} = \sum \dot{E}x_{d,out}^{fc} + \sum \dot{E}x_{rw}^{fc} + \sum \dot{E}x_{uw}^{fc} + \sum \dot{E}x_d^{fc} \quad (84)$$

Διαιρώντας την αρχική σχέση με το $\sum \dot{E}x_{in}^{fc}$ η σχέση καταλήγει:

$$1 = \left(\frac{\sum \dot{E}x_{d,out}^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}} \right) + \left(\frac{\sum \dot{E}x_{rw}^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}} \right) + \left(\frac{\sum \dot{E}x_{uw}^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}} \right) + \left(\frac{\sum \dot{E}x_d^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}} \right) \quad (85)$$

Όπου

$\frac{\sum \dot{E}x_{d,out}^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}}$ ισούται με την εξεργειακή απόδοση η_{ex}^{fc}

$\frac{\sum \dot{E}x_d^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}}$ είναι ο συντελεστής καταστροφής εξέργειας f_{exd}^{fc}

$\frac{\sum \dot{E}x_{w,out}^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}}$ θεωρείται ο λόγος των αποβαλλόμενων εξεργειών r_{we}^{fc}

$\frac{\sum \dot{E}x_{rw}^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}}$ θεωρείται ο λόγος των επαναχρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών r_{rw}^{fc} όπου

$\frac{\sum \dot{E}x_{uw}^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}}$ θεωρείται ο λόγος των μη χρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών r_{uw}^{fc}

Έτσι καταλήγει η σχέση σε:

$$\eta_{ex}^{fc} + r_{rw}^{fc} + r_{uw}^{fc} + f_{exd}^{fc} = 1 \quad (86)$$

Οι παράμετροι εξέργειας της PEM κυψέλης λοιπόν είναι οι εξής:

η εξεργειακή απόδοση η_{ex}^{fc} , ο λόγος των αποβαλλόμενων εξεργειών r_{we}^{fc} , ο λόγος των επαναχρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών r_{rw}^{fc} , ο λόγος των μη χρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών r_{uw}^{fc} , ο συντελεστής καταστροφής εξέργειας f_{exd}^{fc} , ο συντελεστής καταστροφής περιβάλλοντος C_{ed}^{fc} , ο δείκτης καταστροφής περιβάλλοντος Θ_{edi}^{fc} , ο δείκτης φιλικότητας στο περιβάλλον Θ_{ebi}^{fc} , ο συντελεστής εξεργειακής σταθερότητας f_{est}^{fc} , ο δείκτης εξεργειακής βιωσιμότητας Θ_{esi}^{fc} . [36]

Ο λόγος των αποβαλλόμενων εξεργειών r_{we}^{fc}

Ο κύριος στόχος μιας κυψέλης καυσίμου είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των κυψελών καυσίμου (εάν χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό το οξυγόνο), παράγονται ορισμένα παραπροϊόντα όπως είναι το αχρησιμοποίητο υδρογόνου, τα αχρησιμοποίητα οξυγόνο και το νερό. Επίσης, κάποια ποσότητα θερμότητας απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Αυτά επηρεάζουν την απόδοση της PEM κυψέλης

Ο λόγος των επαναχρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών r_{rw}^{fc}

Ο επαναχρησιμοποιούμενος λόγος των αποβαλλόμενων εξεργειών μιας κυψέλης καυσίμου PEM μπορεί να θεωρηθεί ως ο λόγος των επαναχρησιμοποιήσιμων εξεργειακών αποβλήτων στο σύνολο των εισροών εξέργειας. Στην πραγματικότητα, στην επαναχρησιμοποιούμενη αποβαλλόμενη εξέργεια περιλαμβάνεται η χημική εξέργεια από το αχρησιμοποίητο υδρογόνο και οξυγόνο κατά τη διάρκεια λειτουργίας της PEM, αν το οξυγόνο χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό.

λόγος των επαναχρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών = επαναχρησιμοποιούμενη αποβαλλόμενη εξέργεια / (Σύνολο εισροών εξέργειας)

,η οποία μπορεί να γραφεί σε αλγεβρική μορφή, όπως

$$r_{rw}^{fc} = \frac{\sum \dot{E}x_{rw}^{fc}}{\sum \dot{E}x_{in}^{fc}} \quad (87)$$

όπου

$$\sum \dot{E}x_{rw}^{fc} = \dot{n}_{H2,out} \times (ex)_{H2,out}^{ch} + \dot{n}_{O2,out} \times (ex)_{O2,out}^{ch} \quad (88)$$

Ο λόγος των μη χρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών (r_{uw}^{fc})

