



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (AA-CAES)»***

Του Φοιτητή

Ηλιόπουλου Φραγκίσκου

Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2017

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η κατασκευή ενός μοντέλου δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας ενός αδιαβατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES), μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας του και καθορίστηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοσή του. Στα τρία πρώτα κεφάλαια παρουσιάζεται στον αναγνώστη, κατά σειρά, βιβλιογραφική έρευνα περί των τρόπων αποθήκευσης ενέργειας γενικά, και στη συνέχεια ειδικότερα περί των συμβατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (CAES), και των αδιαβατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES). Στη συνέχεια, περιγράφεται η κατασκευή του μοντέλου, το οποίο δημιουργήθηκε σε περιβάλλον Matlab/Simulink, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσής του. Το σύστημα AA-CAES που μελετήθηκε φορτίζεται συμπιέζοντας αέρα μέσω μιας διάταξης συμπίεσης τεσσάρων συμπιεστών. Ο αέρας στη συνέχεια αποθηκεύεται σε υπόγεια κοιλάτητα, αφού πρώτα μεταφέρει τη θερμότητα που απέκτησε λόγω της συμπίεσής του σε ένα βιομηχανικό έλαιο, το οποίο ρέει από μια ψυχρή προς μία θερμή δεξαμενή. Η εκτόνωση του συμπιεσμένου αέρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε μια διάταξη τριών στροβίλων, αφού προηγουμένως του αποδοθεί η αποθηκευμένη στο έλαιο θερμότητα συμπίεσης. Το σύστημα, του οποίου ο κύκλος λειτουργίας ήταν επιθυμητό να διαρκεί περίπου ένα 24ωρο, φορτίζεται σε οκτώ ώρες, καταναλώνοντας κατά μέσο όρο ηλεκτρική ισχύ 55 MW, ενώ εκφορτίζεται σε περίπου τέσσερις, παράγοντας 73 MW ηλεκτρικής ισχύος. Μεταξύ συμπίεσης και εκτόνωσης μεσολαβεί ένα διάστημα αναμονής 12 ωρών. Ο βαθμός απόδοσης του μοντέλου που προσομοιώθηκε είναι 60,73% και συμφωνεί με τις αναφερόμενες τιμές της βιβλιογραφίας. Οι κύριες απώλειες του συστήματος είναι οι απώλειες θερμότητας από τον αέρα εντός της υπόγειας κοιλάτητας προς τα τοιχώματά της, και οι απώλειες λόγω εξόδου του θερμού αέρα από τους στροβίλους στην ατμόσφαιρα. Επίσης, διερευνήθηκε η επίδραση πέντε παραμέτρων στο βαθμό απόδοσης του συστήματος, οι οποίοι, κατά φθίνουσα σειρά επιρροής, είναι: ο χρόνος αναμονής, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η παροχή αέρα των συμπιεστών, ο όγκος της κοιλάτητας αποθήκευσης και η παροχή αέρα των στροβίλων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε επέκταση του μοντέλου, μέσω προσθήκης θαλάμου καύσης φυσικού αερίου πριν τον τελευταίο στρόβιλο, ώστε το σύστημα να μπορεί, σε περιπτώσεις ανάγκης, να ανταποκριθεί σε αυξημένες απαιτήσεις ηλεκτροπαραγωγής. Το γενικό συμπέρασμα που εξήχθηκε είναι ότι τα συστήματα AA-CAES, συνδυάζοντας υψηλή απόδοση και σεβασμό στο περιβάλλον, αποτελούν μια άκρως ελκυστική επιλογή για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, και όλα δείχνουν πως η επικείμενη βιομηχανοποίησή τους θα αποτελέσει ένα ακόμα βήμα προς την αναγκαία σταδιακή απαγκίστρωση της ενεργειακής βιομηχανίας από την καύση ορυκτών καυσίμων.

Abstract

The objective of this diploma thesis is the construction of a dynamic model that simulates the operation of an Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) system, in order to study the behavior of the system throughout its operating cycle and to define the parameters that affect its efficiency. In the first three chapters, a bibliographic research on energy storage systems in general, Compressed Air Energy Storage (CAES) systems, and Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) systems is presented successively. In the next chapters, the mathematical modeling of the system, which was implemented in a Matlab/Simulink environment, is described, and finally, the results of the simulation are presented. The AA-CAES system is charged by the compression of ambient air in a four stage compression train. The air is then stored in an underground cavern, after transferring its compression heat in an industrial oil, which flows from a cold to a hot tank. In the expansion phase, the air expands through an arrangement of three turbines, after compression heat stored in the oil is returned to the air through heat exchangers. The system, whose cycle of operation was intended to last about 24 hours, is charged in eight hours, consuming an average of 55 MW of electricity, and it is discharged in about four hours, producing 73 MW of electrical power. Between compression and expansion, the system remains idle for a 12-hour time period. The efficiency of the simulated model is 60.73%, which agrees with the reported literature values. The main energy losses of the system are due to the heat transfer from the air in the underground cavern to its walls, and due to the exit of the expanded hot air in the turbine outlet to the atmosphere. This thesis also investigates the effect of five parameters on the system's performance. These parameters, in descending order of influence, are: the idle time, the ambient temperature, the air mass flow of compressors, the storage cavern volume and the air mass flow of turbines. Finally, the model was expanded by adding a natural gas combustion chamber before the last turbine, so that the system could, in cases of emergency, respond to increased electrical power production demand. The general conclusion is that AA-CAES systems, combining high efficiency and respect for the environment, are an extremely attractive option for electrical energy storage, and it is clear that their forthcoming industrialization will be another step towards the necessary gradual disengagement of the energy industry from the combustion of fossil fuels.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	i
Abstract.....	ii
Πίνακας Περιεχομένων.....	iii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Η Ανάγκη Αποθήκευσης της Ενέργειας	1
1.2 Τρόποι Αποθήκευσης Ενέργειας	2
1.3 Σύγκριση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας - Η ανάγκη για Μελέτη και Διερεύνηση των CAES	8
1.4 Στόχος της Εργασίας.....	10
2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (CAES)..	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Στοιχεία Λειτουργίας CAES.....	12
2.2.1 Αρχές λειτουργίας CAES	12
2.2.2 Πλεονεκτήματα συστήματος CAES.....	14
2.2.3 CAES μικρής κλίμακας	14
2.2.4 Βαθμός απόδοσης CAES	15
2.3 Κύριες Συνιστώσες συστήματος CAES	16
2.3.1 Δεξαμενή αποθήκευσης αέρα.....	16
2.3.2 Συμπιεστές.....	20
2.3.3 Στρόβιλοι	21
2.4 Σύντομη Οικονομική Ανάλυση Μονάδων CAES	23
2.5 Υπάρχουσες Εγκαταστάσεις CAES	24
2.5.1 Η μονάδα CAES του Huntorf.....	25
2.5.2 Η μονάδα CAES του McIntosh	26
2.5.3 Μη ολοκληρωμένα έργα	28

3. ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (AA-CAES)	30
3.1 Εισαγωγή	30
3.2 Στοιχεία Λειτουργίας AA-CAES	30
3.2.1 Αρχές λειτουργίας AA-CAES	30
3.2.2 Βαθμός απόδοσης μονάδων AA-CAES	33
3.2.3 Προϋποθέσεις για τη βιομηχανοποίηση της τεχνολογίας AA-CAES	33
3.3 Κύριες συνιστώσες συστήματος AA-CAES	33
3.3.1 Δεξαμενή αέρα	34
3.3.2 Συμπιεστές	34
3.3.3 Στρόβιλοι	35
3.3.4 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (Thermal Energy Storage- TES).....	36
3.4 Το έργο ADELE.....	40
3.5 Ανασκόπηση ερευνών στα συστήματα AA-CAES.....	41
3.5.1 AA-CAES με αποθήκευση θερμότητας σε στερεό μέσο	41
3.5.2 AA-CAES με αποθήκευση θερμότητας σε υγρό μέσο	44
3.5.3 AA-CAES χαμηλής θερμοκρασίας (LTA-CAES)	45
4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (AA-CAES)	47
4.1 Περιγραφή διάταξης – Γενικές παραδοχές	47
4.2 Σύστημα συμπίεσης	51
4.3 Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	54
4.4 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (TES).....	58
4.4.1 Θερμή δεξαμενή ελαίου (Hot HTF Tank).....	58
4.4.2 Ψυχρή δεξαμενή ελαίου (Cold HTF Tank)	60
4.5 Σύστημα εκτόνωσης.....	62
4.6 Σύστημα καύσης (σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης ισχύος).....	65
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AA-CAES	67
5.1 Γενικά αποτελέσματα	69
5.2 Κουλότητα αποθήκευσης αέρα.....	72
5.3 Σύστημα συμπίεσης	74
5.4 Σύστημα εκτόνωσης.....	77

5.5 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας	78
5.5.1 Θερμή δεξαμενή ελαίου	78
5.5.2 Ψυχρή δεξαμενή ελαίου	80
5.6 Ροές Ενέργειας συστήματος AA-CAES – Διάγραμμα Sankey.....	81
5.7 Ανάλυση Ευαισθησίας	83
5.7.1 Όγκος κοιλότητας αποθήκευσης αέρα.....	83
5.7.2 Διάρκεια αναμονής συστήματος.....	85
5.7.3 Θερμοκρασία περιβάλλοντος	86
5.7.4 Παροχή μάζας αέρα συμπιεστών	87
5.7.5 Παροχή μάζας αέρα στροβίλων	88
5.8 Επέκταση μοντέλου με καύση	90
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ.....	93
6.1 Συμπεράσματα	93
6.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	95
Παράρτημα Α	97
Βιβλιογραφία.....	103

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η Ανάγκη Αποθήκευσης της Ενέργειας

Λόγω της συνεχούς ραγδαίας αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα, τα μειονεκτήματα των συμβατικών τρόπων παραγωγής ενέργειας γίνονται με τον καιρό όλο και πιο εμφανή. Το διαρκώς μειούμενο απόθεμα και η άνιση κατανομή των ορυκτών πόρων καυσίμου, σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι μια πραγματική πρόκληση για την ενεργειακή βιομηχανία, όσον αφορά τη συνέχιση της ομαλής τροφοδοσίας ενέργειας και τη σταθερότητα της τιμής της σε όλη την υφήλιο [1]. Μελέτες έχουν δείξει ότι με το ρυθμό που καταναλώνονται οι ενεργειακοί πόροι σήμερα, δεν αρκούν για να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες των ανθρώπων για πάνω από δύο γενεές [2]. Παρόλο που έχουν γίνει σημαντικά άλματα προόδου ως προς την αναβάθμιση των συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου της αύξησης της απόδοσής τους, είναι φανερό ότι αυτό από μόνο του δεν θα δώσει λύση στο πρόβλημα.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, επομένως, αποτελούν μονόδρομο για τη λύση του ενεργειακού προβλήματος, και είναι απολύτως λογικό το ενδιαφέρον της ενεργειακής βιομηχανίας να στρέφεται προς αυτή την κατεύθυνση. Η διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό τις τελευταίες δεκαετίες, και είναι φανερό αυτό θα συνεχιστεί και στο μέλλον προκειμένου να ελαττωθεί η εξάρτηση της ηλεκτροπαραγωγής από τα ορυκτά καύσιμα.

Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εις βάρος των συμβατικών πηγών είναι αδιαμφισβήτητα. Παράλληλα όμως, εισάγουν νέες προκλήσεις. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, των οποίων η ισχύς ρυθμίζεται κατά βούληση ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες, βασίζονται στην αξιοποίηση της ισχύος που παρέχεται από τη φύση. Επομένως όπως είναι λογικό, η μέγιστη παραγόμενη ισχύς τους δεν συμβαδίζει χρονικά με την μέγιστη ζήτηση ισχύος. Επιπροσθέτως, παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις ισχύος όχι μόνο μηνιαίως, αλλά και από έτος σε έτος [3]. Η περίσσεια της απαιτούμενης ενέργειας, όταν αυτή δεν δύναται να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές καλύπτεται κυρίως από εργοστάσια που χρησιμοποιούν ορυκτό καύσιμο, και μάλιστα πολλές φορές υπό συνθήκες μερικού φορτίου [1], πράγμα το οποίο οδηγεί σε χαμηλή απόδοση και σε αυξημένες εκπομπές ρύπων.

Η αποθήκευση της ενέργειας των ανανεώσιμων πηγών, σε μία ενδιάμεση μορφή, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται όταν υπάρχει η αντίστοιχη ζήτηση, κρίνεται αναγκαία όσο το ποσοστό διείσδυσής τους στην παραγωγή ενέργειας αυξάνεται, προκειμένου να εξισορροπηθεί η χρονική διαφορά φάσης προσφοράς-ζήτησης ενέργειας. Έτσι θα υπάρξουν οι βάσεις ώστε οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να καταστούν πλήρως αξιόπιστες ως πρωτεύουσες πηγές ενέργειας στο μέλλον. Η ενέργεια πρέπει να αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια πλεονάζουσας παραγωγής της, και να απελευθερώνεται, όταν τα επίπεδα παραγωγής της είναι μικρότερα από της απαιτούμενες ανάγκες.

Είναι δυνατή η αποθήκευση πολλών μορφών ενέργειας, αλλά το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς θεωρείται ως η πλέον κατάλληλη για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις και αποτελεσματική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

έχει αναγνωριστεί ως μια από τις τεχνολογίες που μπορούν να υποστηρίξουν κατάλληλα την παρούσα και μελλοντική λειτουργία του δικτύου ενέργειας [4].

1.2 Τρόποι Αποθήκευσης Ενέργειας

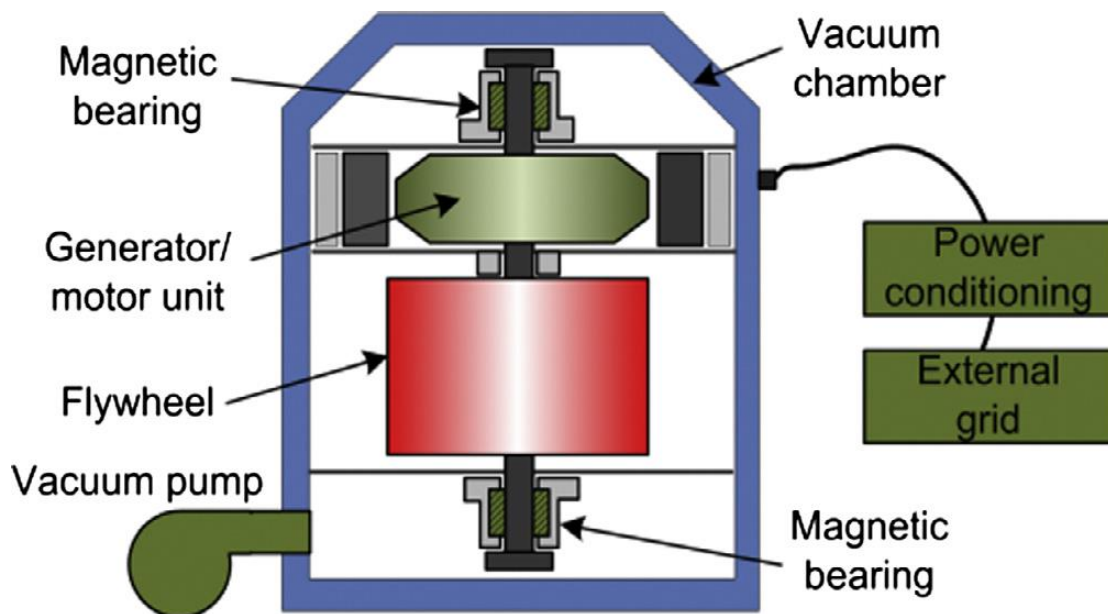
Οι απαιτήσεις που υπάρχουν από μια διάταξη αποθήκευσης ενέργειας είναι ότι θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύει μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε μικρό χώρο, αλλά και να είναι σε θέση να διοχετεύει αυτή την ενέργεια αργά ή ταχύτατα, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις ενέργειας. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι ικανή να λειτουργεί με έναν κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης με μεγάλη διάρκεια ζωής, και με αποδοτική εκφόρτιση, χωρίς να καταστρέφεται. Επίσης θα πρέπει να είναι ασφαλής, οικονομική και να μην απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση [5]. Παρακάτω θα γίνει μία σύντομη αναφορά στις πιο διαδεδομένες διατάξεις αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές είναι [6]:

- i) Οι σφόνδυλοι (Flywheel Energy Storage System-FESS)
- ii) Τα υπεραγώγιμα υλικά (Superconducting Magnetic Energy Storage-SMES)
- iii) Οι υπερπυκνωτές (Super Capacitor Energy Storage-SCES)
- iv) Οι συσσωρευτές (Battery Energy Storage Systems-BESS)
- v) Η αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Energy Storage Systems-PHESS) και
- vi) Τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES)

i) Σφόνδυλοι (FESS)

Ο σφόνδυλος είναι ουσιαστικά ένας δίσκος με συγκεκριμένη μάζα ο οποίος περιστρέφεται, έχοντας κινητική ενέργεια. Οι σφόνδυλοι φορτίζονται και εκφορτίζονται μέσω ενός κινητήρα/γεννήτριας. Ο κινητήρας αντλεί ενέργεια από το δίκτυο, η οποία χρησιμοποιείται για να κινήσει το δρομέα του σφονδύλου. Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται στο δρομέα μετατρέπεται, όταν χρειαστεί, σε ηλεκτρική ενέργεια από τη γεννήτρια, και μεταφέρεται στο δίκτυο σε σταθερή συχνότητα και τάση μέσω ενός συστήματος ελέγχου [6]. Οι μοντέρνοι σφόνδυλοι υψηλής τεχνολογίας κατασκευάζονται με τον άξονα περιστροφής τους σε οριζόντια θέση, προκειμένου να ελαχιστοποιείται η επίδραση της βαρύτητας. Επίσης, για την αύξηση της απόδοσης τους, συνήθως περιστρέφονται σε κενό αέρος προκειμένου να ελαττωθεί η αεροδυναμική τριβή, και στηρίζονται σε ηλεκτρομαγνητικά έδρανα, ώστε ουσιαστικά να αιωρούνται [7].