Η μη χρησιμοποιούμενη αποβαλλόμενη εξέργεια είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την αύξηση του λόγου αποβαλλόμενης εξέργειας. Η μη χρησιμοποιούμενη αποβαλλόμενη εξέργεια περιλαμβάνει τη φυσική εξέργεια από το αχρησιμοποίητο

υδρογόνο και το οξυγόνο, και τη θερμότητα, καθώς και την εξέργεια από το νερό για όλη τη λειτουργία της κυψέλης PEM. Εν τω μεταξύ, θα πρέπει να τονιστεί ότι η εξέργεια από τη θερμότητα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα δεν μπορεί άμεσα να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία κυψελών καυσίμου τύπου PEM, λόγω της διαδικασίας ανάκτησης της θερμότητας.

ο λόγος των μη χρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών = μη χρησιμοποιούμενη αποβαλλόμενη εξέργεια / (Σύνολο εισροών εξεργειας)

,η οποία μπορεί να γραφεί σε αλγεβρική μορφή, όπως

$$r_{uw}^{fc} = \sum \dot{E}x_{uw}^{fc} / \sum \dot{E}x_{in}^{fc} \quad (89)$$

όπου

$$\sum \dot{E}x_{uw}^{fc} = (\dot{n}_{H2,out} \times (ex)_{H2,out}^{ph} + \dot{n}_{O2,out} \times (ex)_{O2,out}^{ph} + \dot{n}_{H2O,out} \times (ex)_{H2O}) + \dot{Q}_{w,out}^{fc} \times (1 - \frac{T_o}{T_{fc}}) \times r_{hl} \quad (90)$$

Συνολική αποβαλλόμενη εξέργεια = [(επαναχρησιμοποιούμενη αποβαλλόμενη εξέργεια για την PEMFC) + (μη χρησιμοποιούμενη αποβαλλόμενη εξέργεια για την PEMFC)], η οποία μπορεί να γραφεί σε αλγεβρική μορφή

$$\sum \dot{E}x_{w,out}^{fc} = \sum \dot{E}x_{rw}^{fc} + \sum \dot{E}x_{uw}^{fc} \quad (91)$$

Επίσης

λόγος αποβαλλόμενης εξεργειας = (Σύνολο εκροών αποβαλλόμενης εξεργειας) / (Σύνολο εισροών εξεργειας),η οποία μπορεί να γραφεί σε αλγεβρική μορφή, όπως

$$r_{we}^{fc} = \sum \dot{E}x_{w,out}^{fc} / \sum \dot{E}x_{in}^{fc} = (\dot{E}x_{rw}^{fc} + \dot{E}x_{uw}^{fc}) / \sum \dot{E}x_{in}^{fc} \quad (92)$$

Ο συντελεστής καταστροφής εξεργειας f_{exd}^{fc}

Αυτός ο παράγοντας μπορεί να θεωρηθεί ως ο λόγος της καταστροφής εξεργειας στο σύνολο των εισροών εξεργειας. Η τιμή αναφοράς του είναι «μηδέν» για την καλύτερη βιωσιμότητα της κυψέλης PEM. Στην πραγματικότητα, πρακτικά η τιμή αυτή προσεγγίζει το μηδέν.

συντελεστής καταστροφής εξεργειας = (καταστροφή εξεργειας) / (Σύνολο εισροών εξεργειας),η οποία μπορεί να γραφεί και σε αλγεβρική μορφή

$$f_{exd}^{fc} = Ex_d^{fc} / Ex_{in}^{fc} \text{ (από 0 έως 1)} \quad (93)$$

Ο συντελεστής καταστροφής περιβάλλοντος C_{ed}^{fc}

Ο συντελεστής αυτός δείχνει το αντίστροφο της απόδοσης της κυψέλης τύπου PEM. Μπορεί να θεωρηθεί ότι ο συντελεστής κυμαίνεται από 1 έως + ∞. Στην πραγματικότητα, η τιμή αναφοράς του συντελεστή αυτού είναι ίση με "1". Σε πρακτικές εφαρμογές, ο συντελεστής αυτός πρέπει να είναι κοντά στο "1".

συντελεστής καταστροφής περιβάλλοντος= 1 / (απόδοση εξεργειας)

$$C_{ed}^{fc} = 1 / \eta_{ex}^{fc} \quad (94)$$

Ο δείκτης καταστροφής περιβάλλοντος Θ_{edi}^{fc}

Ο δείκτης κυμαίνεται από 0 έως + ∞.

ο δείκτης καταστροφής περιβάλλοντος = (συντελεστή καταστροφής εξέργειας + ο λόγος των μη χρησιμοποιούμενων αποβαλλόμενων εξεργειών) x (συντελεστής καταστροφής του περιβάλλοντος) και διατυπώνεται

$$\Theta_{edi}^{fc} = (r_{uw}^{fc} + f_{exd}^{fc}) \times C_{ed}^{fc} \quad (95)$$

ο δείκτης φιλικότητας στο περιβάλλον Θ_{ebi}^{fc}

Μπορεί να θεωρηθεί ως το αντίστροφο του δείκτη καταστροφής του περιβάλλοντος. Αυτό κυμαίνεται από 0 έως + ∞. Εάν η PEM έχει την υψηλότερη τιμή σημαίνει ότι η κυψέλη καυσίμου είναι πιο φιλική για το περιβάλλον.

$$\Theta_{ebi}^{fc} = 1 / \Theta_{edi}^{fc} \quad (96)$$

ο συντελεστής εξεργειακής σταθερότητας f_{est}^{fc}

Προκειμένου να διασφαλιστεί η εξεργειακή σταθερότητα των κυψελών καυσίμου, θα πρέπει να καταναλώνει κανονικά το υδρογόνο και το οξυγόνο, και να είναι κατασκευασμένες από υλικά που δημιουργούν τις ελάχιστες επιπτώσεις κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Η καλύτερη τιμή του συντελεστή αυτού θα πρέπει να είναι κοντά στο "1" σε πρακτικές εφαρμογές. Ορίζεται ως

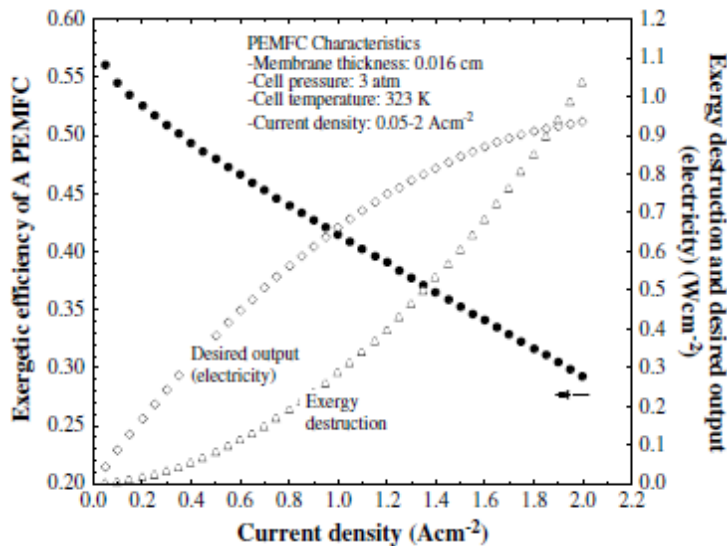
$$f_{est}^{fc} = \dot{E}x_{d,out}^{fc} / (\dot{E}x_{d,out}^{fc} + \dot{E}x_{w,out}^{H2} + \dot{E}x_{w,out}^{O2} + \dot{E}x_d^{fc}) \quad (\text{από } 0 \text{ έως } 1) \quad (97)$$

ο δείκτης εξεργειακής βιωσιμότητας Θ_{esi}^{fc}

Ένα σημαντικό στοιχείο για να επιτευχθεί η αιφόρος ανάπτυξη είναι η χρήση της ανάλυσης εξέργειας. Το εύρος αυτού του δείκτη είναι μεταξύ 0 και + ∞. [36]

$$\Theta_{esi}^{fc} = \Theta_{ebi}^{fc} \times f_{est}^{fc} \quad (98)$$

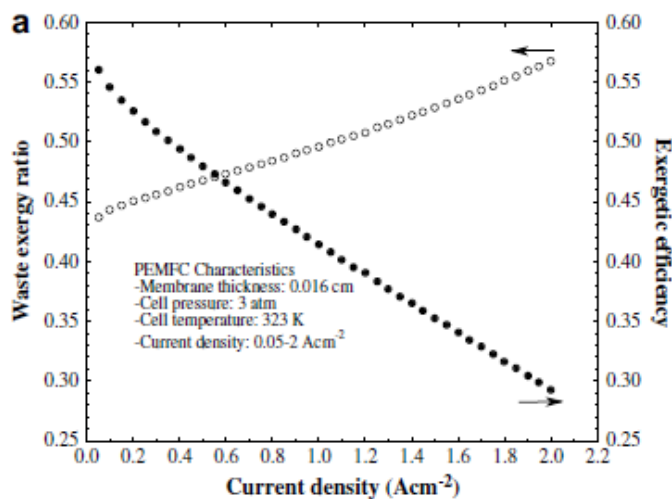
Απόδοση εξέργειας



Εικόνα 50: Απόδοση, καταστροφή εξέργειας και επιθυμητό ηλεκτρικό ρεύμα. [36]

Η εικόνα 50 παρουσιάζει τις παραλλαγές της απόδοσης, την καταστροφή της εξέργειας και το επιθυμητό αποτέλεσμα (ηλεκτρική ενέργεια) ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος με βάση τα χαρακτηριστικά της PEM.