Τα πλεονεκτήματα τους είναι το ότι απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και διάρκεια ζωής μέχρι 20 χρόνια, έχουν μικρούς χρόνους απόκρισης και το ότι δεν αποτελούνται από τοξικά υλικά. Στα αρνητικά τους συγκαταλέγεται το υψηλό αγοραστικό τους κόστος, η μικρή χωρητικότητα ενέργειας, και το υψηλό ποσοστό αυτό-εκφόρτισης (self-discharge) τους, το οποίο μπορεί να φτάσει μέχρι και το 20% της αποθηκευμένης ενέργειάς τους κάθε ώρα [7].

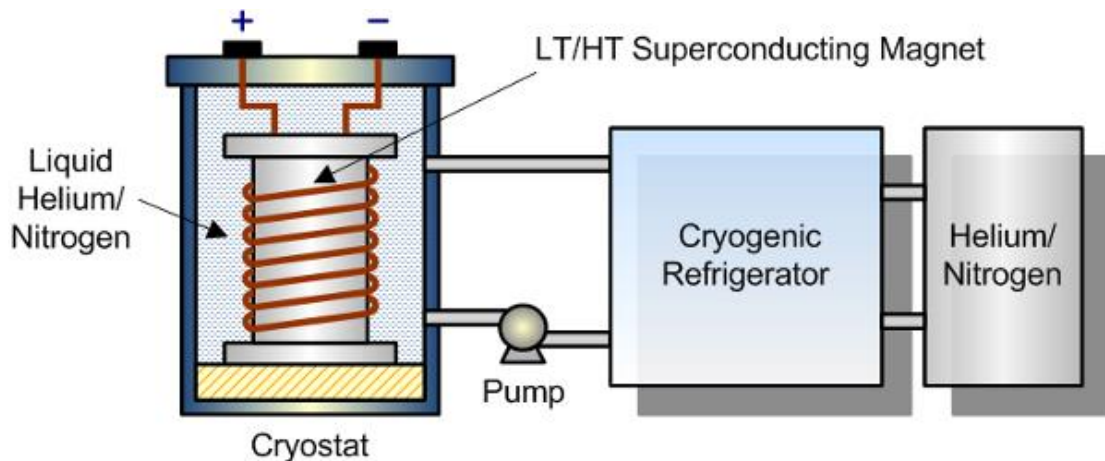


Εικόνα 1.1 : Διάταξη σφονδύλου αποθήκευσης ενέργειας. Πηγή: [8]

ii) Υπεραγώγιμα υλικά (SMES)

Η ιδέα της διάταξης αυτής είναι το να αποθηκεύεται ενέργεια υπό τη μορφή ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εντός ενός πηνίου κατασκευασμένου από υπεραγώγιμο υλικό. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίας μερικά υλικά χάνουν κάθε ηλεκτρική αντίσταση και επομένως καθίστανται υπεραγωγοί. Η διατάξεις αυτές χρησιμοποιούν το φαινόμενο αυτό και θεωρητικά αποθηκεύουν ενέργεια χωρίς ενεργειακές απώλειες (πρακτικά 90-95% απόδοση). Η πολύ χαμηλή θερμοκρασία που απαιτείται για τη λειτουργία τους καθίσταται δυνατή μέσω της ψύξης της διάταξης με υγρό ήλιο ή υγρό άζωτο [7]. Η ρύθμιση της λειτουργίας της διάταξης (φόρτιση-εκφόρτιση-αναμονή) γίνεται ελέγχοντας την τάση στα άκρα του υπεραγώγιμου πηνίου [6].

Στα πλεονεκτήματα των υπεραγώγιμων πηνίων συγκαταλέγεται ο μικρός χρόνος απόκρισης τους, η ικανότητά τους να αποφορτίζονται μερικώς και ολικώς, και ότι δεν προκαλούν κανένα περιβαλλοντικό κίνδυνο. Τα μειονεκτήματά τους είναι οι υψηλές ενεργειακές απώλειες (12% την ημέρα), το υψηλό κόστος παραγωγής και συντήρησής τους, και η ελάττωση της απόδοσής τους λόγω της απαραίτητης ψύξης τους [7].

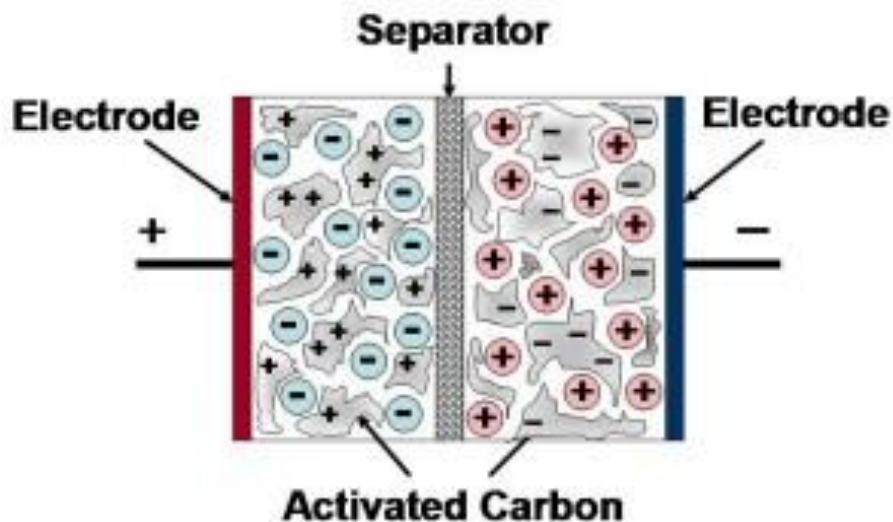


Εικόνα 1.2 : Διάταξη υπεραγώγιμου πηνίου για την αποθήκευση ενέργειας. Πηγή: [9]

iii) Υπερπυκνωτές (SCES)

Οι υπερπυκνωτές είναι πυκνωτές διπλού στρώματος ιόντων σε κάθε οπλισμό. Οι οπλισμοί αποτελούνται από πορώδες υλικό με μεγάλη εσωτερική ενεργή επιφάνεια, ώστε να βοηθάει στην απορρόφηση ιόντων, παρέχοντας έτσι μεγάλη πυκνότητα φορτίων. Το πρώτο στρώμα που είναι κοντά στον οπλισμό λειτουργεί σαν διηλεκτρικό και το δεύτερο συγκρατεί τα φορτία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εντός του πυκνωτή δύο ξεχωριστοί πυκνωτές που η συνολική τους χωρητικότητα προκύπτει από τις δύο χωρητικότητες σε σειρά. Κατά τη φόρτισή τους, τα ηλεκτρόδια φορτίζονται με αντίθετα φορτία, προκαλώντας ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο συγκρατεί στον πυκνωτή το συγκεντρωμένο φορτίο [10]. Η ηλεκτρική ενέργεια αυτή μπορεί στη συνέχεια να απελευθερωθεί.

Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, θεωρητικά δεν χρειάζονται ποτέ αλλαγή, καθώς δεν υπόκεινται σε χημικές αντιδράσεις που μειώνουν το χρόνο ζωής τους, όπως και το ότι είναι πολύ ελαφρύτεροι και έχουν εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Το μειονέκτημα τους είναι ότι δεν είναι κατάλληλοι για αποθήκευση υψηλών ποσών ενέργειας.

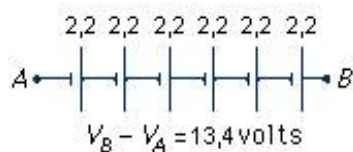
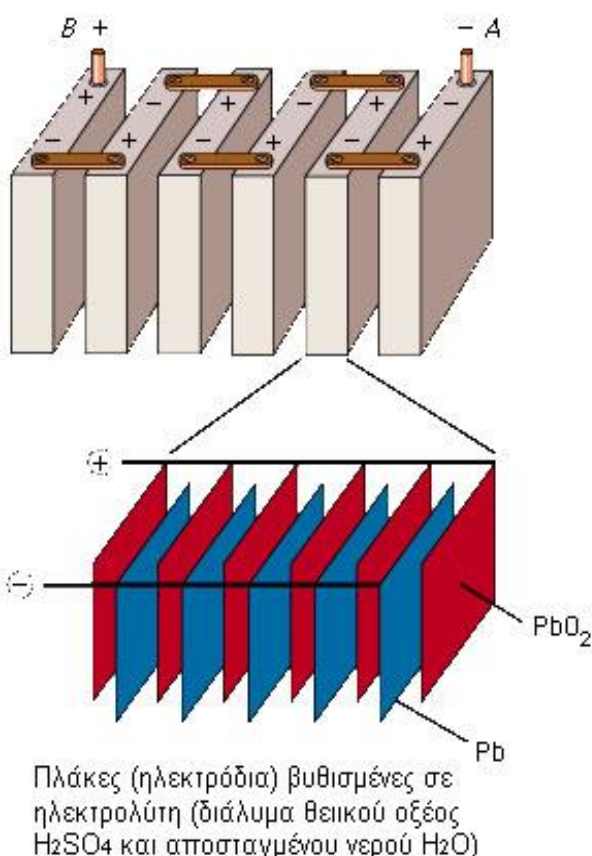


Εικόνα 1.3 : Σχηματική απεικόνιση υπερπυκνωτών,. Πηγή: [11]

iv) Συσσωρευτές (BESS)

Οι συσσωρευτές, ή αλλιώς μπαταρίες, είναι συσκευές που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από χημικές αντιδράσεις. Υπάρχουν πολλά είδη συσσωρευτών, με διαφορετικά χημικά στοιχεία. Η κύρια ιδέα είναι ότι τα δύο διαφορετικά χημικά που περιέχονται μέσα στην μπαταρία έχουν διαφορετικά φορτία και είναι συνδεδεμένα με ένα αρνητικό (κάθοδος) και ένα θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος). Όταν η μπαταρία συνδέεται σε μία συσκευή, το αρνητικό ηλεκτρόδιο την εφοδιάζει με ρεύμα ηλεκτρονίων, τα οποία ρέουν διαμέσου της συσκευής και τέλος καταλήγουν στο θετικό ηλεκτρόδιο. Για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται μόνο επαναφορτιζόμενες μπαταρίες [7]. Τα κύρια είδη συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται είναι οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου, οι μπαταρίες ροής, και οι μπαταρίες ιόντων νατρίου.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών είναι ότι είναι μια πλήρως μελετημένη τεχνολογία εδώ και πολλά χρόνια, με μεγάλη τεχνογνωσία, οι ελάχιστες απώλειες ενέργειας που έχουν (περίπου 5% το μήνα), και ότι υπάρχει πολύ ανεπτυγμένη γραμμή παραγωγής τους. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα, όπως το ότι είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον, ογκώδεις, και δεν έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα.



Η μπαταρία αυτοκινήτου περιλαμβάνει έξι στοιχεία τάσης 2,2 V (σε πλήρη φόρτιση) συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά

Κάθε στοιχείο αποτελείται από αρκετά αρνητικά και θετικά ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από ενεργό μολύβδο (Pb) και διοξειδίο του μολύβδου (PbO₂) αντίστοιχα.

Τα ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους και βυθισμένα σε ηλεκτρολύτη (διάλυμα θειικού οξέος H₂SO₄ και αποσταγμένου νερού H₂O)

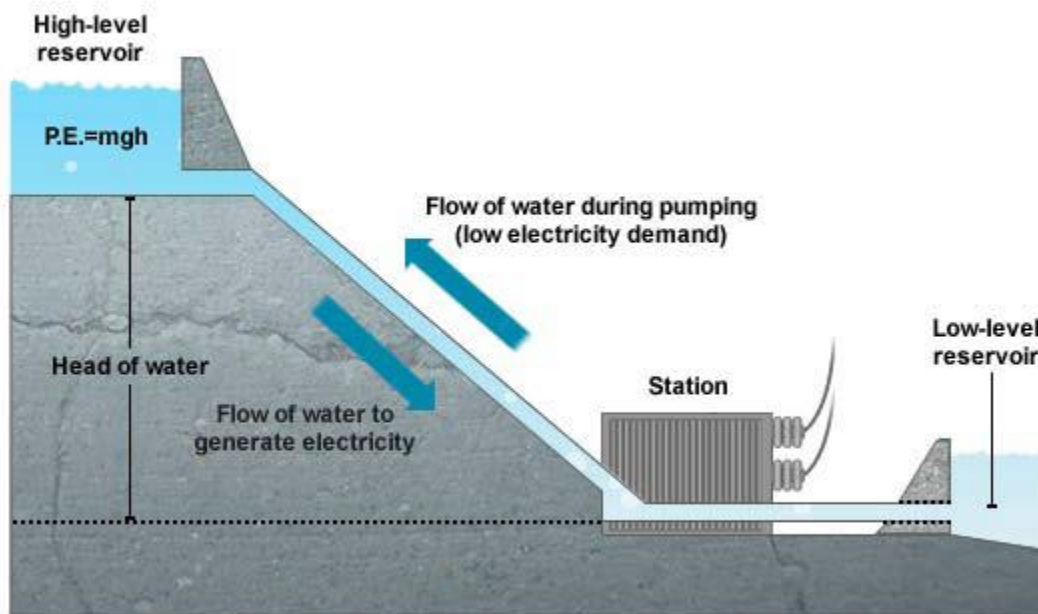
Εικόνα 1.4 : Σχήμα από διάταξη συσσωρευτή αυτοκινήτου. Πηγή: [12]

ν) Αντλησιοταμίευση (PHESS)

Η αντλησιοταμίευση είναι ο αρχαιότερος τρόπος αποθήκευσης πολύ μεγάλων ποσών ενέργειας, διατηρώντας ταυτόχρονα υψηλή απόδοση και οικονομία. Υπολογίζεται ότι αποτελεί το 98% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος μονάδων αποθήκευσης ενέργειας παγκοσμίως. Οι πρώτες εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης εγκαινιάστηκαν στην Ελβετία και στην Ιταλία τη δεκαετία του 1890, καθιστώντας την μία τεχνολογία με πάνω από 100 χρόνια ιστορία [7].

Το σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από δύο δεξαμενές νερού σε διαφορετικά ύψη, που επικοινωνούν μεταξύ τους. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρισμού, η πλεονάζουσα ενέργεια χρησιμοποιείται για να αντλήσει νερό από την δεξαμενή χαμηλής προς τη δεξαμενή υψηλής στάθμης, αποθηκεύοντας έτσι την ενέργεια σε δυναμική ενέργεια του νερού. Όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή, το νερό στην υψηλή δεξαμενή απελευθερώνεται, και η δυναμική του ενέργεια μετατρέπεται μέσω ενός υδροστροβίλου και μιας γεννήτριας σε ηλεκτρική. Συνήθως η αντλία που αντλεί το νερό σε περιόδους χαμηλής ζήτησης προς την υψηλή δεξαμενή λειτουργεί η ίδια ως στρόβιλος κατά την αποφόρτιση του συστήματος. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός τέτοιου υδροηλεκτρικού συστήματος είναι η ύπαρξη επιφανειακής απορροής νερού και κλίσεως του εδάφους ώστε να σχηματίζεται η απαραίτητη υψομετρική διαφορά [13]. Λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες μετατροπής ενέργειας και αυτές λόγω εξάτμισης του νερού, περίπου το 70-85% της αποθηκευόμενης ενέργειας μπορεί να επανακτηθεί [3]. Η ενεργειακή χωρητικότητα των εγκαταστάσεων αντλησιοταμίευσης ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία και το μέγεθος των δεξαμενών, όσο και από την υψομετρική διαφορά μεταξύ τους. Τυπικές τιμές είναι από λίγες MWh έως μερικές GWh [7].

Τα θετικά χαρακτηριστικά της αντλησιοταμίευσης είναι ότι είναι μια ώριμη τεχνολογία, ικανή να αποθηκεύσει εξαιρετικά μεγάλα ποσά ενέργειας με πολύ καλή απόδοση, μικρούς χρόνους απόκρισης, και οικονομικά. Τα μειονεκτήματα της είναι ότι χρειάζεται τοποθεσίες ειδικής γεωλογικής διαμόρφωσης, ότι η επίδραση στο φυσικό τοπίο και στο περιβάλλον κατά την κατασκευή τους είναι πολύ μεγάλη, και το ότι χρειάζονται μια επαρκώς μεγάλη πηγή νερού [7].