Ο λόγος των αποβαλλόμενων εξεργειών



Εικόνα 51: Μεταβολή του λόγου των αποβαλλόμενων εξεργειών και την εξεργειακή απόδοση σε συνάρτηση με την πυκνότητα ρεύματος [37]

Η εικόνα 51 απεικονίζει την μεταβολή του λόγου των αποβαλλόμενων εξεργειών και την εξεργειακή απόδοση σε συνάρτηση με την πυκνότητα ρεύματος. Η αύξηση της πυκνότητας ρεύματος ανεβαίνει στο λόγο αποβαλλόμενων εξεργειών 0,437 - 0,567 λόγω της ανόδου της συνολικής παραγωγής αποβαλλόμενης εξέργειας, συμπεριλαμβανομένου του αχρησιμοποίητου υδρογόνου, οξυγόνου, νερού και της θερμότητας που εκλύεται στην ατμόσφαιρα .

7. Συμπεράσματα

Για μόνιμες εφαρμογές χαμηλής ισχύος, όπου το ζητούμενο είναι η ελάχιστη δυνατή αυτό-εκφόρτιση, καλύτερη λύση φαίνεται να είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion), με βάση τα τεχνικά κριτήρια. Για μικρά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου το ζητούμενο είναι η μέγιστη αυτονομία, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος εξακολουθούν να αποτελούν τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ απόδοσης και κόστους. Παρόλο που οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι αποδοτικότερες, είναι πολύ πιο ακριβές για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Για εφαρμογές μέσης ισχύος, η λύση των μπαταριών μολύβδου οξέος είναι για μια ακόμη φορά προτιμότερη από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, ενώ οι εναλλακτικές λύσεις είναι είτε λιγότερο αποδοτικές, είτε οικονομικά ασύμφωρες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η τεχνολογία συμπιεσμένου αέρα αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα αυτό-εκφόρτισης, οι κυψέλες καυσίμου εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένο κόστος καθώς και χαμηλή απόδοση, ενώ οι μπαταρίες ροής προβληματίζουν όσον αφορά στο μεγάλο κόστος συντήρησης.

Στην τρίτη κατηγορία εφαρμογών, η οποία περιλαμβάνει εφαρμογές μεγάλης ισχύος για τον έλεγχο των αιχμών του φορτίου, οι τεχνολογίες του συμπιεσμένου αέρα και των μπαταριών ροής φαίνονται καταλληλότερες, με την πρώτη από τις δύο να εμφανίζει σημαντικά μικρότερο κόστος. Εντούτοις, οι συγκεκριμένες τεχνολογίες δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμη στον τομέα αυτό, με τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα να προκύπτουν από μελέτες και προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί.

Στην τέταρτη κατηγορία εφαρμογών που σχετίζεται με τις διατάξεις ελέγχου της ποιότητας του ρεύματος, όπου απαιτείται γρήγορη απόκριση και αντοχή σε μεγάλο πλήθος κύκλων φόρτισης, οι τεχνολογίες των σφονδύλων και των υπερπυκνωτών πλεονεκτούν έναντι των άλλων μεθόδων.

Από τις εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης, οι μπαταρίες μολύβδου ικανοποιούν τα τεχνικά κριτήρια όλων σχεδόν των τύπων εφαρμογών, άλλα εμφανίζουν περιορισμένη αντοχή και αξιοπιστία. Οι μπαταρίες νικελίου και μετάλλου-αέρα δεν ικανοποιούν τα απαιτούμενα κριτήρια λόγω χαμηλής απόδοσης και αυξημένου κόστους, ενώ οι τεχνολογίες της υδραυλικής και θερμικής αποθήκευσης είναι κατάλληλες για διακοπτόμενες πηγές ενέργειας όπως είναι οι ανανεώσιμες πηγές και συνεπώς βρίσκουν ικανοποιητική εφαρμογή σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα παραγωγής μεγάλης κλίμακας που περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά. Για υβριδικά συστήματα μικρότερης κλίμακας, η επιλογή της

τεχνολογίας αποθήκευσης μέσω μαγνητικών υπεραγωγών φαίνεται να είναι κατάλληλη.

Αναφορικά με τις εφαρμογές διασύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, οι επικρατέστερες τεχνολογίες αποθήκευσης, οι οποίες είναι οι μπαταρίες ροής, ο συμπιεσμένος αέρας, οι υπερπυκνωτές καθώς και οι σφόνδυλοι, θα πρέπει να βελτιωθούν στους τομείς του κόστους, της αξιοπιστίας και της απόδοσης.

Συνοψίζοντας, η αποθήκευση της ενέργειας φαίνεται να αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, λόγω της συνεχούς και αναγκαίας αύξησης της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων και μη περιοχών. Η απρόβλεπτη φύση των συγκεκριμένων πηγών οδηγεί σε ανεπιθύμητες διακυμάνσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, οι οποίες εντείνουν την αναγκαιότητα της εγκατάστασης προηγμένων συστημάτων αποθήκευσης της ενέργειας για τη διασφάλιση της κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης. Συνεπώς, η ανάγκη της βελτιστοποίησης των εναλλακτικών τεχνολογιών αποθήκευσης της ενέργειας ώστε να αυξηθεί η απόδοση με ταυτόχρονη αύξηση της διάρκειας ζωής και μείωση του κόστους, γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική.

Χαμηλή απόδοση προκαλεί αύξηση του κόστους επειδή μόνο ένα μικρό ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επίσης, η μικρή διάρκεια ζωής αυξάνει το μακροπρόθεσμο κόστος λόγω της συχνής αντικατάστασης του συστήματος αποθήκευσης. Από πλευράς ενεργειακής απόδοσης και διάρκειας ζωής λοιπόν συμφέρουσες τεχνολογίες είναι οι μπαταρίες ιόντος λιθίου, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μέσω σφονδύλου, οι υπερπυκνωτές και οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας με αντλησιοταμίευση.

Είναι επίσης φανερό ότι το υψηλότερο κόστος επένδυσης ανά μονάδα ενέργειας εμφανίζουν οι υπερπυκνωτές υψηλής ισχύος, ακολουθούμενοι από τις διατάξεις σφονδύλου.

Οι μπαταρίες αποτελούν μια τεχνολογία υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, χαμηλής ισχύος όμως. Οι υπερπυκνωτές ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή μία τεχνολογία υψηλής ισχύος, χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ των μπαταριών και του κοινού πυκνωτή όσον αφορά στην πυκνότητα της ενέργειας.

Οι υπάρχουσες δυνατότητες των κυψελών ροής επίσης είναι αρκετά ικανοποιητικές, ώστε να αποτελέσουν το κύριο μέσο αποθήκευσης της ενέργειας σε αυτόνομα συστήματα παραγωγής, ενώ φαίνεται ότι οι κυψέλες ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου και μολύβδου-οξέος υπερτερούν έναντι των άλλων τεχνολογιών κυψελών.

Οι κυψέλες ροής οξειδοαναγωγής πλεονεκτούν έναντι των κλασικών μπαταριών, έχουν όμως μεγαλύτερο κόστος, οπότε βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα.

Όσον αφορά στην τεχνολογία σφονδύλου είναι κατάλληλη μόνο για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση προσδίδοντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε μικρό χρόνο.

Το σημαντικότερο από τα πλεονεκτήματα των SMES, είναι ο εξαιρετικά υψηλός στιγμιαίος βαθμός απόδοσης, που αγγίζει έως και το 95% για έναν κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης.

Επιπλέον, αυτά τα συστήματα μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως σε αντιδιαστολή με τις μπαταρίες. Είναι πολύ χρήσιμα για εφαρμογές που απαιτούν συνεχή λειτουργία με έναν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.

Οι κυψέλες καυσίμου PEM θεωρούνται αυτήν την περίοδο η πλέον αναπτυσσόμενη μορφή τεχνολογίας τέτοιου είδους. Στην αγορά διατίθεται σε μία ποικιλία ισχύος από 1 kW_{ελ.}-250 kW_{ελ.}. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους (χαρακτηριστικά 80°C) και το ευνοϊκό τους κόστος τις καθιστά ελκυστικές.

Η Α.Κ.Ζ. είναι μία αναλυτική και λεπτομερής μελέτη του προϊόντος ή διεργασίας από την «κούνια μέχρι το θάνατο». Δηλαδή αναλύονται τα διάφορα στάδια από τα οποία περνάει το προς εξέταση προϊόν, από τη δημιουργία του μέχρι την τελική απόρριψή του.