Εικόνα 1.5 : Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος αντλιοσταμείωσης. Πηγή: [7]

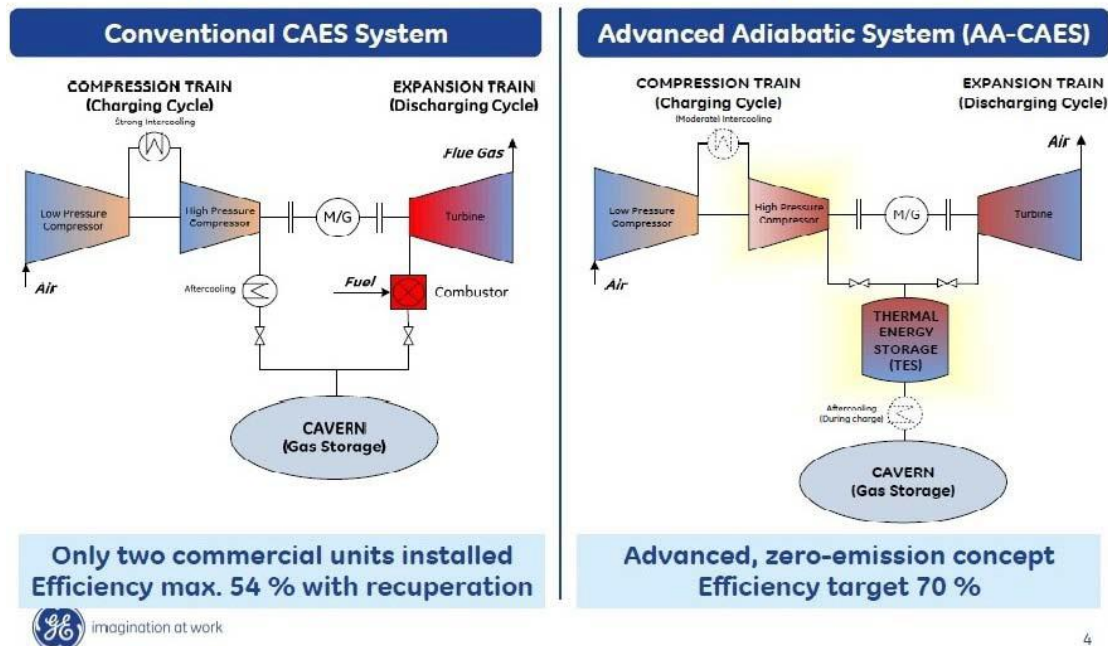
vi) Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (CAES)

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή συμπιεσμένου αέρα χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, προερχόμενη είτε από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, είτε από ανανεώσιμες πηγές, για να συμπιέζει αέρα σε μεγάλες δεξαμενές, υπόγειες ή υπέργειες [6]. Συνήθως χρησιμοποιούνται ως δεξαμενές υπόγειες κοιλότητες αλατούχου ορίζοντα που στην βιβλιογραφία αναφέρονται ως salt caverns [1], [7], [8]. Κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης ενέργειας, ο συμπιεσμένος αέρας αναμειγνύεται με φυσικό αέριο και εισάγεται σε θάλαμο καύσης προτού εκτονωθεί σε στρόβιλο, κατά παρόμοιο τρόπο με μια μονάδα αεριοστρόβιλου. Η διαφορά είναι ότι, λόγω της ύπαρξης ήδη συμπιεσμένου αέρα, στο CAES δε χρειάζεται να δαπανηθεί καύσιμο και για την κίνηση του συμπιεστή, οδηγώντας σε κατανάλωση καυσίμου ίση περίπου με το ένα τρίτο σε σχέση με τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους.

Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εναλλακτική του συστήματος αυτού που μελετάται εκτενώς πειραματικά τα τελευταία χρόνια είναι τα αδιαβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συμπιεσμένο αέρα (AA-CAES). Αυτά εκμεταλλεύονται τη θερμότητα της συμπίεσης, αποθηκεύοντάς την σε δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας, και την επαναχρησιμοποιούν κατά την αποφόρτιση, καθιστώντας τη λειτουργία του συστήματος χωρίς καύση φυσικού αερίου δυνατή. Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης των μονάδων αυτών αγγίζει το 70%.

Τα πλεονεκτήματα των CAES είναι ότι είναι ικανά να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, με πολύ καλό βαθμό απόδοσης, μικρούς χρόνους απόκρισης και πολύ οικονομικά. Τα αρνητικά τους στοιχεία είναι ότι προϋποθέτουν την ύπαρξη κατάλληλου υπόγειου, σφραγισμένου αεροστεγούς, γεωλογικού σχηματισμού, και ότι τεχνολογικά δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί πλήρως [7].

Compressed Air Energy Storage Concepts



Εικόνα 1.6 : Σχηματική απεικόνιση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα. Πηγή: [7]

1.3 Σύγκριση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας - Η ανάγκη για Μελέτη και Διερεύνηση των CAES

Αφού παρουσιάστηκαν οι έξι κυριότεροι τρόποι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύγκριση μεταξύ τους όσον αφορά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Για το λόγο αυτό παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας:

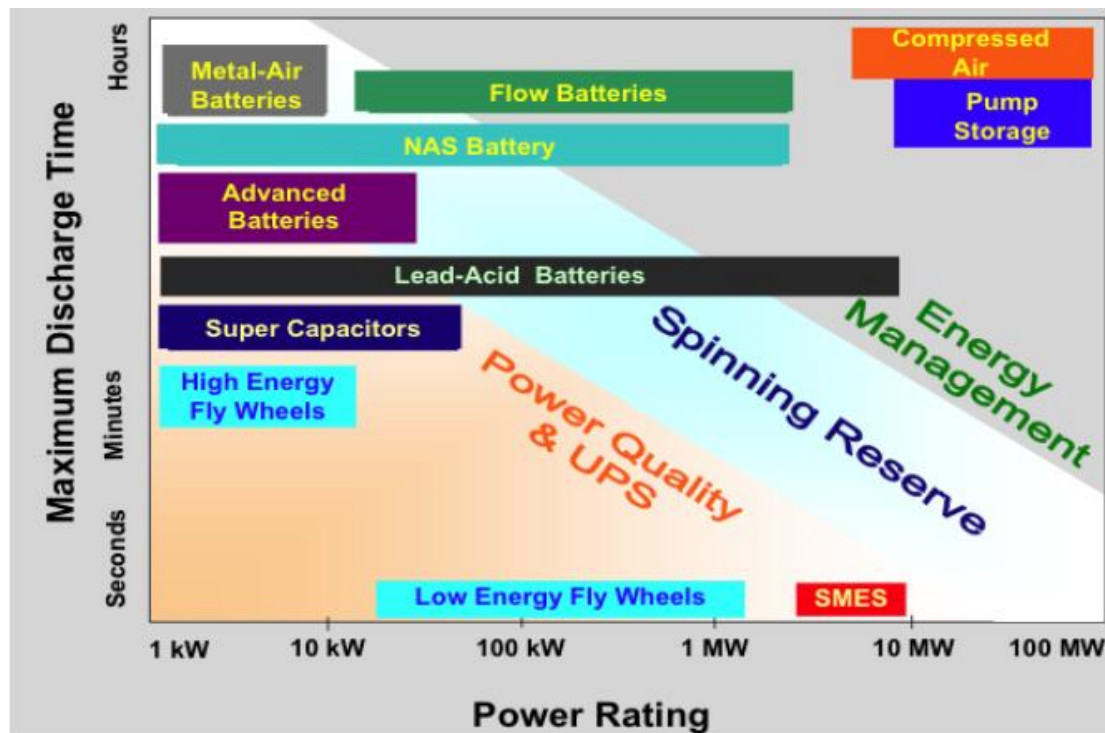
Χαρακτηριστικό	FESS	SMES	SCES	BESS	PHESS	CAES
Τυπικό εύρος ισχύος	Ranging in kw	1-100 MW	1-250kW	100kW-20MW	Up to 2.1 GW	25 - 350 MW
Ηλεκτρική απόδοση	90-95%	~95%	<95%	88-92%	75-80%	~70%
Διάρκεια ζωής	10-20 years	~30 years	10-20 years	3-6 years	~50years	<50 years
Χρόνος απόκρισης	~1-2 mins	Milliseco nds	Milliseco nds	Seconds	~1-2 mins	~1-2 mins
Διάρκεια εκφόρτισης	~mins	Seconds	Seconds	Hours	Days	Hours

Πίνακας 1.1 : Σύγκριση χαρ/κών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας Πηγή: [6]

Όπως φαίνεται, το κάθε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, που σημαίνει ότι η επιλογή ενός συστήματος από τα παραπάνω βασίζεται στην εκάστοτε εφαρμογή. Για παράδειγμα, εάν ζητούμενο είναι η ταχύτερη απόκριση του συστήματος, είναι σκόπιμο να επιλεγεί SMES ή SCES. Αντίστοιχα, εάν

στην ευρύτερη περιοχή υπάρχει κατάλληλο γεωλογικό σημείο για ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης και κατάλληλη παροχή νερού, ίσως να είναι αυτό το καταλληλότερο σύστημα, κ.ο.κ.

Το δεδομένο είναι ότι η αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας θα παραμείνει μια μεγάλη πρόκληση στα επόμενα χρόνια. Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης είναι προς το παρόν σχεδόν η μόνη εφαρμοζόμενη λύση στο πρόβλημα αυτό, αλλά οι αποθηκευτικές δυνατότητες των νέων δημιουργούμενων εγκαταστάσεων είναι περιορισμένες. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η στοχαστική και απρόβλεπτή τους φύση από την άλλη, επιτάσσουν την εγκατάσταση επιπλέον αποθηκευτικών διατάξεων μεγάλης κλίμακας. Χωρίς αυτές, η έξαρση της εγκατάστασης νέων μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα αναγκαστεί να σταματήσει, όπως ήδη έχει αρχίσει να γίνεται. Για παράδειγμα, σε περιόδους πλεονάζουσας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πολλά αιολικά πάρκα σταματούν την λειτουργία τους προκειμένου να αποφευχθούν blackouts [7]. Όλα τα παραπάνω, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι για πολλές χώρες δεν υπάρχουν κατάλληλα γεωλογικά μέρη για την εγκατάσταση συστημάτων αντλησιοταμίευσης [14], οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES) αποτελούν μια εξαιρετική επιλογή για μελέτη και διερεύνηση, καθώς είναι τα μόνο που μπορούν να συναγωνιστούν την ήδη ανεπτυγμένη τεχνολογία των υδροηλεκτρικών στον τομέα της μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης ενέργειας. Το τελευταίο αποδεικνύεται και από την παρακάτω εικόνα, όπου παρουσιάζονται τα εύρη ισχύος για κάθε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.



Εικόνα 1.7 : Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τυπικά εύρη ισχύος και εφαρμογές τους. Πηγή: [15]

1.4 Στόχος της Εργασίας

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα όσα έχουν λεχθεί μέχρι τώρα, όλα δείχνουν ότι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή συμπιεσμένου αέρα (CAES) θα απασχολήσουν πολύ την ενεργειακή βιομηχανία τα επόμενα χρόνια. Ήδη έχουν γίνει αρκετές έρευνες πάνω σε αυτά, αλλά η βιομηχανοποίηση της τεχνολογίας των CAES είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο.

Ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αλλά καμία μέχρι τώρα εγκατεστημένη τέτοια μονάδα σε βιομηχανική κλίμακα, παρουσιάζουν τα αδιαβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage - AA-CAES), τα οποία σε αντίθεση με τα συμβατικά, λειτουργούν χωρίς καύσιμο, επομένως και με μηδενική εκπομπή ρύπων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας ενός αδιαβατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα, και η μελέτη της συμπεριφοράς του καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του: κατά το στάδιο φόρτισής του, όσο αυτό παραμένει φορτισμένο αλλά αδρανές (idle mode), και κατά το στάδιο εκφόρτισής του. Στόχος επίσης είναι να μελετηθεί η ευαισθησία του μοντέλου μεταβάλλοντας συγκεκριμένες παραμέτρους, καθώς και να εξεταστεί το κατά πόσον θα ήταν συμφέρον να τοποθετηθούν και διατάξεις θαλάμων καύσης στο σύστημα, σε περίπτωση που υπάρχει ανάγκη για επιπλέον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (CAES)

2.1 Εισαγωγή

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (CAES) λειτουργεί αποθηκεύοντας ενέργεια υπό τη μορφή αέρα υψηλής πίεσης κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, και απελευθερώνοντας τον αποθηκευμένο συμπιεσμένο αέρα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να καλυφθούν οι αυξημένες ανάγκες σε περιόδους υψηλής ζήτησης ενέργειας.

Η πρώτη επιτυχημένη απόπειρα υλοποίησης ενός τέτοιου συστήματος αναφέρεται στα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Το 1949, ο S. Laval έλαβε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας χρησιμοποίησης αέρα για την αποθήκευση ενέργειας σε υπόγεια δεξαμενή, γεγονός που σηματοδότησε την έναρξη μίας νέας εποχής στην εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας [16]. Η τεχνολογία των CAES ερευνήθηκε εκτενώς την δεκαετία του 1970, καθώς θεωρούταν πολύ καλή λύση για να παρέχει επιπλέον ηλεκτρική ισχύ σε περιόδους υψηλής ζήτησης, και γιατί θα παρουσίαζε υψηλό βαθμό εκμεταλλευσιμότητας αποθηκεύοντας ενέργεια εκτός ωρών αιχμής, συνεργαζόμενη με ένα μεγάλο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας βασικού φορτίου (κυρίως πυρηνικής τεχνολογίας) [17]. Ωστόσο, μια σειρά γεγονότων οδήγησε στην καθυστέρηση της ανάπτυξης της τεχνολογίας των CAES κατά το τέλος της δεκαετίας του 1980. Τα γεγονότα αυτά ήταν η ύφεση της πυρηνικής τεχνολογίας, η ανάπτυξη οικονομικών και αποδοτικών απλών και συνδυασμένων κύκλων αεριοστροβίλων, η μείωση στην τιμή του φυσικού αερίου, και η κατασκευή πολλών νέων συμβατικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας [18], [19]. Παρόλα αυτά, η επιθυμία για υψηλότερη διείσδυση αιολικών και ηλιακών πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον για τα CAES ως μία μέθοδο για να εξισορροπηθεί η αστάθεια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και για να συμβάλλουν στην ελάττωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου [19].

Μπορούν να κατασκευαστούν από μικρής μέχρι μεγάλης κλίμακας CAES, για σύντομες αλλά και για μεγάλες διάρκειες αποθήκευσης της ενέργειας, με ικανοποιητικούς χρόνους απόκρισης και καλή συμπεριφορά σε μερικό φορτίο. Η εγκατάσταση CAES έγκειται στην υλοποίηση ενός συστήματος στο οποίο ενσωματώνονται διαφορετικές συνεργαζόμενες συνιστώσες, συσκευές και διεργασίες, όπως συμπιεστές, στρόβιλοι και ηλεκτρικές μηχανές. Το CAES είναι πολύ συχνά υβριδικό, δηλαδή συνδυάζεται με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας για να επιτευχθεί η επιθυμητή ενεργειακή χωρητικότητα, ενεργειακή πυκνότητα, χρόνος απόκρισης ή βαθμός απόδοσης. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός ενός CAES και ενός υπερπυκνωτή βελτιώνει την μεταβατική λειτουργία του συστήματος, ενώ ο συνδυασμός του με ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας οδηγεί σε αύξηση της απόδοσής του λόγω επαναχρησιμοποίησης της θερμότητας που παράγεται από την συμπίεση [20].

2.2 Στοιχεία Λειτουργίας CAES

2.2.1 Αρχές λειτουργίας CAES

Η αρχή λειτουργίας του CAES έχει ομοιότητες με αυτή των αεριοστροβίλων. Το κύριο χαρακτηριστικό των CAES είναι η καύση μίγματος καυσίμου και αέρα και η εκτόνωσή του σε στροβίλους για παραγωγή έργου, οδηγώντας σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η κύρια άτρακτος του συστήματος συνδέεται με όλες τις κύριες συνιστώσες, οι οποίες είναι οι συμπιεστές, μία ηλεκτρική μηχανή αναστρέψιμης, συνήθως, λειτουργίας (κινητήρας/γεννήτρια), και οι στροβίλοι, μέσω συμπλεκτών.

Η διαφορά στη διαδικασία λειτουργίας μιας συμβατικής εγκατάστασης CAES από μιας εγκατάστασης αεριοστροβίλου έγκειται στη διαφορά ότι στο CAES οι φάσεις της συμπίεσης και της εκτόνωσης διαχωρίζονται σε δύο ξεχωριστές φάσεις, που συμβαίνουν σε διαφορετικό χρόνο [20]. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα στο CAES να παράγει ηλεκτρική ισχύ από τη γεννήτρια, χωρίς η ισχύς να μειώνεται από τις ενεργειακές ανάγκες κίνησης του συμπιεστή ταυτόχρονα, όπως συμβαίνει στους κύκλους αεριοστροβίλων. Δεδομένου ότι η κίνηση του συμπιεστή απαιτεί περισσότερο από το 50% της παραγόμενης ισχύος από το στροβίλο σε μια εγκατάσταση αεριοστροβίλου, επόμενο είναι ότι από δύο παρόμοιας κλίμακας μονάδες CAES και αεριοστροβίλου, περισσότερη ισχύς θα παράγεται από το CAES.

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα μιας τυπικής μονάδας CAES μεγάλης κλίμακας. Αυτή απαρτίζεται από έξι κυρίως τμήματα:

i) Μία ηλεκτρική μηχανή αντιστρεπτής λειτουργίας (κινητήρας/γεννήτρια), συνδεδεμένη στην άτρακτο με μηχανισμούς σύμπλεξης, η οποία λειτουργεί ως ηλεκτρικός κινητήρας παρέχοντας μηχανική ισχύ για την κίνηση του συμπιεστή στη φάση της συμπίεσης, και ως γεννήτρια στη φάση της εκτόνωσης, μετατρέποντας τη μηχανική ισχύ της άτρακτου σε ηλεκτρική ενέργεια.

ii) Μία πολυβάθμια μονάδα συμπίεσης, με εναλλάκτες θερμότητας μετά από κάθε στάδιο συμπίεσης (συνήθως η ψύξη γίνεται με νερό), ώστε να μειώνεται το συνολικό έργο συμπίεσης και η διεργασία να γίνεται οικονομικότερη.

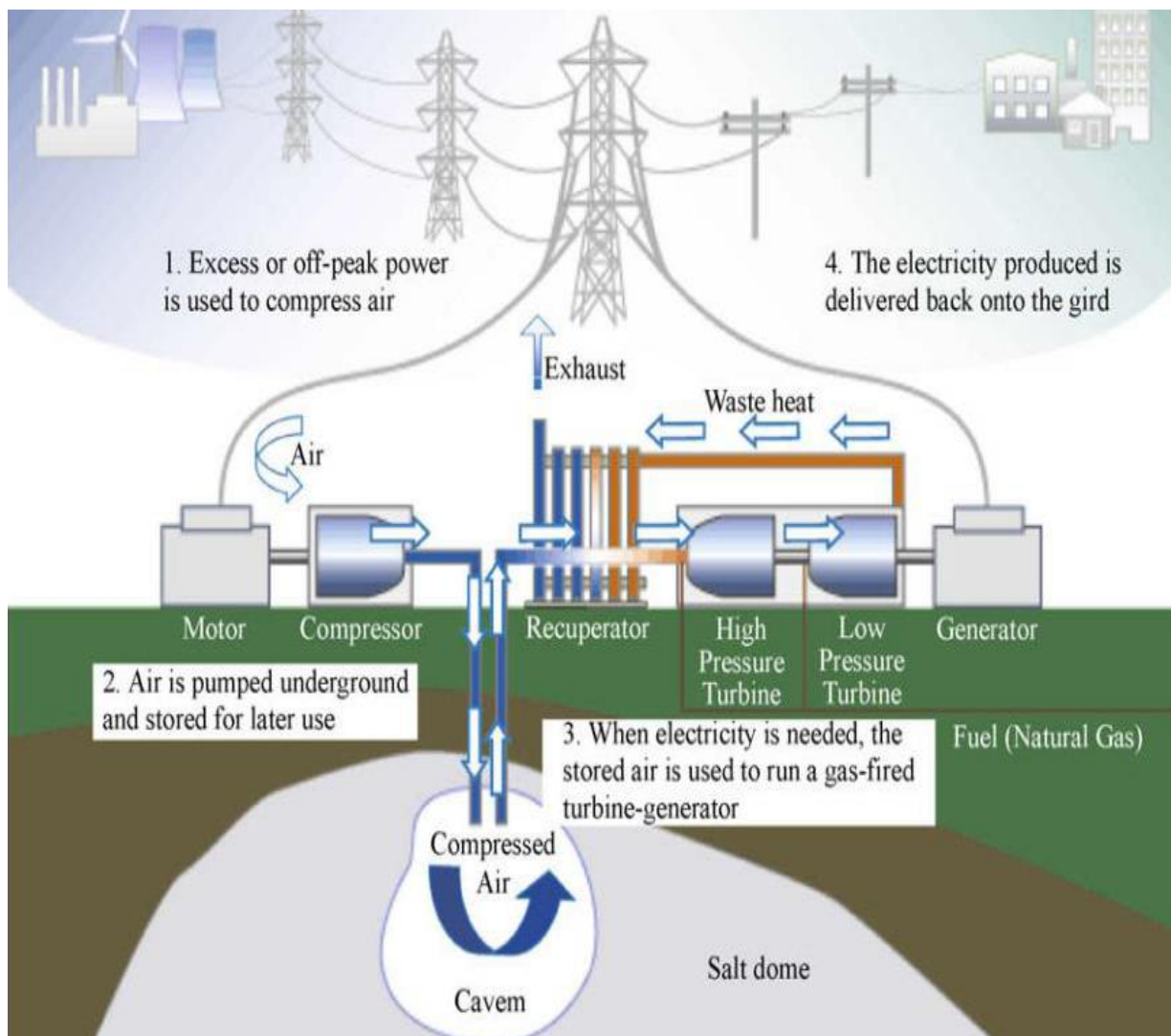
iii) Μία πολυβάθμια μονάδα εκτόνωσης, η οποία αποτελείται από στροβίλους υψηλής και χαμηλής πίεσης, η οποία εκτονώνει τον προθερμασμένο από τον θάλαμο καύσης αέρα, για την παραγωγή ισχύος.

iv) Μία ή και περισσότερες υπόγειες κοιλότητες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση μεγάλης ποσότητας συμπιεσμένου αέρα. Οι κοιλότητες αυτές δημιουργούνται με εκσκαφή σε περιβάλλον σκληρών πετρωμάτων, είτε με εξόρυξη με τη μέθοδο της εισαγωγής διαλύματος (solution mining) , εάν πρόκειται για σπήλαια αλατούχου ορίζοντα (salt caverns).

v) Ένα σύστημα μετασχηματισμού ηλεκτρικής ενέργειας (power conditioning system - PCS), για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις της ηλεκτρικής μηχανής ή του εξωτερικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

vi) Υπάρχουν και ορισμένα βοηθητικά συστήματα σε μία τυπική μονάδα CAES, όπως συστήματα ελέγχου, συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας, κλπ, όπως η

δεξαμενή του καυσίμου και οι προθερμαντήρες του αέρα πριν αυτός εισέλθει στον θάλαμο καύσης [20].



Εικόνα 2.1 : Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα. Πηγή: [20]

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ηλεκτρική μηχανή είναι συνδεδεμένη με τους συμπιεστές και τους στροβίλους μέσω μιας κοινής ατράκτου. Ο μηχανισμός σύμπλεξης είναι αυτός που καθορίζει την φάση λειτουργίας της μονάδας (συμπίεση/εκτόνωση).

Η διαδικασία της συμπίεσης μιας μονάδας CAES ενεργοποιείται όταν η ηλεκτροπαραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας διάταξης συμπίεστων, οι οποίοι συμπιέζουν ατμοσφαιρικό αέρα και στη συνέχεια αυτός οδηγείται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης (συνήθως μία υπόγεια κοιλότητα). Ο συμπιεσμένος αέρας βρίσκεται σε υψηλή πίεση (τυπικά 40-80bar), και αποθηκεύεται σε θερμοκρασία κοντά σε αυτήν των τοιχωμάτων της δεξαμενής. Στη διαδικασία της συμπίεσης συχνότατα παρεμβάλλονται εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι ψύχουν το συμπιεζόμενο αέρα ώστε να μειωθεί το έργο συμπίεσης [20], αλλά και για να

ελαχιστοποιηθεί η θερμική καταπόνηση των συμπιεστών [21], αλλά και των τοιχωμάτων της υπόγειας κοιλότητας [20]. Όταν η παραγωγή ενέργειας δεν μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση, ενεργοποιείται η διαδικασία της εκτόνωσης. Ο αποθηκευμένος αέρας υψηλής πίεσης απελευθερώνεται από τη δεξαμενή, θερμαίνεται, και στη συνέχεια εκτονώνεται στον στρόβιλο υψηλής πίεσης, ο οποίος μπορεί να είναι ατμοστρόβιλος είτε αεριοστρόβιλος [22]. Η διεργασία της καύσης του μίγματος συμπιεσμένου αέρα-καυσίμου (συνήθως φυσικού αερίου) αρχίζει στον θάλαμο καύσης του στροβίλου υψηλής πίεσης. Έπειτα, τα καυσαέρια στην έξοδο του στροβίλου υψηλής πίεσης αναμειγνύονται με επιπλέον καύσιμο και καίγονται στο θάλαμο καύσης του στροβίλου χαμηλής πίεσης. Οι δύο στρόβιλοι είναι προφανώς συνδεδεμένοι με την ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η απορριπτόμενη θερμότητα των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου χαμηλής πίεσης μπορεί να αξιοποιηθεί, πριν εξέλθει στην ατμόσφαιρα, για παράδειγμα μέσω ανάκτησης της σε έναν εναλλάκτη θερμότητας για την προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν αυτός εισέλθει στο θάλαμο καύσης. Επίσης, η παροχή μάζας αέρα από τη δεξαμενή προς το στρόβιλο πρέπει να είναι επαρκώς υψηλή, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις λειτουργίας του συστήματος [20]. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τυχόν φαινόμενα χαμηλής θερμοκρασίας αέρα που προκύπτουν από ατελή καύση ή απουσία καύσης στην εκτόνωση εμπεριέχουν υψηλό κίνδυνο για τα πτερύγια του στροβίλου [19], καθώς εάν ο αέρας δεν θερμαίνεται επαρκώς η υγρασία του ενδεχομένως να στερεοποιηθεί, σχηματίζοντας πάγο [17].

2.2.2 Πλεονεκτήματα συστήματος CAES

Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των «ανταγωνιστών» τους, δηλαδή των μονάδων αντλιοσταμίου, και των αεριοστρόβιλων. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η διάρκεια κατασκευής μονάδων αντλιοσταμίου αγγίζει τα δέκα χρόνια σε διάρκεια [23], ενώ οι μονάδες CAES κατασκευάζονται εντός τριών ετών περίπου. Οι χρόνοι εκκίνησης τους είναι παρόμοιοι, καθώς αναφέρεται ότι ο χρόνος που χρειάζεται μια μονάδα αντλιοσταμίου για να παράγει ισχύ στο μέγιστο φορτίο είναι έως 15 λεπτά, ενώ στις μονάδες CAES είναι 9-12 λεπτά, γεγονός που επιπλέον τις καθιστά 2-3 φορές ταχύτερες από αυτές των αεριοστρόβιλων. Επίσης, οι μονάδες CAES έχουν τον μεγαλύτερο δυνατό χρόνο αποθήκευσης της ενέργειας συγκριτικά με τους ανταγωνιστές τους λόγω των πολύ μικρών απωλειών ενέργειας στη δεξαμενή. Αναφέρεται ότι ένα σύστημα CAES μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια για πάνω από ένα χρόνο [3]. Τέλος, η περιβαλλοντική παρέμβαση για την κατασκευή ενός συστήματος CAES είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη για ένα σύστημα αντλιοσταμίου.

2.2.3 CAES μικρής κλίμακας

Συνήθως, η τυπική ονομαστική ισχύς μιας μονάδας CAES κυμαίνεται μεταξύ 50-300MW [3]. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια, μελετάται η κατασκευή τους και σε μικρότερη κλίμακα, από μερικά kW έως περίπου 10 MW. Με τη βοήθεια υβριδικής σύνδεσής τους με μια διάταξη υπερπυκνωτή για να μειωθεί ο χρόνος μεταβατικής λειτουργίας τους, τα CAES μικρής κλίμακας εμφανίστηκαν στην αγορά ως μια εναλλακτική των επαναφορτιζόμενων μπαταριών για διάφορες εφαρμογές. Σε μία εγκατάσταση CAES μικρής κλίμακας, ως αποθηκευτικός χώρος για τον αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπέργειοι κύλινδροι ή σωλήνες με τις επιθυμητές

διαστάσεις. Έτσι η πίεση αποθήκευσης μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, καθώς δεν υπάρχουν περιορισμοί λόγω ενδεχόμενης διαρροής από την φυσική υπόγεια κοιλότητα, ή ενδεχόμενης φθορά της. Ο αποθηκευμένος αέρας υψηλής πίεσης μπορεί να παρέχεται είτε από μια εγκατάσταση συμπιεστών εντός της μικρής μονάδας, είτε να μεταφέρεται στο σημείο της μονάδας με τη μορφή έτοιμων κυλινδρικών δοχείων αέρα υψηλής πίεσης μέσω της αλυσίδας παραγωγής συμπιεσμένου αέρα. Ο στρόβιλος εκτόνωσης του αέρα που θα κινήσει τη γεννήτρια για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια είναι ίσως η σημαντικότερη παράμετρος για τέτοιες εγκαταστάσεις, καθώς απαιτείται όσο το δυνατόν υψηλή απόδοση, γρήγορη απόκριση και χαμηλό κόστος συντήρησης [20].

2.2.4 Βαθμός απόδοσης CAES

Ο βαθμός απόδοσης ενός CAES μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους. Συνήθως αρχικά χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\eta_{CAES} = \frac{E_{elg}}{E_{elc} + Q_f} \quad (1)$$

Όπου E_{elg} και E_{elc} είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το στρόβιλο και καταναλώνεται από το συμπιεστή αντίστοιχα, και Q_f η χημική ενέργεια του καυσίμου.

Η χρησιμοποίηση ποσοτήτων ενέργειας και όχι ισχύος στον ορισμό του βαθμού απόδοσης είναι αναγκαία για την ανάλυση της ενεργειακής μετατροπής στο CAES, για το λόγο ότι η κατανάλωση και η παραγωγή ενέργειας στο σύστημα αυτό γίνεται σε διαφορετικούς χρόνους. Οι μεταβλητές της διεργασίας, όπως για παράδειγμα η ισχύς του στρόβιλου, που εξαρτάται από την πίεση στη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα (εάν είναι μεταβλητή), δεν είναι σταθερές χρονικά. Οι συνθήκες εντός της δεξαμενής και ο τρόπος διαχείρισης των διεργασιών συμπίεσης και εκτόνωσης επηρεάζουν το χρόνο και τις μεταβλητές φόρτισης και εκφόρτισης της δεξαμενής. Για τον προσδιορισμό των μεταβλητών αυτών αναγκαία είναι η κατασκευή ενός δυναμικού μοντέλου της εγκατάστασης.

Η χρησιμοποίηση της σχέσης (1) για το βαθμό απόδοσης δεν είναι πάντα βολική. Στον παρονομαστή αθροίζονται δύο διαφορετικές μορφές ενέργειας, η καταναλισκόμενη από το δίκτυο ηλεκτρική, και η χημική ενέργεια του καυσίμου. Από αυτή την άποψη, ίσως θα ήταν σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί μια εξίσωση που λαμβάνει υπόψη την απόδοση της ηλεκτρικής παραγωγής για την ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής:

$$\eta_{CAES} = \frac{E_{elg}}{\frac{E_{elc}}{\eta_{elR} \cdot \eta_{tr}} + Q_f} \quad (2)$$

Όπου η_{elR} είναι ο βαθμός απόδοσης μιας τυπικής μονάδας αναφοράς παραγωγής ενέργειας και η_{tr} ο βαθμός απόδοσης της μεταβίβασης της ηλεκτρικής ενέργειας αυτής στο CAES. Αυτή η μέθοδος αποτελεί μια απόπειρα να ληφθεί υπόψη το σύνολο της ενέργειας προερχόμενης από ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας του CAES [24]. Για τις μονάδες CAES που

χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό προερχόμενο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την συμπίεση, προφανώς ισχύει $\eta_{elR} = 1$.

Ένας άλλος ορισμός του βαθμού απόδοσης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η πρόσθεση δύο διαφορετικών μορφών ενέργειας (ηλεκτρική και χημική), είναι:

$$\eta_{CAES} = \frac{E_{elg} - E_{elc}}{Q_f} \quad (3)$$

Όπου το CAES λογίζεται ως διεργασία ηλεκτροπαραγωγής βασισμένη στην ποσότητα καιόμενου καυσίμου. Η παραπάνω μορφή του βαθμού απόδοσης περιγράφει την αποδοτικότητα της καύσης του καυσίμου στην παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ισχύος της μονάδας. Πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι η εξίσωση (3) οδηγεί σε αρνητικό αποτέλεσμα εάν $E_{elg} > E_{elc}$ ή να απειρίζεται για $Q_f = 0$ [24].

2.3 Κύριες Συνιστώσες συστήματος CAES

2.3.1 Δεξαμενή αποθήκευσης αέρα

Από τα σημαντικότερα μέρη μιας εγκατάστασης CAES είναι η δεξαμενή αποθήκευσης του αέρα. Συνήθως, ο αέρας αποθηκεύεται σε μια μεγάλη υπόγεια κοιλότητα, η οποία μπορεί να είναι πολλών μορφών. Οι καταλληλότερες μορφές είναι τα σπήλαια αλατούχου ορίζοντα (salt caverns), των οποίων η εξόρυξη γίνεται από τη διάλυση του άλατος με την εισαγωγή υδατικού διαλύματος (solution mining), τα σπήλαια με σκληρά πετρώματα (hard rock), και τα σπήλαια πορωδών πετρωμάτων (porous rock) [19], [25], [26]. Υπόγειοι πρώην ταμειυτήρες φυσικού αερίου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση του αέρα. Η καταλληλότητα των παραπάνω υπόγειων χώρων αποθήκευσης αποδίδεται στην παρουσία γεωστατικής πίεσης, η οποία διευκολύνει τη συγκράτηση της αέριας μάζας. Ο όγκος των συγκεκριμένων δεξαμενών κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 300.000-600.000m³ και η αποθήκευση του αέρα κατά κανόνα γίνεται σε πιέσεις μεταξύ 40-70bar [27].

Ανάλογα με τη γεωλογική διαμόρφωση της περιοχής, ο τρόπος λειτουργίας της δεξαμενής αποθήκευσης αέρα ενός CAES μεγάλης κλίμακας μπορεί να είναι ο ένας από τους εξής δύο:

α) Δεξαμενές σταθερού όγκου

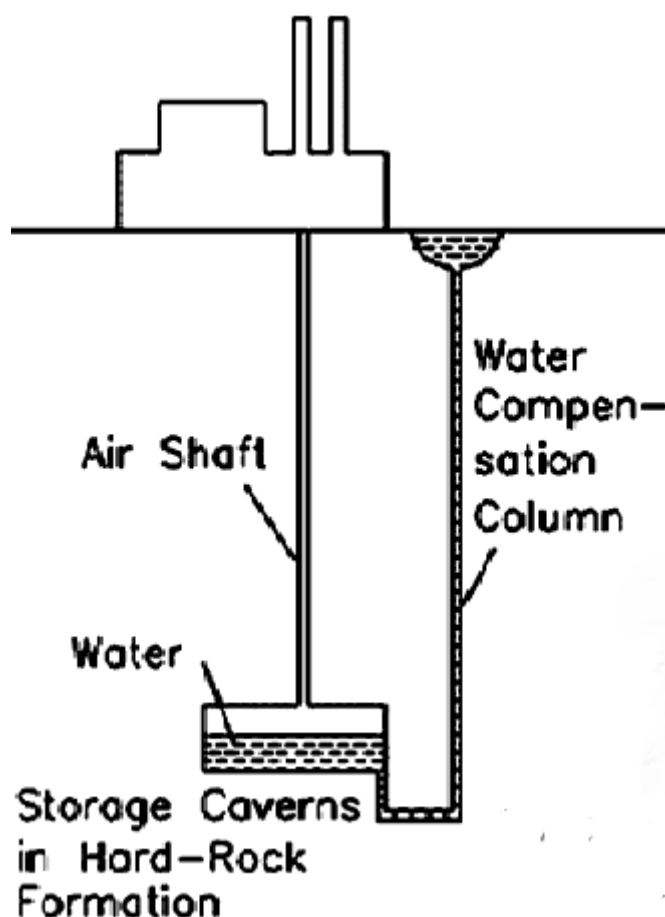
Στις υπόγειες δεξαμενές αυτές, ο αέρας αποθηκεύεται μεταξύ ενός συγκεκριμένου εύρους πιέσεων. Το άνω όριο πίεσης καθορίζεται από τις γεωλογικές συνθήκες, κυρίως με γνώμονα την εξασφάλιση της αεροστεγούς λειτουργίας της κοιλότητας (που καθορίζεται από τις επιτρεπόμενες απώλειες αέρα) κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μονάδας. Το κάτω όριο πίεσης καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων του CAES που τροφοδοτούνται με αέρα από τη δεξαμενή (κυρίως του στροβίλου υψηλής πίεσης). Ο όγκος της δεξαμενής και οι δύο παραπάνω χαρακτηριστικές πιέσεις καθορίζουν την ενεργειακή αποθηκευτική ικανότητα της μονάδας [24].