Οι πιο κυρίαρχες πηγές θέρμανσης που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά τη φάση της παραγωγής μιας μπαταρίας Li-ion είναι η χρήση ενέργειας κατά την κατασκευή της μπαταρίας, τα ηλεκτρονικά και η κάθοδος. Τα ηλεκτρονικά φαίνεται να είναι υπεύθυνα και στις περιπτώσεις φωτοχημικών επιπτώσεων (58%) και οξίνισης (48%). Οι επιπτώσεις των φάσεων συναρμολόγησης και παραγωγής μπορεί να αντισταθμιστεί σε μεγάλο βαθμό από τη συλλογή και ανακύκλωση των μπαταριών η οποία είναι αποτελεσματική όταν εκτελείται σε μεγάλη κλίμακα.

Φαίνεται ότι στην περίπτωση κυψέλης PEM που καίγεται φυσικό αέριο παράγεται περισσότερη απορριπτόμενη θερμότητα στον αέρα όπως και διοξείδιο του άνθρακα.

Επιπλέον και στα υλικά και στις μεταφορές και στην ενέργεια αλλά και στις απαιτήσεις χώρου φαίνεται ότι η κατασκευή PEM είναι προτιμότερη από την κατασκευή της σειράς PEM.

Στους συμπιεστές φαίνεται ότι την περισσότερη ενέργεια και συνεπώς και την απορριπτόμενη θερμότητα σαν εκπομπές στον αέρα χρειάζεται ο συμπιεστής μέσης παραγωγής >30 kW.

Στους πυκνωτές φαίνεται ότι για την παραγωγή τους περισσότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον παρουσιάζει ο πυκνωτής τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση καθώς και ο πυκνωτής τανταλίου. Αυτό προέκυψε από τη βάση δεδομένωνecoinvent με στοιχειομετρικούς υπολογισμούς των υλικών και της χρήσης ενέργειας παράγοντας ένα συντελεστή περιβαλλοντικής επίπτωσης.

Η εξεργειακή αποδοτικότητα μιας κυψέλης καυσίμου PEM μπορεί να βελτιωθεί σε μία υψηλότερη πίεση λειτουργίας. Επιπλέον συστήνεται μια υψηλή διαφορά πίεσης μεταξύ της καθόδου και της ανόδου προκειμένου να ενισχυθούν τα ηλεκτροοσμωτικά φαινόμενα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.

Αφετέρου, η αποδοτικότητα μπορεί επίσης να αυξηθεί μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης παρά το μικρό εύρος και τις χαμηλές θερμοκρασίας λειτουργίας των κυψελών PEM σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψέλης που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Επιπλέον υψηλότερη εξεργειακή απόδοση θα μπορούσε να επιτευχθεί εάν η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε σχετικά υψηλότερες τάσεις που απαιτούνται λιγότερα ποσοστά ροής μάζας για τα αντιδραστήρια και τα προϊόντα προκειμένου να επιτευχθεί μια υψηλή ηλεκτρική παραγωγή.

Η υψηλή στοιχειομετρία αέρα προκαλεί μια σημαντική αύξηση στην αποδοτικότητα της κυψέλης καυσίμου, αν και θα συστηνόταν να υπάρξει μια αναλογία αέρα μεταξύ 2 και 4 προκειμένου να διατηρηθεί το επίπεδο σχετικής υγρασίας στον αέρα των προϊόντων και να αποφευχθεί η αφυδάτωση της μεμβράνης της κυψέλης που ξηραίνεται σε υψηλές λειτουργούσες θερμοκρασίες.

Συγκρίνοντας τις εξεργειακές αναλύσεις των τριών συστημάτων που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε ότι τη μεγαλύτερη εξεργειακή απόδοση είχε το σύστημα CAES και TES 67,5% ακολουθούμενο από την κυψέλη PEM περίπου 40% και τέλος το σύστημα CTES 28%.

Βιβλιογραφία

- 1.«Energy storage systems—Characteristics and comparisons» H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron 2007
- 2.«Energy storage in the UK electrical network: Estimation of the scale and review of technology options» Ian Allan Grant Wilson, Peter G. McGregor, Peter J. Hall, 2010
- 3.Διπλωματική εργασία: «Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και εφαρμογές στη μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας», Γέραλης Νικόλαος, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών, 2009
- 4.«A review on phase change energy storage: materials and applications» Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair , Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj, 2003
- 5.«A review on long-term sorption solar energy storage» K. Edem N'Tsoukpoe, Hui Liu, Nolwenn Le Pierres, Lingai Luo, 2009
6. «Hybrid Simulation and Optimization-based Design and Operation of Integrated Photovoltaic Generation, Storage Units, and Grid» Esfandyar Mazhari, Jiayun Zhao, Nurcin Celik, Seungho Lee, Young-Jun Son, Larry Head, 2010
7. «Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES)» Alfred Cavallo, 2005
8. «Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications» Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas *, Venizelos Efthimiou, 2008
- 9.«Redox flow cells for energy conversion» C. Ponce de León, A. Frías-Ferrer, J. González-García , D.A. Szánto c, F.C. Walsh, (2006) “Redox flow cells for energy conversion”, Journal of Power Sources 160 (2006) 716–732
- 10.«Possible use of vanadium redox-flow batteries for energy storage in small grids and stand-alone photovoltaic systems» Ludwig Joerissen, Juergen Garche, Ch. Fabjan, G. Tomazic , 2004