Το χαρακτηριστικό αυτών των δεξαμενών είναι ότι εφόσον ο όγκος είναι σταθερός και το σύστημα εκφορτίζεται μεταβαίνοντας από την υψηλότερη

επιτρεπόμενη πίεση έως τη χαμηλότερη επιτρεπόμενη (πλήρης εκφόρτιση), η πίεση εξόδου του αέρα από τη δεξαμενή, επομένως και η πίεση εισόδου του αέρα στους στροβίλους είναι μεταβαλλόμενη χρονικά κατά την εκτόνωση. Υπάρχουν δύο σχεδιαστικές επιλογές για τη λειτουργία των CAES: είτε να υπάρχει κατάλληλο σύστημα το οποίο να επιτρέπει η πίεση εισόδου του στροβίλου να είναι μεταβλητή, ακολουθώντας τη μεταβολή της πίεσης εξόδου του αέρα από τη δεξαμενή, είτε η πίεση εισόδου στο στρόβιλο να διατηρείται σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια της εκτόνωσης, μέσω στραγγαλισμού του ρεύματος εξόδου του αέρα από τη δεξαμενή, σε μία στραγγαλιστική βαλβίδα. Και οι δύο εγκατεστημένες μονάδες CAES χρησιμοποιούν την τελευταία μέθοδο.

β) Δεξαμενές σταθερής πίεσης

Θα ήταν δυνατό να κρατηθεί η πίεση της δεξαμενής αποθήκευσης του αέρα σταθερή, χρησιμοποιώντας μια υπόγεια στήλη νερού κατάλληλου βάθους που καταλήγει στον πυθμένα στη κοιλότητα, μέσω της συμπλήρωσης του απαιτούμενου νερού από μια υπέργεια δεξαμενή νερού κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης. Η προοπτική αυτή είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και δεν εφαρμόζεται ακόμα σε εγκατεστημένα CAES. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια τέτοια δεξαμενή σταθερής πίεσης.



Εικόνα 2.2 : Εγκατάσταση CAES με δεξαμενή αποθήκευσης σταθερής πίεσης. Πηγή: [28]

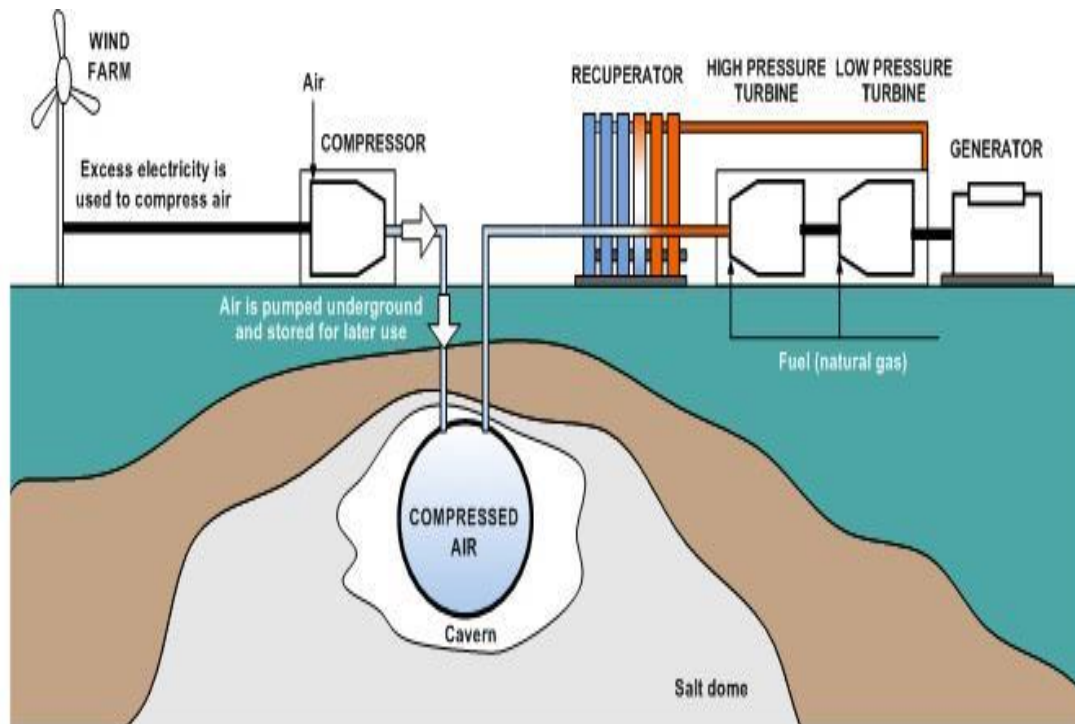
Υπολογίζεται ότι πολλές περιοχές ανά την υφήλιο έχουν τις κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες για τη δημιουργία σπηλαίων ως αποθηκευτικών χώρων για ένα CAES. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι πάνω από το 75% της έκτασης των Η.Π.Α. πληροί τουλάχιστον μία από τις τρεις κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες (υπέδαφος αλατούχου ορίζοντα, σκληρών πετρωμάτων, ή πορωδών πετρωμάτων) [25]. Βέβαια, για την επιβεβαίωση της καταλληλότητας μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας για την κατασκευή δεξαμενής αέρα για ένα CAES είναι απαραίτητο να διενεργηθούν λεπτομερείς μελέτες και έλεγχοι.

Παρακάτω, γίνεται αναφορά στις τρεις κύριες γεωλογικές δομές κατάλληλες για αποθήκευση του αέρα ενός CAES, και παράθεση των κυριότερων χαρακτηριστικών τους:

i) Σπήλαια αλατούχου ορίζοντα (salt caverns)

Οι υπόγειοι σχηματισμοί άλατος στο υπέδαφος (salt domes) είναι η καταλληλότερη γεωλογική δομή για δημιουργία υπόγειων σπηλαίων με τη μέθοδο της εισαγωγής διαλύματος νερού υπό πίεση (solution mining). Οι κοιλότητες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποθήκες αέρα σε ένα σύστημα CAES. Η τεχνολογία που υπάρχει από την αποθήκευση υδρογονανθράκων υπό υψηλή πίεση, όπως υγραέριο και φυσικό αέριο, μπορεί εύκολα να αξιοποιηθεί για το σκοπό αυτό. Τα δύο υπάρχοντα εργοστάσια CAES που είναι σε λειτουργία (το Huntorf στη Γερμανία και το McIntosh στις Η.Π.Α.) χρησιμοποιούν τέτοιου είδους κοιλότητες για την αποθήκευση του αέρα.

Σπήλαια αλατούχου ορίζοντα για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα κατασκευάζονται όπως αναφέρθηκε, με εισαγωγή διαλύματος υπό πίεση σε υπόγειους σχηματισμούς άλατος. Η τεχνική αυτή είναι αξιόπιστη και οικονομική. Το κόστος κατασκευής μιας τέτοιας δεξαμενής ανέρχεται σε περίπου 2-10\$/kWh [29]. Η τεχνική εισαγωγής διαλύματος χρησιμοποιεί νερό ή άλλα υγρά υπό πίεση για να διαλυθεί και να εξορυχτεί το άλας, σχηματίζοντας μια μεγάλη κοιλότητα με το κατάλληλο μέγεθος και σχήμα. Η ελαστοπλαστική ιδιότητα του άλατος συντελεί στο να διατηρούν τα τοιχώματα της κοιλότητας τη συμπαγή δομή τους, ακόμα και μετά από πολλούς διαδοχικούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Επομένως, τα σπήλαια αυτά αποτελούν μια πολύ καλή επιλογή χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητά τους μακροχρόνια, διατηρώντας παράλληλα το επιθυμητό επίπεδο αεροστεγούς συμπεριφοράς [30], [31]. Υπάρχουν δύο είδη υπόγειων σχηματισμών αλάτων: οι θόλοι άλατος (salt domes) και οι κλίνες άλατος (salt beds). Οι θόλοι άλατος ταιριάζουν περισσότερο στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη κοιλοτήτων με μεγάλο όγκο για αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι υπάρχουν προοπτικές για δημιουργία τέτοιων κοιλοτήτων στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. [20].



Εικόνα 2.3 : Εγκατάσταση CAES με αποθήκευση αέρα σε σπήλαιο αλατούχου ορίζοντα.
Πηγή: [32]

ii) Σπήλαια σε περιβάλλον σκληρών πετρωμάτων (hard rock)

Τα σπήλαια σκληρών πετρωμάτων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως δεξαμενές μονάδων CAES. Το κόστος εκσκαφής μιας νέας τέτοιας αποθήκης βέβαια είναι σχετικά υψηλό, περίπου 30\$/kWh [22], πολύ υψηλότερο από την εκσκαφή σπηλαίου αλατούχου ορίζοντα. Το διαθέσιμο βάθος δεξαμενών αέρα σκληρών πετρωμάτων κυμαίνεται ανάμεσα σε 300 και 1500 μέτρα υπογείως. Ορισμένα προτεινόμενα σχέδια εγκατάστασης CAES εξετάζουν την χρησιμοποίηση ήδη υπάρχοντων ορυχείων, γεγονός που μειώνει το κόστος κατασκευής δεξαμενής. Συγκεκριμένα, το Norton energy storage project σκοπεύει να χρησιμοποιήσει μια υπόγεια δεξαμενή που παλαιότερα λειτουργούσε ως ορυχείο ασβεστόλιθου στο Ohio [33]. Μελέτες για ένα CAES ισχύος 2MW έγιναν και σε ένα πρώην ορυχείο άνθρακα στην πόλη Sunagaawa της Ιαπωνίας [29]. Ένα άλλο δοκιμαστικό πρόγραμμα από το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (EPRI) και μια δημόσια υπηρεσία από το Λουξεμβούργο εξέτασε τη χρησιμοποίηση ως δεξαμενής αέρα ενός ήδη εκσκαμμένου σπηλαίου σκληρών πετρωμάτων με αναπλήρωση νερού, στο οποίο είχαν γίνει παλαιότερα πειράματα για το κατά πόσο θα μπορούσε να αποτελέσει αποθήκη συμπιεσμένου αέρα σε CAES. Από τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι παρόλο που τα σπήλαια σκληρών πετρωμάτων μπορούν να αποτελέσουν δεξαμενές για ένα σύστημα CAES, υπάρχουν περιορισμοί εξ αιτίας του σχετικά υψηλού κεφαλαίου που χρειάζεται για την κατασκευή τους και του ότι ο αριθμός ήδη έτοιμων καταλλήλων σπηλαίων σκληρών πετρωμάτων είναι πολύ περιορισμένος [20].

iii) Σπήλαια πορωδών πετρωμάτων

Τα σπήλαια πορωδών πετρωμάτων είναι μια ακόμα επιλογή για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα υπογείως σε μεγάλους όγκους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης πορωδών δεξαμενών είναι το ότι το κόστος κατασκευής τους είναι πολύ μικρό. Το εκτιμώμενο κόστος κατασκευής μια τέτοιας δεξαμενής είναι περίπου 0.10-0.11\$/kWh [29].

Αρκετές μελέτες για την καταλληλότητα των πορωδών πετρωμάτων ως αποθήκες συμπιεσμένου αέρα έχουν διενεργηθεί. Η μεγαλύτερη ενεργειακή εταιρία της Ιταλίας, η Enel έστησε μια τέτοια πειραματική διάταξη CAES ισχύος 25MW στην πόλη Sesta, χρησιμοποιώντας δεξαμενή αποθήκευσης πορωδών πετρωμάτων, η οποία προηγουμένως χρησιμοποιούταν για την αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα κοντά σε μια γεωθερμική περιοχή [29]. Παρόλο που οι αρχικές δοκιμές κυκλικής φόρτισης συμπιεσμένου αέρα ήταν επιτυχείς, περαιτέρω δοκιμές διακόπηκαν λόγω ενός γεωθερμικού συμβάντος. Η σύμπραξη των φορέων Strata Power, EPRI, Nicor και DOE, είχαν διεξάγει επίσης δοκιμές σε κοιλάτη ψαμμίτη στο Pittsfield, Illinois ώστε να καθοριστεί κατά πόσο τα πορώδη πετρώματα είναι κατάλληλα για την αποθήκευση αέρα υπό πίεση. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι ο αέρας μπορεί να αποθηκευτεί επιτυχώς στην κοιλότητα ψαμμίτη στο St. Peter, κάτω από το σημείο δοκιμών. Ωστόσο, η διάρκεια ασφαλούς αποθήκευσης του αέρα ήταν περιορισμένη, καθώς αυτός αντιδρά με τον πυρίτη στην κοιλότητα ψαμμίτη. Τέλος, το έργο Iowa Stored Energy Park προοριζόταν να χρησιμοποιεί υδροφόρους ορίζοντες πορώδους ψαμμίτη στην Iowa για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα. Δυστυχώς όμως, το έργο διακόπηκε το 2011, και ο κύριος λόγος για τον τερματισμό του ήταν η έλλειψη γεωλογικών σχηματισμών που θα επέτρεπαν τον συμπιεσμένο αέρα να ρέει αποδοτικά για να καλύψει τις προδιαγραφές της εξεταζόμενης εγκατάστασης CAES [20].

Συμπερασματικά, παρόλο που υπάρχει προοπτική στη χρησιμοποίηση σχηματισμών πορωδών πετρωμάτων ως δεξαμενές αέρα σε ένα CAES, και μάλιστα με πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής, χρειάζεται περαιτέρω ειδική έρευνα στα γεωλογικά χαρακτηριστικά των πορωδών πετρωμάτων στα υποψήφια μέρη προκειμένου να καθοριστεί το κατά πόσο η υλοποίηση της δεξαμενής είναι δυνατή.

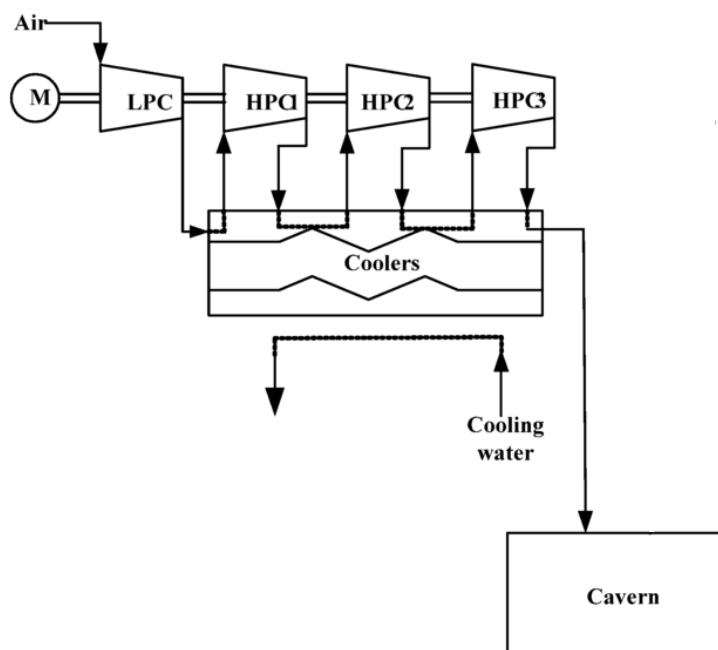
2.3.2 Συμπιεστές

Οι συμπιεστές σε ένα CAES αναλαμβάνουν τη διεργασία της συμπίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα σε υψηλή πίεση, χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια από την πηγή ενέργειας του CAES, κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης ενέργειας. Ένα χαρακτηριστικό της συμπίεσης είναι ότι ο αέρας θερμαίνεται πολύ έντονα όταν συμπιέζεται σε τόσο μεγάλη πίεση (περίπου 70bar). Έτσι, η συμπίεση γίνεται σε πολλά στάδια, ώστε να παρεμβάλλονται εναλλάκτες θερμότητας ανάμεσα στους συμπιεστές (συνήθως υδρόψυκτοι), προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία λειτουργίας του περίπου στους 175°C, και η τελική θερμοκρασία αποθήκευσής του στη δεξαμενή αέρα στους 50 °C περίπου [34]. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχουν θερμοκρασιακοί περιορισμοί για λόγους ευστάθειας της κοιλότητας αποθήκευσης του αέρα [1], αλλά και για τη μείωση του έργου συμπίεσης.

Οι συμπιεστές των εγκαταστάσεων CAES ομοιάζουν με αυτούς που χρησιμοποιούνται σε συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (αξονικοί συμπιεστές), οι οποίοι πολλές φορές συνεργάζονται με μηχανές που έχουν δοκιμαστεί

μακροχρόνια σε άλλους κλάδους της βιομηχανίας (ακτινικοί συμπιεστές υψηλής πίεσης) [24]. Για μονάδες CAES μικρής κλίμακας θεωρείται ότι είναι καταλληλότεροι συμπιεστές θετικής μετατόπισης (π.χ. παλινδρομικοί συμπιεστές), καθώς είναι ικανοί να χειρίζονται μικρή ποσότητα ροής αέρα αποδοτικά, με υψηλό λόγο πίεσης.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά η φάση της συμπίεσης του αέρα σε μια μονάδα CAES μεγάλης κλίμακας, όπου η συμπίεση γίνεται σε τέσσερα στάδια:



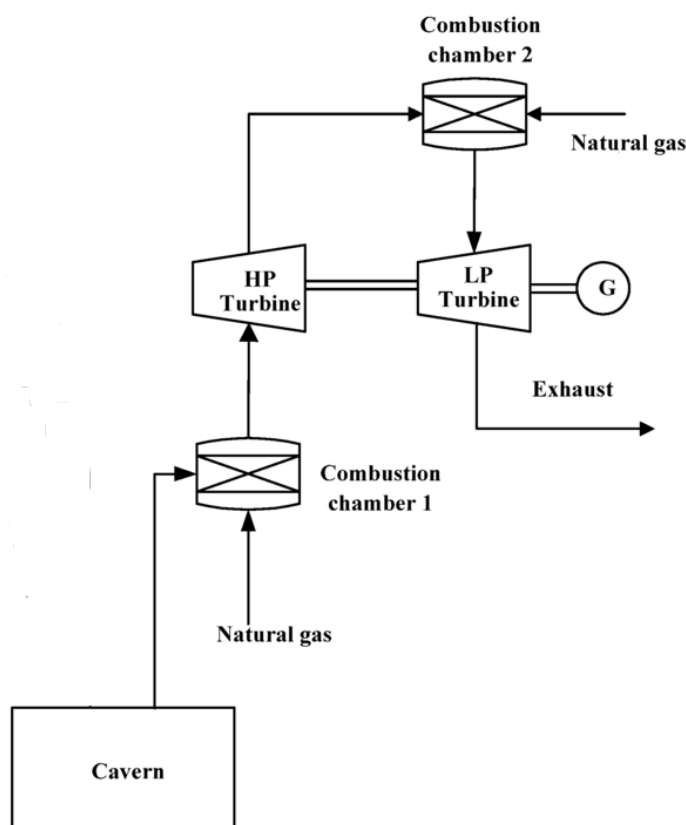
Εικόνα 2.4 : Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας συμπίεσης τυπικού CAES. Πηγή: [35]

2.3.3 Στρόβιλοι

Ρόλος των στρόβιλων σε ένα CAES είναι η εκτόνωση του συμπιεσμένου αέρα της δεξαμενής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκτόνωση, όπως και η συμπίεση, γίνεται σε πολλά στάδια (συνήθως σε δύο), και ο αέρας θερμαίνεται πριν εισαχθεί στο στρόβιλο για εκτόνωση μέσω της καύσης του με φυσικό αέριο στον θάλαμο καύσης. Η καύση στα συμβατικά CAES είναι απαραίτητη καθώς εάν ο αέρας εισαγόταν με τη χαμηλή θερμοκρασία (περίπου 50°C) που έχει στη δεξαμενή στην είσοδο του στρόβιλου, εκτός από το γεγονός ότι η παραγόμενη ισχύς θα ήταν πολύ μικρότερη, η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το στρόβιλο θα ήταν πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό θα οδηγούσε σε καταστροφή του στρόβιλου από τις χαμηλές θερμοκρασίες και τον πάγο που θα σχηματιζόταν λόγω της υγρασίας του αέρα. Ο αέρας που εισάγεται στο στρόβιλο μπορεί να προθερμανθεί πριν εισαχθεί στο θάλαμο καύσης, σε έναν εναλλάκτη, μέσω της ανάκτησης μέρους της θερμότητας από το ρεύμα των καυσαερίων στην έξοδό τους από τους στρόβιλους [24]. Η προθέρμανση του αέρα έχει τη δυνατότητα να αυξήσει το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης μέχρι και 10% [27]. Το μειονέκτημα βέβαια είναι ότι ο εναλλάκτης είναι ογκώδης και βαρύς, που συνεπάγεται και μεγάλη επιβάρυνση κεφαλαίου για την απόκτησή του. Επίσης, αυξάνει το χρόνο μεταβατικής λειτουργίας της εγκατάστασης.

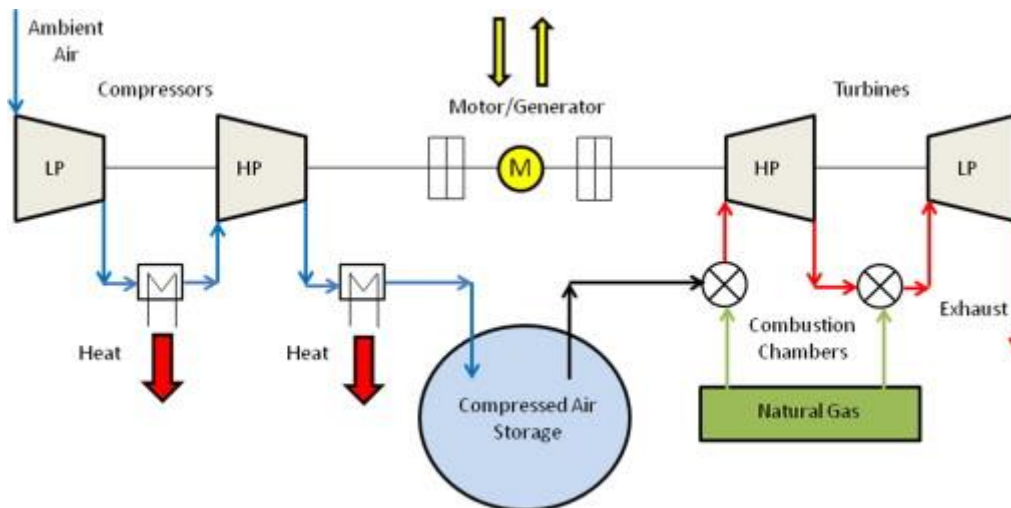
Για την εκτόνωση του αποθηκευμένου συμπιεσμένου αέρα σε ένα σύστημα CAES μπορούν να χρησιμοποιηθούν αεριοστροβίλοι, αλλά και ατμοστροβίλοι. Οι ατμοστροβίλοι έχουν μεγαλύτερους χρόνους εκκίνησης, αλλά μπορούν να χειριστούν ευκολότερα μεγάλες ροές μάζας αέρα. Επίσης, η ενεργειακή στάθμη του αέρα στην είσοδο του στροβίλου υψηλής πίεσης είναι πολύ υψηλή (τυπικά 45bar και 550°C), κατάσταση που μπορεί να διαχειριστεί καλύτερα ένας ατμοστροβίλος. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η καλύτερη επιλογή για το τμήμα της εκτόνωσης είναι η χρήση ατμοστροβίλου ως εκτονωτή υψηλής πίεσης και αεριοστροβίλου στη συνέχεια ως εκτονωτή χαμηλής πίεσης.

Σχηματικά, η διάταξη της εκτόνωσης σε ένα CAES δίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.5 : Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας εκτόνωσης τυπικού CAES, Πηγή: [35]

Τέλος, η όλη διαδικασία λειτουργίας ενός συμβατικού CAES με την καύση φυσικού αερίου συνοψίζεται στην παρακάτω εικόνα:



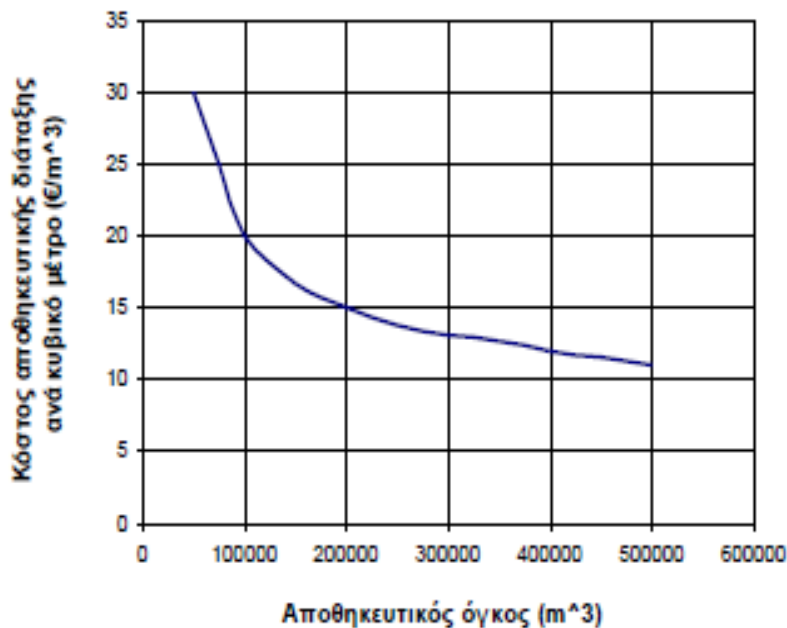
Εικόνα 2.6 : Σχηματική απεικόνιση κύκλου λειτουργίας CAES. Πηγή: [36]

2.4 Σύντομη Οικονομική Ανάλυση Μονάδων CAES

Η οικονομική μελέτη μιας τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας είναι πολύ σημαντική, και η αλήθεια είναι πως υπάρχει πρόοδος στις οικονομικές αναλύσεις των CAES χρόνο με το χρόνο. Το κόστος των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας αλλάζει με τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας, και η τάση είναι το κόστος να μειώνεται όσο η τεχνολογία προοδεύει. Μια ολοκληρωμένη οικονομική ανάλυση ενός συστήματος CAES πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το αρχικό κεφάλαιο που χρειάζεται για την εγκατάσταση της μονάδας, αλλά και τα λειτουργικά κόστη της, όπως και το χρόνο ζωής των συνιστωσών της. Παρακάτω δίνονται κάποια σύντομα στοιχεία του κόστους των μονάδων CAES.

Ενεργειακό κόστος κεφαλαίου (energy capital cost) και κόστος κεφαλαίου ισχύος (power capital cost): Τα αρχικά επενδυτικά κεφάλαια ενεργειακών εγκαταστάσεων συνήθως εκφράζονται σε δολάρια ανά κιλοβατώρα (\$/kWh) για το ενεργειακό κόστος κεφαλαίου και σε δολάρια ανά κιλοβάτ (\$/kW) για το κόστος κεφαλαίου ισχύος. Το αρχικό κόστος επένδυσης περιλαμβάνει το σχεδιασμό, τις προδιαγραφές, τα έργα πολιτικού μηχανικού και την εγκατάσταση [37]. Συγκεκριμένα για το CAES, η βιβλιογραφία αναφέρει για το κόστος κεφαλαίου ανά κιλοβάτ: 1300-1550 \$/kW (μικρής κλίμακας CAES), 400-1000 \$/kW (μεγάλης κλίμακας CAES). Για τα ενεργειακά κόστη κεφαλαίου αναφέρεται: 200-250 \$/kWh (μικρής κλίμακας CAES) και έως 120 \$/kWh (μεγάλης κλίμακας CAES) [38].

Από τα παραπάνω δεδομένα παρατηρείται ότι το κόστος αλλάζει ανάλογα με την κλίμακα της μονάδας. Από τις εξελιγμένες, προς το παρόν, τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, η αντλησιοταμίευση και το CAES έχουν σχετικά χαμηλό ενεργειακό κόστος κεφαλαίου σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι για τα CAES με υπόγεια δεξαμενή αέρα, περίπου το 50-60% του κόστους κατασκευής και εγκατάστασής τους θα ξοδευτεί στην κατασκευή της υπόγειας δεξαμενής και, ανάλογα με τη γεωλογία του επιλεγμένου μέρους, το κόστος κατασκευής της μπορεί να είναι διαφορετικό από μέρος σε μέρος [20]. Ειδικότερα, για τη χρήση σπηλαίων αλατούχου ορίζοντα ως αποθηκευτική διάταξη, το κόστος κατασκευής της ανά κυβικό μέτρο χωρητικότητας συναρτίζεται του αποθηκευτικού όγκου σε κυβικά μέτρα απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.7 : Διάγραμμα κόστους κατασκευής ανά κυβικό μέτρο δεξαμενής αέρα σε υπέδαφος αλατούχου οριζόντα συναρτήσεως του συνολικού αποθηκευτικού όγκου [m³]
 Πηγή: [27]

Εν τέλει, το κόστος ενός CAES μπορεί να διαφέρει από τα παραπάνω δεδομένα, καθώς εξαρτάται και από το πότε προγραμματίζεται να γίνει η κατασκευή του, την τοποθεσία του, και το μέγεθός του [20].

Λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης: Είναι το κόστος σε δολάρια ανά κιλοβάτ (\$/kW) για την περιοδική επιθεώρηση, τον ανεφοδιασμό σε καύσιμο, τη συντήρηση (π.χ. αναπλήρωση λιπαντικού ελαίου), την αντικατάσταση μηχανημάτων (όπως ρουλεμάν), την αντικατάσταση ηλεκτρικών μερών του συστήματος (π.χ. καλώδια και ασφάλειες), τον καθαρισμό του εάν χρειάζεται, κλπ. Το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης υπολογίζεται για τα CAES στα 19-25 \$/kW κάθε χρόνο.

2.5 Υπάρχουσες Εγκαταστάσεις CAES

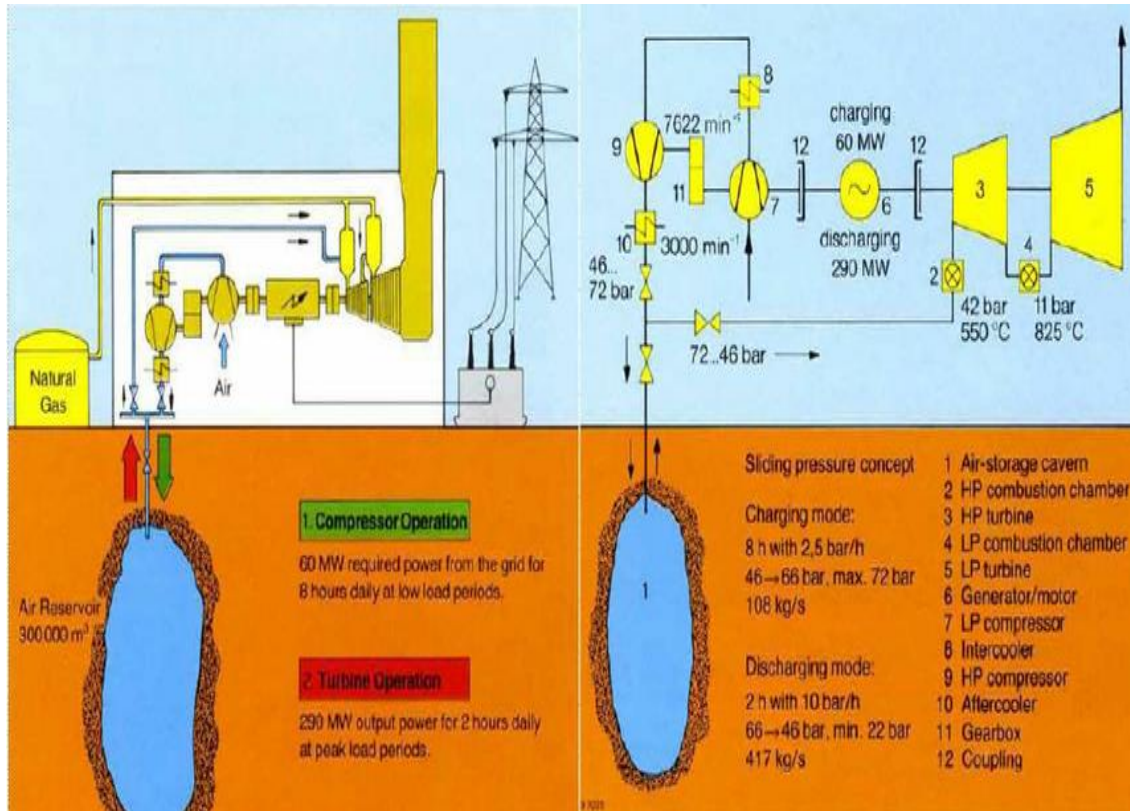
Αυτή τη στιγμή, παρόλο που έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες, πειράματα, αλλά και ημιτελή έργα όσον αφορά την τεχνολογία των CAES, υπάρχουν μόνο δύο εγκαταστάσεις CAES εν λειτουργία, μία στο Huntorf της Γερμανίας, και μία στο McIntosh στην Alabama των Ηνωμένων Πολιτειών. Σχεδόν όλες οι απόπειρες εγκατάστασης μιας νέας μονάδας CAES βασίζονται σε στοιχεία από αυτές τις δύο μονάδες. Παρακάτω περιγράφονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των δύο αυτών μονάδων CAES, αλλά και από 2 ημιτελή έργα, ένα στην Iowa και ένα στο Norton των Η.Π.Α.

2.5.1 Η μονάδα CAES του Huntorf

Η μονάδα CAES του Huntorf, η οποία είναι και η πρώτη βιομηχανοποιημένη εφαρμογή της τεχνολογίας CAES παγκοσμίως, εγκαινιάστηκε στην Γερμανία το 1978. Οι σχετικές μελέτες ξεκίνησαν το 1975, και η κατασκευή της εγκατάστασης ολοκληρώθηκε τρία χρόνια αργότερα [27]. Ο προϋπολογισμός υπολογίστηκε στα 92 εκατομμύρια γερμανικά μάρκα. Η μονάδα σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιηθεί ως βοηθητική μονάδα εκκίνησης για πυρηνικές μονάδες κοντά στη Βόρεια θάλασσα, και για να εξισορροπήσει και να μειώσει την τιμή της ηλεκτρικής ισχύος σε ώρες αιχμής. Παρόλα αυτά, από τότε που η μονάδα του Huntorf άρχισε τη λειτουργία της εξυπηρετεί πολύ περισσότερες ανάγκες, καθώς λειτουργεί ως βοηθητική μονάδα για τις τοπικές ενεργειακές βιομηχανίες, συντελεί στην πλήρωση του ενεργειακού κενού λόγω της αργής απόκρισης των μονάδων ορυκτών καυσίμων και ρυθμίζει την προσφερόμενη στο δίκτυο ηλεκτρική ισχύ λόγω των διακυμάνσεων παραγωγής των αιολικών πηγών [20].