11. «Microfluidic fuel cells: A review» Erik Kjeang, Ned Djilali, David Sinton, 2008
12. Μεταπτυχιακή εργασία: «Ρύθμιση συστήματος κυψέλης καυσίμου βασισμένη σε μαθηματικό μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου και ανίχνευση βέλτιστου σημείου λειτουργίας», Χρυσοβαλάντου Ζιώγου τμήμα Μαθηματικών ΑΠΘ, 2009
13. βιβλίο Θερμοδυναμική, Η.Δ. Βαehr, εκδόσεις Γιαχούδη, επιμέλεια Πάττας Κ., σελ. 385-389, 2001
14. CARB California Air Resources Board (2007). Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology, Report of the ARB Independent Expert Panel.
15. European Topic Centre on Air and Climate Change (2009). Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe - Critical Review of Literature
16. «Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration» Nirmal-Kumar C. Nair*, Niraj Garimella, 2010
17. «New technology and possible advances in energy storage» John Baker, 2008
18. «Energy-storage technologies and electricity generation» Peter J. Hall, Euan J. Bain Department of Chemical and Process Engineering, Glasgow, 2008
19. «Flywheel energy and power storage systems», Bjorn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon, Department of Engineering Sciences, Uppsala University, Sweden, 2005
20. INVESTIRE-NETWORK, STORAGE TECHNOLOGY REPORT, ST6: FLYWHEEL, 2003 Project funded by the European Community under the 5th Framework Programme (1998 – 2002)
21. ιστοσελίδα: http://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage
22. Διπλωματική εργασία: «Ανάλυση και προσομοίωση μοντέλων υπερπυκνωτών και σύνδεση με αντιστροφέα.», Σαπλαμίδης Βασίλειος και Σπετσιώτης Κωνσταντίνος, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, 2010

23. «Analysis of stationary fuel cell dynamic ramping capabilities and ultracapacitor energy storage using high resolution demand data», James R. Meacham, Faryar Jabbari, Jacob Brouwer, Josh L. Mauzey, G. Scott Samuelson, *National Fuel Cell Research Center, University of California, USA*, 2005
24. «ΔΙΔΑΚΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ» ΧΡΗΣΤΟΦΗΣ Ι. ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ, ΕΜΠ, ΑΘΗΝΑ , ΜΑΡΤΙΟΣ 2006
25. «Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles - Critical issues» Mats Zackrisson, Lars Avellán , Jessica Orlenius, 2010
26. «Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles» Dominic A. Notter, Marcel Gaugh, Rolf Widmer, Patrick Wager, Anna Stamp, Rainer Zah, Hans- Jorg Althaus, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Switzerland, 2010
27. «SUBAT: An assessment of sustainable battery technology» Peter Van den Bossche, Frederic Vergels , Joeri Van Mierlo, Julien Matheys , Wout Van Autenboer, 2005
28. «Life Cycle Inventories of new CHP systems», Alex Primas Basler & Hofmman, ecoinvent report No. 20, 2007
29. «Life cycle assessment of fuel cell-based APUs» Francesco Baratto, Urmila M. Diwekar, 2004
30. Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie - und Verkehrstechnik, Dipl.-Phys. Martin Pehnt ,2001 Universität Stuttgart
31. Metal processing and compressed air supply, Roland Steiner, Rolf Frischknecht, Zurich, ecoinvent report No. 23, 2007
32. ιστοσελίδα: http://en.wikipedia.org/wiki/types_of_capacitor
33. Life Cycle Inventories of Electric and Electronic Equipment: Production, Use and Disposal, Roland Hishier, Mischa Classen, Martin Lehmann, Wolfram Scharnhorst, St. Gallen/Dubendorf, ecoinvent report No. 18, 2007

34. Energetic, exergetic, environmental and sustainability aspects of thermal energy storage systems I. Dincer and M.A. Rosen, 2000
35. Exergy analysis of a caes with thermal energy storage Giuseppe Grazzini, Adriano Milazzo
36. Development of some exergetic parameters for PEM fuel cells for measuring environmental impact and sustainability Adnan Midilli, Ibrahim Dincer, 2009
37. Exergy analysis of a PEM fuel cell at variable operating conditions Ayoub Kazim 2003
38. βιβλίο Θερμοδυναμική για μηχανικούς, Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, εκδόσεις Τζιόλα, επιμέλεια Τσιακάρης Π., 3^η έκδοση

Παράρτημα

Πίνακας 43: Περίληψη των υλικών συμπιεστή 4 KW και 300 KW [31]

		Ισχύς συμπιεστή	
		4 kW	300kW
ΒΑΡΟΣ	kg	140	4600
ΥΛΙΚΑ			
ΧΑΛΥΒΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΣΗΣ	kg	16	250
ΧΑΛΥΒΑΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΡΑΜΑΤΩΣΗΣ	kg	40	2100
ΧΑΛΥΒΑΣ	kg	30	1700
ΧΑΛΚΟΣ	kg	20	300
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	kg	20	220
ΠΛΑΣΤΙΚΑ (PS)	kg	10	20
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ (PWB)	kg	1	1
ΕΛΑΣΤΙΚΟ	kg	3	9

Πίνακας 44: Προσδιορισμός υλικών πυκνωτή τύπου ταινίας για ενδιάμεση κάθετη πρόσβαση [32]

Συνολικό βάρος	g	0,7
Μέταλλα		
Αλουμίνιο	%	3,15
Χαλκός	%	24,59
Σίδηρος	%	7,9
Μόλυβδος	%	0,41
Νικέλιο	%	0,9
Φώσφορος	%	1,05
Άργυρος	%	2,82
Κασσίτερος	%	2,29
Ψευδάργυρος	%	8,38
Άλλα		
PPS	%	6,47
PEN	%	6,03
PP/PBT 100% πολυπροπυλένιο	%	2,64
PP/PET 50% πολυπροπυλένιο και 50% PET	%	4,75
φαινολική ρητίνη	%	0,24
Εποξική ρητίνη	%	15,5
Θερμοσκληρυνόμενα	%	2,73
Πλαστικά	%	10,15

Πίνακας 45: Προσδιορισμός υλικών πυκνωτή τύπου SMD [32]

Συνολικό βάρος	g	0,086
Μέταλλα		
Χαλκός	%	0,95
Νικέλιο	%	13,57
Παλλάδιο	%	0,09
Άργυρος	%	2,65
Κασσίτερος	%	1,65
Άλλα		
Γυαλί	%	0,15
Κεραμικά (BaTiO ₃ /CoO)	%	39,13
BaTiO ₃ ή CaZrO ₃	%	2,34
CaMgTiO ₃	%	6,98
BaTiO ₃	%	27,15
CaTiO ₃	%	5,34

Πίνακας 46: Προσδιορισμός υλικών πυκνωτή τύπου ηλεκτρολύτη [32]

		Μικρός πυκνωτής	Μεγάλος πυκνωτής
Βάρος	g	1,29	50,5
Μέταλλα			
Αλουμίνιο	%	47,2	50,9
Χαλκός	%	0,92	0,919
Σίδηρος	%	5,7	2
Μόλυβδος	%	0,003	-
Άργυρος	%	1,7	-
Κασσίτερος	%	0,139	0,073
Άλλα			
Ηλεκτρολύτης(Αιθυλική γλυκόλη)	%	18,5	25
χαρτί	%	5,3	8,3
ελαστικό	%	4,1	1,6
Χαρτί/ελαστικό/τεφλόν	%	0,69	1,15
PVC	%	0,963	0,963
PVC/PET	%	0,8	1,3
Πλαστικά	%	6,6	6,6
Φαινολική ρητίνη/ nylon	%	-	1,3
Πολυαμίδιο-6	%	0,025	-
PPS	%	1,4	-
Πολυπυρόλιο	%	0,213	-
Εποξική ρητίνη	%	5,8	-

Πίνακας 47: Προσδιορισμός υλικών πυκνωτή τύπου τανταλίου [32]

Συνολικό βάρος	g	0,254
Μέταλλα		
Σίδηρος	%	5,86
Νικέλιο	%	4,24
Άργυρος	%	2,6
Κασσίτερος	%	2,3
Ταντάλιο	%	36,7
Άλλα		
Διοξείδιο του μαγγανίου	%	5,7
Sb ₂ O ₃	%	1,1
Teflon	%	0,5
εποξική	%	1
εποξική ρητίνη	%	40