Η εν λόγω μονάδα χρησιμοποιεί ως αποθήκες συμπιεσμένου αέρα δύο σπήλαια αλατούχου ορίζοντα. Τα σπήλαια αυτά έχουν συνολικό όγκο περίπου 310.000m^3 , και βρίσκονται σε πάνω από 600 μέτρα βάθος. Η αποθήκευση του αέρα γίνεται σε πιέσεις μεταξύ 48 και 66 bar. Η μονάδα συμπίεσης λειτουργεί με μέγιστη πίεση εξόδου τα 100bar. Κάτω από φυσιολογικές συνθήκες, το CAES του Huntorf λειτουργεί σε καθημερινή βάση, και κατά τη φόρτισή του συμπιέζει αέρα για 8 ώρες, και εκφορτίζεται μέσα σε 2 ώρες, παράγοντας ισχύ 290MW. Για την αποδοτική λειτουργία του CAES χρησιμοποιείται γλυκό νερό για τον καθαρισμό του στροβίλου, ώστε να αποφεύγονται επικαθίσεις υπολειμμάτων άλατος (από το σπήλαιο αλατούχου ορίζοντα) που επηρεάζουν δυσμενώς τη λειτουργία του [27]. Η μονάδα του Huntorf είναι αξιόπιστη καθ' όλα τα χρόνια λειτουργίας της. Αναφέρεται ότι παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση με 90% διαθεσιμότητα και 99% αξιοπιστία εκκίνησης αντίστοιχα [16].

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης της μονάδας εκτιμάται γύρω στο 42% και συγκεκριμένα για την παραγωγή 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί σε ώρες αιχμής απαιτούνται 0,83kWh ηλεκτρικής ενέργειας εκτός αιχμής και 1,56kWh ενέργειας καυσίμου (φυσικού αερίου) [27]. Παρακάτω παρατίθεται ένα σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης CAES του Huntorf.

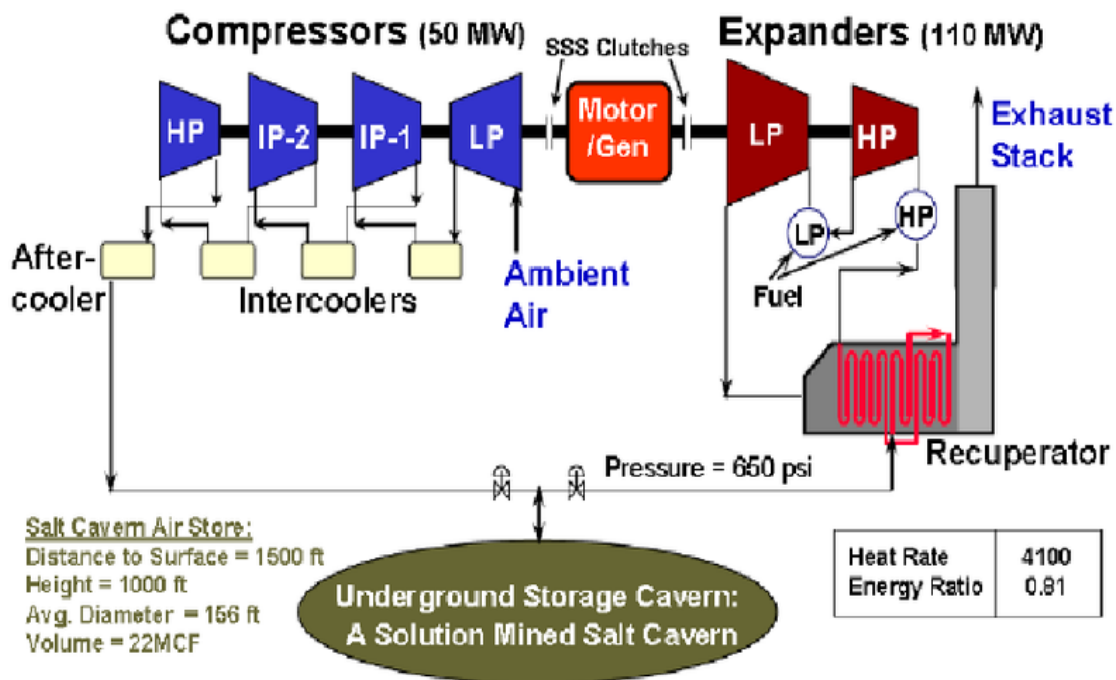


Εικόνα 2.8 : Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης CAES του Huntorf. Πηγή: [39]

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μία κύρια άτρακτος που συνδέει του συμπιεστές, την ηλεκτρική μηχανή αναστρέψιμης λειτουργίας (κινητήρας/γεννήτρια) και τους στροβίλους με συμπλέκτες. Επίσης, η συμπίεση αλλά και η εκτόνωση χωρίζονται σε στάδια χαμηλής και υψηλής πίεσης. Στην εγκατάσταση του Huntorf χρησιμοποιείται ακτινικός συμπιεστής με τουλάχιστον έξι στάδια συμπίεσης. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, 108 kg/s ατμοσφαιρικού αέρα αναρροφώνται από τους συμπιεστές, ενώ κατά την εκτόνωση στους στροβίλους εκτονώνεται παροχή αέρα 417 kg/s για δύο ώρες μέχρι το σύστημα να εκφορτιστεί πλήρως [20].

2.5.2 Η μονάδα CAES του McIntosh

Η δεύτερη βιομηχανοποιημένη μεγάλης κλίμακας εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα εγκαινιάστηκε το 1991 στο McIntosh της Alabama των Η.Π.Α. Το έργο μελετήθηκε από την εταιρεία Dresser-Rand και έφερε εις πέρας η Alabama Electric Cooperative. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της εγκατάστασης του McIntosh.



Εικόνα 2.9 : Σχηματική απεικόνιση της μονάδας CAES στο McIntosh. Πηγή: [39]

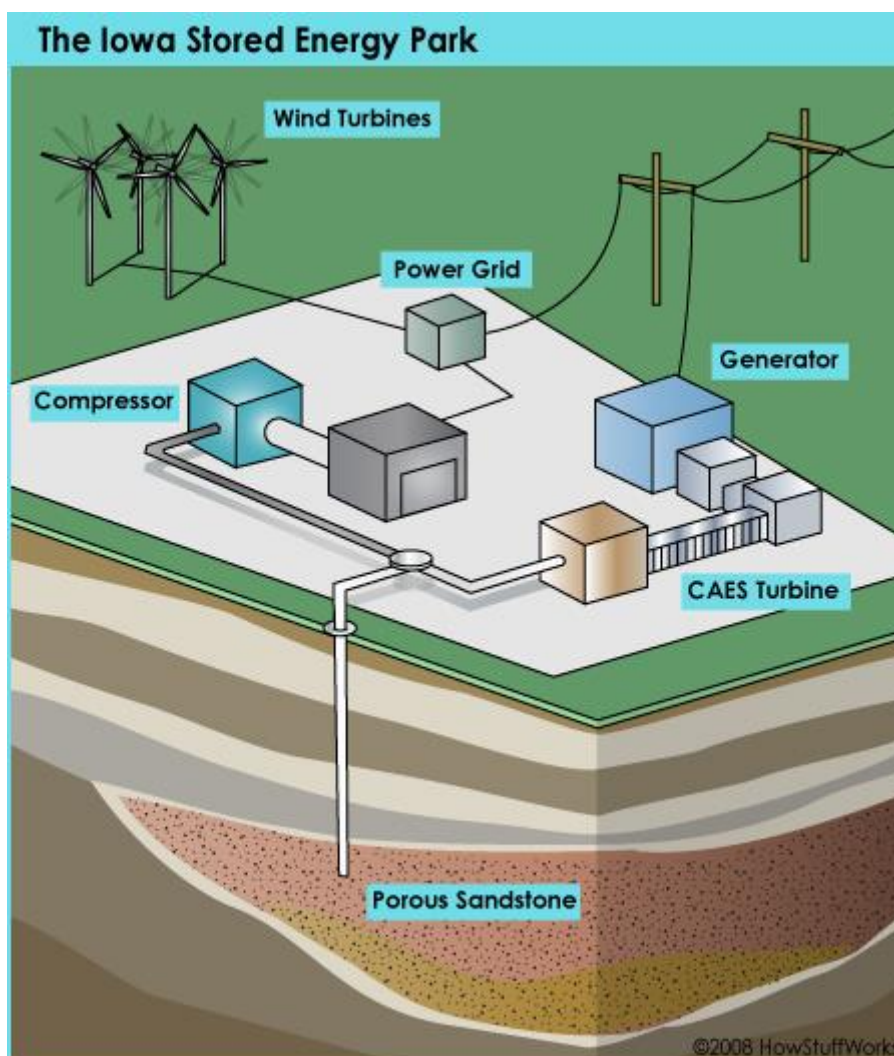
Η μονάδα του McIntosh, ονομαστικής ισχύος 110MW, σχεδιάστηκε για να παράγει την προαναφερθείσα ηλεκτρική ισχύ συνεχόμενα για περίπου 26 ώρες, εκτονώνοντας ροή αέρα 154 kg/s [17]. Ο όγκος της αποθηκευτικής διάταξης του συμπιεσμένου αέρα είναι περίπου 560.000m³, χρησιμοποιώντας μόνο ένα σπήλαιο αλατούχου οριζόντια, σε αντίθεση με τα δύο που χρησιμοποιούνται στο Huntorf. Το σπήλαιο βρίσκεται στα 450 m κάτω από το έδαφος, και ο αέρας αποθηκεύεται σε πίεση από 45 μέχρι 74 bar, από συμπιεστές συνολικής ισχύος 50MW [20], ενώ η πλήρης φόρτιση της παραπάνω δεξαμενής διαρκεί περίπου 45 ώρες, με ροή αέρα κοντά στα 94 kg/s. Από τη σχηματική απεικόνιση της μονάδας παρατηρείται ότι η δομή της είναι παρόμοια με αυτή της μονάδας του Huntorf. Η κύρια βελτίωση είναι ότι στην εγκατάσταση CAES του McIntosh χρησιμοποιείται ένας προθερμαντήρας του αέρα που εξέρχεται από το σπήλαιο, ώστε να χρησιμοποιηθεί η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των καυσαερίων στην έξοδο του στροβίλου χαμηλής πίεσης, αντί να απελευθερωθεί κατευθείαν στο περιβάλλον. Η διαμόρφωση αυτή υπολογίζεται ότι μειώνει την κατανάλωση καυσίμου (και εδώ φυσικού αερίου) κατά 22-25%, αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης κατά περίπου 12 ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με αυτόν του Huntorf, αγγίζοντας το 54% [20]. Πιο συγκεκριμένα, για την παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούνται 0,69 kWh ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση των συμπιεστών και 1,17 kWh ενέργειας καυσίμου.

Κάτω από φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, το σπήλαιο αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα επαναφορτίζεται μερικώς κατά τη διάρκεια της νύχτας τις εργάσιμες ημέρες, και φορτίζεται πλήρως τα σαββατοκύριακα. Από τη λειτουργία του τα έτη 1998 έως 2008, η μονάδα παρουσιάζει κατά μέσο όρο αξιοπιστία εκκίνησης μεταξύ 91.2% και 92.1%, και αξιοπιστία λειτουργίας μεταξύ 96.8% και 99.5%.

2.5.3 Μη ολοκληρωμένα έργα

ι) Το πάρκο αποθήκευσης ενέργειας στην Iowa (Iowa Stored Energy Park Project)

Το έργο αυτό προγραμματίστηκε από την ένωση επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας της Iowa. Σκοπός ήταν να κατασκευαστεί ένα σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα ισχύος 270MW, το οποίο να συνδέεται με αιολικό πάρκο ισχύος 75-100MW, και σχεδιάζόταν να ξεκινήσει τη λειτουργία του το 2015. Η μονάδα ήταν σχεδιασμένη να χρησιμοποιεί την περίσσεια ενέργειας από το αιολικό πάρκο σε ώρες χαμηλής ζήτησης (τη νύχτα), συμπιέζοντας αέρα και αποθηκεύοντάς τον σε έναν υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα βορειοδυτικά της τοποθεσίας Des Moines. Όταν η ζήτηση ισχύος ξεπερνάει την ηλεκτροπαραγωγή του αιολικού πάρκου, ο συμπιεσμένος αέρας θα μπορούσε να παράγει το απαιτούμενο έλλειμμα ισχύος, από την εκτόνωσή του σε στροβίλους που κινούν μια ηλεκτρική γεννήτρια. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται το σχέδιο της εγκατάστασης.



Εικόνα 2.10 : Το σχέδιο του πλάνου εγκατάστασης CAES στην Iowa. Πηγή: [40]

Παρόλα αυτά, το σχέδιο εγκατάστασης του πάρκου αποθήκευσης ενέργειας της Iowa διακόπηκε το 2011. Έπειτα από χρόνια μελετών, οι ερευνητές κατέληξαν πως ο πορώδης υδροφόρος ορίζοντας στην Iowa δεν είναι κατάλληλος για τη δημιουργία

CAES, καθώς ο αέρας που θα αποθηκευόταν σε τέτοια διαμόρφωση υπεδάφους δε θα μπορούσε να παρέχει αρκούντως μεγάλη ροή κατά την εκτόνωση ώστε να ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές του συστήματος.

Παρόλο που το έργο διακόπηκε, παρείχε ορισμένα πολύ διδακτικά μαθήματα και ευρήματα για άλλα προγραμματισμένα CAES που είναι εν μελέτη ή εν κατασκευή. Μερικά από τα θετικά στοιχεία που άφησε η αποτυχημένη αυτή προσπάθεια ήταν: α) η έρευνα εύρεσης κατάλληλης τοποθεσίας για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα σε αμφιβόλου καταλληλότητας γεωλογικά μέρη, β) η εκτεταμένη έρευνα στο ιδιαίτερο ζήτημα της εκτίμησης του κόστους και στις μακροπρόθεσμες οικονομικές αναλύσεις των CAES και γ) η κατανόηση των ελλείψεων εμπειρίας και μηχανικών για διαφορετικά επαγγελματικά πεδία. Παρόλο που το πορώδες υπέδαφος αμμόπετρας έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου επί δεκαετίες, οι επί τόπου δοκιμές ώστε να εξεταστεί η καταλληλότητά του για την αποθήκευση αέρα για ένα CAES δεν ήταν επιτυχείς. Επίσης, από οικονομικής πλευράς, η εκτίμηση του προϋπολογισμού για το έργο ήταν ανακριβής, και όταν χρειάστηκε να αυξηθεί το επενδυτικό κεφάλαιο, δυστυχώς αυτό δεν κατέστη δυνατό.

ii) Το έργο αποθήκευσης ενέργειας στο Norton (Norton energy storage project)

Το συγκεκριμένο έργο ανακοινώθηκε το 2009 από την FirstEnergy Generation Corp (FGCO). Ως αρχή του έργου, η FGCO ανακοίνωσε την αγορά μιας περιοχής 92 στρεμμάτων για περίπου 35 εκατομμύρια δολάρια, ώστε να αναπτύξει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα. Το πλάνο είναι να μετατραπεί ένα ανενεργό υπόγειο ορυχείο ασβεστόλιθου έκτασης 600 στρεμμάτων στο Norton, Ohio σε αποθηκευτικό χώρο για το συμπιεσμένο αέρα ενός CAES, που θα λειτουργεί μεταξύ πιέσεων 55 και 110 bar. Δεδομένου ότι ο συνολικός χώρος αποθήκευσης αντιστοιχεί σε 9,6 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, το έργο πρόκειται να διεκπεραιωθεί σταδιακά, με ονομαστική ισχύ αρχικά 270MW και τελικά 2700MW, όταν ολοκληρωθεί πλήρως. Τον Ιούλιο του 2013 ανακοινώθηκε ότι η FGCO ανέβαλε την κατασκευή του CAES λόγω της παρούσης κατάστασης στις αγορές, και συγκεκριμένα λόγω της πτώσης της τιμής της ενέργειας τα τελευταία χρόνια και της ανεπαρκούς ζήτησής της, ώστε να καταστεί το CAES επαρκώς κερδοφόρο [20].

3. ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (AA-CAES)

3.1 Εισαγωγή

Όπως γίνεται σαφές από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα, τα συστήματα αυτά είναι φανερό ότι μπορούν να προσφέρουν σημαντικές λύσεις στο μείζον ζήτημα της αποθήκευσης ενέργειας. Ένα μειονέκτημά τους παρά όλα αυτά, είναι ότι δεν αποτελούν καθαρά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αλλά μάλλον υβριδική, καθώς κατά την λειτουργία τους καταναλώνεται καύσιμο για την ανύψωση θερμοκρασίας του συμπιεσμένου αέρα πριν από την εκτόνωση, οδηγώντας σε εκπομπές ρύπων. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στη μελέτη και υλοποίηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα που να μπορούν να λειτουργούν χωρίς καύση. Τέτοια συστήματα ονομάζονται αδιαβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage, AA-CAES), και λειτουργούν αποθηκεύοντας την θερμότητα που παράγεται από τη συμπίεση του αέρα κατά τη φόρτισή τους και επαναχρησιμοποιώντας την μετά, κατά την εκφόρτιση του συστήματος, για τη θέρμανση του αέρα πριν την είσοδό του στο στρόβιλο, αποφεύγοντας την κατανάλωση καυσίμου.

Τα AA-CAES δεν είναι καινούργια ιδέα. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Robert Schainker, η EPRI χρηματοδότησε μια έρευνα διαφόρων αδιαβατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, ευρεσιτεχνίας του καθηγητή Nakhamkin. Τα συμπεράσματα της έρευνας ήταν ότι τα αδιαβατικά συστήματα αυτά παρουσίαζαν υψηλή απόδοση αποθήκευσης ενέργειας συγκριτικά με τη συμβατική τεχνολογία CAES, αλλά με υψηλό επενδυτικό κόστος. Ωστόσο, καθώς εκείνη την περίοδο η αποθήκευση ενέργειας δεν παρουσίαζε τόσο μεγάλο ενδιαφέρον για τους μηχανικούς και τη βιομηχανία, η έρευνα αυτή και τα δημοσιευμένα αποτελέσματά της δεν εκτιμήθηκαν ιδιαίτερα. Σήμερα όμως, πολλές κυβερνητικές υπηρεσίες και επιχειρήσεις ανά τον κόσμο θεωρούν το αδιαβατικό CAES ως μία από τις πιο ελπιδοφόρες και περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις για την επέκταση της αξιοποίησης των αιολικών πηγών ενέργειας, αλλά και για την μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας γενικότερα [41].

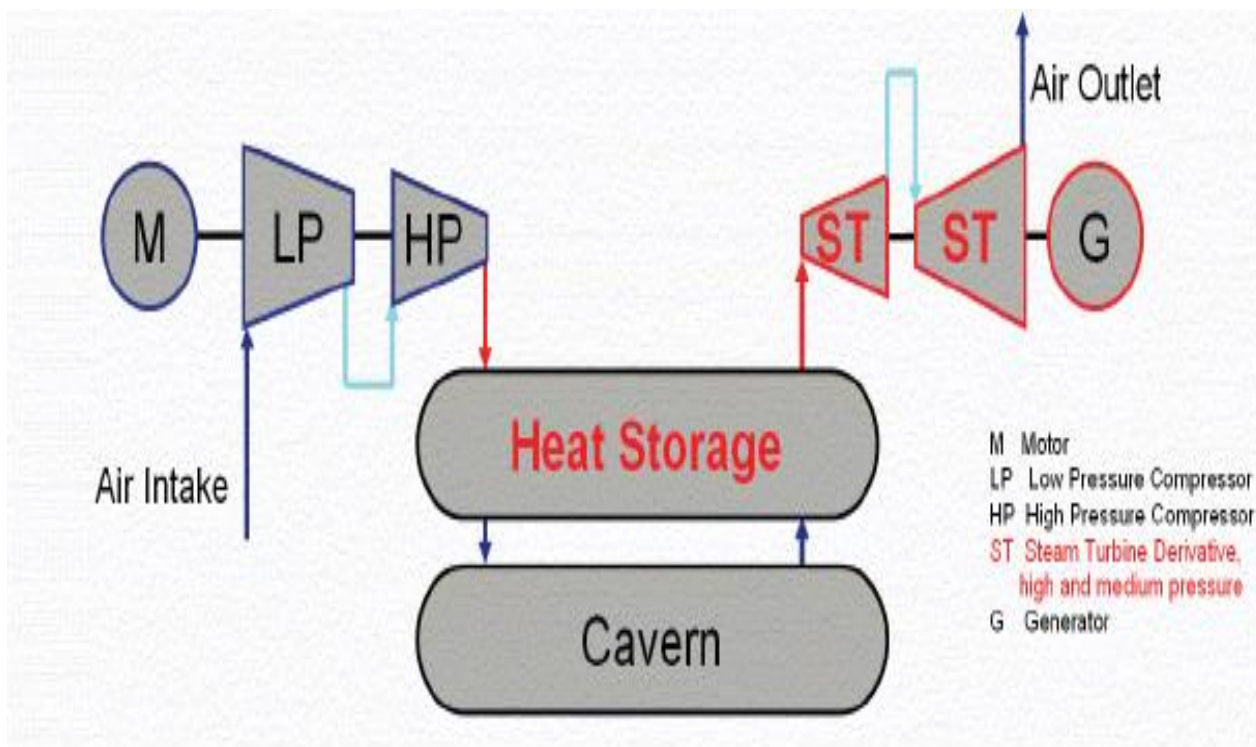
3.2 Στοιχεία Λειτουργίας AA-CAES

3.2.1 Αρχές λειτουργίας AA-CAES

Η απόδοση αποθήκευσης ενέργειας ενός συμβατικού CAES, το οποίο αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι σχετικά χαμηλή συγκριτικά με τα άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας εξ αιτίας του γεγονότος ότι ο συμπιεζόμενος αέρας ψύχεται πριν την είσοδό του στη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα, για την αποφυγή θερμικής φόρτισης της δεξαμενής, που μπορεί να οδηγήσει σε αποσταθεροποίηση του συστήματος αποθήκευσης, αλλά και της χρήσης καυσίμου για τη θέρμανση του αέρα πριν την είσοδό του στους στρόβιλους.

Στο αδιαβατικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES), η θερμότητα της συμπίεσης του αέρα ανακτάται και αποθηκεύεται ξεχωριστά πριν ο συμπιεσμένος αέρας εισαχθεί στη δεξαμενή. Όταν υπάρχει ανάγκη ενέργειας από το δίκτυο, η αποθηκευμένη θερμότητα της συμπίεσης αποδίδεται ξανά στον συμπιεσμένο αέρα, και στη συνέχεια αυτός εκτονώνεται μέσω των στρόβιλων και παράγει ηλεκτρική ισχύ μέσω γεννήτριας, χωρίς να χρησιμοποιείται καύσιμο για την ανύψωση της θερμοκρασίας του. Έτσι, το AA-CAES παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από το συμβατικό CAES, και μάλιστα έχοντας μηδενικές εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα [42]. Μια βασική συνιστώσα ενός τέτοιου συστήματος είναι η επιπλέον διάταξη του σε σχέση με το συμβατικό CAES, η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (Thermal Energy Storage, TES). Ο σκοπός της είναι να αποθηκεύει τη θερμότητα της συμπίεσης και να τη διατηρεί σε υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα χωρίς πολλές απώλειες, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας του AA-CAES.

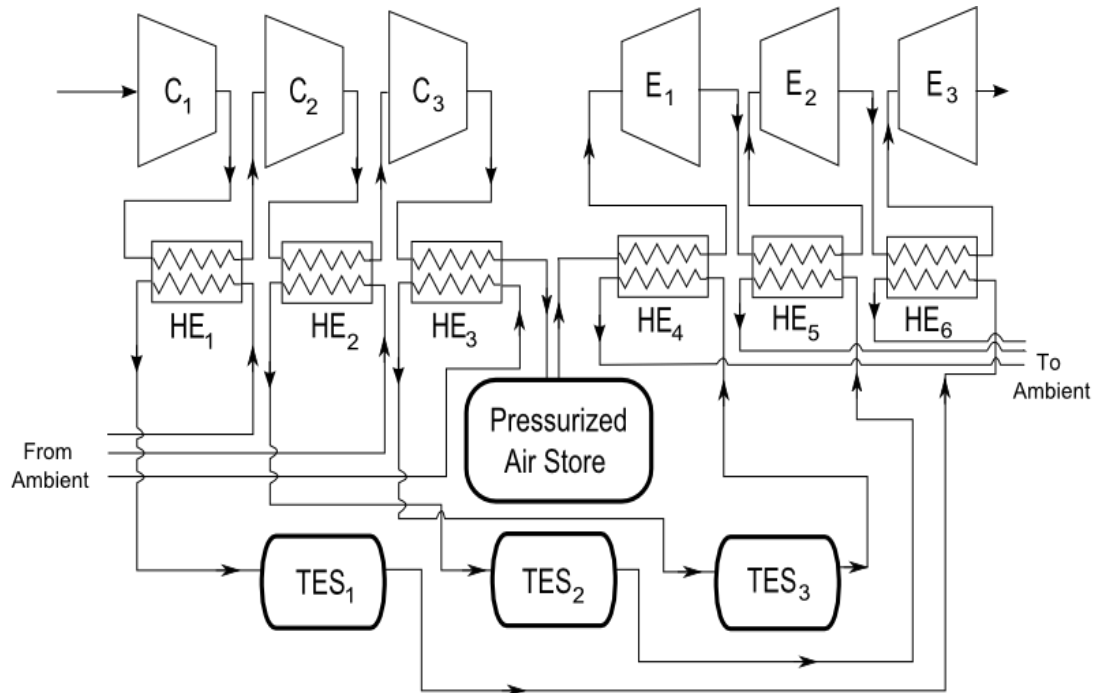
Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.1) παρουσιάζεται μια διάταξη ενός τέτοιου συστήματος το οποίο δεν απαιτεί ενδιάμεση ψύξη μεταξύ των συμπιέσεων του αέρα, και στο οποίο επιτυγχάνονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες εξόδου του αέρα από το συμπιεστή (περίπου 600-620°C). Η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο στρόβιλο είναι κοντά στους 600°C.



Εικόνα 3.1 : Σύστημα AA-CAES χωρίς ενδιάμεση ψύξη μεταξύ των βαθμίδων συμπίεσης του αέρα. Πηγή: [42]

Μια άλλη πιθανή διάταξη για ένα σύστημα AA-CAES παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2. Στη διάταξη αυτή, εκτός από την ψύξη του αέρα μετά το τέλος της συμπίεσης μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, υπάρχουν και ενδιάμεσες ψύξεις με επιπλέον εναλλάκτες μεταξύ των συμπιεστών, με ροή του θερμαινόμενου μέσου μεταφοράς θερμότητας (συνήθως κάποιο βιομηχανικό έλαιο) προς τις δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας. Αντιστρόφως, κατά την εκτόνωση, το μέσο μεταφοράς

θερμότητας ρέει από τις δεξαμενές και θερμαίνει το συμπιεσμένο αέρα πριν αυτός εισέλθει στους στροβίλους, ξανά μέσω εναλλακτών θερμότητας. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοια διάταξης είναι ότι επιτυγχάνονται υψηλότερες πιέσεις σε χαμηλότερη θερμοκρασία, ότι το έργο της συμπίεσης μειώνεται λόγω των ενδιάμεσων ψύξεων και ότι η διάταξη αυτή εξασφαλίζει υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης σε σχέση με αυτή χωρίς ενδιάμεση ψύξη. Ωστόσο, απαιτεί τη χρήση πολλών δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας, και παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα [27].



Εικόνα 3.2 : Σύστημα AA-CAES με ενδιάμεσες ψύξεις μεταξύ των βαθμίδων συμπίεσης.
Πηγή: [43]

Ο κινητήρας και η γεννήτρια που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα AA-CAES για την παροχή και την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος αντίστοιχα μπορεί να είναι δύο ξεχωριστά μηχανήματα, το καθένα σε μια άτρακτο (ο κινητήρας στην άτρακτο του συμπιεστή και η γεννήτρια στην άτρακτο του στροβίλου), είτε να είναι μία ηλεκτρική μηχανή αναστρέψιμης λειτουργίας, που συνδέεται με συμπλέκτες σε μία ενιαία άτρακτο, είτε με το συμπιεστή είτε με το στρόβιλο. Το τελευταίο σενάριο προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- i) Επιτυγχάνεται σύνδεση μεταξύ στροβίλου και συμπιεστή λόγω της ενιαίας ατράκτου, γεγονός το οποίο επιτρέπει στο συμπιεστή να εκκινεί και να φτάνει σε σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής χρησιμοποιώντας το στρόβιλο (έπειτα από την εκκίνηση προφανώς ο στρόβιλος μπορεί να τερματίζει τη λειτουργία του). Έτσι, ο κινητήρας/γεννήτρια δεν χρειάζεται ειδική διάταξη εκκίνησης.
- ii) Μειωμένο κόστος συγκριτικά με την επιλογή να υπάρχουν δύο ξεχωριστές ηλεκτρικές μηχανές, καθώς αγοράζεται μία μηχανή αντί για δύο, καθώς και μειωμένο κόστος καλωδιώσεων κλπ.

Ωστόσο, η ύπαρξη μιας μοναδικής ατράκτου για εκτόνωση και συμπίεση μπορεί να συνεπάγεται και μειωμένη διαθεσιμότητα ενός εκ των δύο λειτουργιών του συστήματος (συμπίεση και εκτόνωση), όταν η άλλη βρίσκεται σε συντήρηση [44].

3.2.2 Βαθμός απόδοσης μονάδων AA-CAES

Ο βαθμός απόδοσης μιας μονάδας AA-CAES ορίζεται συνήθως ως το κλάσμα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη γεννήτρια κατά την εκτόνωση προς την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη συμπίεσης του αέρα, δηλαδή:

$$\eta_{AA-CAES} = \frac{E_{elg}}{E_{elc}} \quad (4)$$

Παρόλο που δεν υπάρχουν εγκατεστημένες μονάδες AA-CAES ακόμα, θεωρείται πως ο βαθμός απόδοσης των μονάδων AA-CAES θα ξεπερνάει κατά πολύ τα συμβατικά CAES, και θα είναι περίπου 70%.

3.2.3 Προϋποθέσεις για τη βιομηχανοποίηση της τεχνολογίας AA-CAES

Η τεχνολογία των συστημάτων AA-CAES δεν είναι ακόμα μια πλήρως ανεπτυγμένη τεχνολογία. Παρόλα αυτά, πολλοί ερευνητές ασχολούνται με τα συστήματα αυτά, και αρκετές μελέτες και εγκαταστάσεις πειραματικών μονάδων έχουν λάβει χώρα, προκειμένου να αρχίσει η βιομηχανοποίησή τους. Για να συμβεί αυτό, οι ερευνητές θα πρέπει να δώσουν λύση στα εξής προβλήματα:

- i) Κατασκευή αδιαβατικών ή ημι-αδιαβατικών συμπιεστών, ικανοί να παρέχουν θερμοκρασία εξόδου συμπιεσμένου αέρα της τάξεως των 650°C και σε πολύ υψηλές πιέσεις (100-200 bar).
- ii) Συσκευές αποθήκευσης θερμότητας, που να επιτρέπουν αποδοτική αποθήκευση θερμότητας, έχοντας σχεδόν αδιαβατική συμπεριφορά.
- iii) Στροβίλους με γρήγορη εκκίνηση, ταχεία αύξηση ισχύος κατά τη μεταβατική τους λειτουργία, και υψηλή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα πιέσεων εισόδου.
- iv) Δημιουργία βασικών δεδομένων που να επιτρέπουν την προσομοίωση της διεργασίας, με δοκιμές επιδόσεων των στροβιλομηχανών και της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας.
- v) Κατασκευή ενός οικονομικού μοντέλου που να περιγράφει όλα τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά αυτόν τον τρόπο.
- vi) Μελέτη των γεωλογικών και γεωγραφικών περιορισμών για την κατασκευή ενός AA-CAES.

3.3 Κύριες συνιστώσες συστήματος AA-CAES

Οι κύριες συνιστώσες ενός συστήματος αδιαβατικής αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα μοιράζονται πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες συνιστώσες υπαρχόντων ή προγραμματισμένων να λειτουργήσουν συμβατικών CAES. Παρόλα αυτά, υπάρχουν διαφοροποιήσεις, καθώς το σύστημα AA-CAES είναι πιο πολύπλοκο, και περιλαμβάνει και μία επιπλέον συνιστώσα σε σχέση με το συμβατικό CAES, τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας.

3.3.1 Δεξαμενή αέρα

Οι απαιτήσεις της δεξαμενής αέρα για ένα σύστημα AA-CAES δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτές για ένα συμβατικό σύστημα CAES. Μια ευρεία επιλογή τύπων δεξαμενής αέρα έχουν διερευνηθεί για ένα AA-CAES. Για τα συστήματα μικρής κλίμακας, ενδεχομένως να ήταν δυνατή η χρήση υπογείων σωληνώσεων, όπως έχει ήδη γίνει σε μια πιλοτική μονάδα, αλλά και για αποθήκευση φυσικού αερίου. Για μεγάλης κλίμακας συστήματα όμως, τα οποία θεωρούνται και τα περισσότερο βιώσιμα, μια μεγάλη υπόγεια κοιλάτητα όγκου 150.000-500.000 m³ είναι η μοναδική επιλογή. Παρόλο που πολύ συχνά η εγκατάσταση μονάδων CAES είναι συνυφασμένη με την εύρεση ήδη υπαρχόντων κοιλοτήτων, η εξόρυξη με τη χρήση διαλύματος σε γεωλογία αλατούχου ορίζοντα παραμένει μια ελκυστική προοπτική, καθώς η γεωλογία αυτή συναντάται σε πλήθος περιοχών, ειδικά στη βόρεια Ευρώπη. Στις τοποθεσίες όπου η γεωλογία αυτή δεν συναντάται, η χρήση έτοιμων κοιλοτήτων όπως παλαιά ορυχεία, υδροφόροι ορίζοντες και πρώην κοιλοτήτες φυσικού αερίου είναι μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική [42].

3.3.2 Συμπιεστές

Τα αδιαβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (AA-CAES) έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από τη συμπίεση σε σχέση με το συμβατικό σύστημα CAES. Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός του συμπιεστή πρέπει να γίνει έτσι ώστε να προσεγγίζεται η αδιαβατική συμπίεση και όχι η ισόθερμη, όπως συνήθως συμβαίνει στα συστήματα χωρίς αποθήκευση θερμότητας, όπως και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Η προσέγγιση της ισόθερμης συμπίεσης και μεν ελαττώνει την απαιτούμενη ισχύ συμπίεσης και τη θερμοκρασιακή φόρτιση του, αλλά ο αέρας έχει χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες εξόδου μετά τη συμπίεση. Στο AA-CAES υπάρχει η απαίτηση υψηλών θερμοκρασιών εξόδου του αέρα στο τέλος της συμπίεσης, αλλά και πολύ υψηλών πιέσεων. Συγκεκριμένα απαιτείται ο αέρας να εξέρχεται από τους συμπιεστές σε πίεση 100-160 bar και θερμοκρασία 450-620°C, ανάλογα με τη διάταξη (με ενδιάμεση ψύξη κατά τη συμπίεση ή χωρίς) του συστήματος AA-CAES.

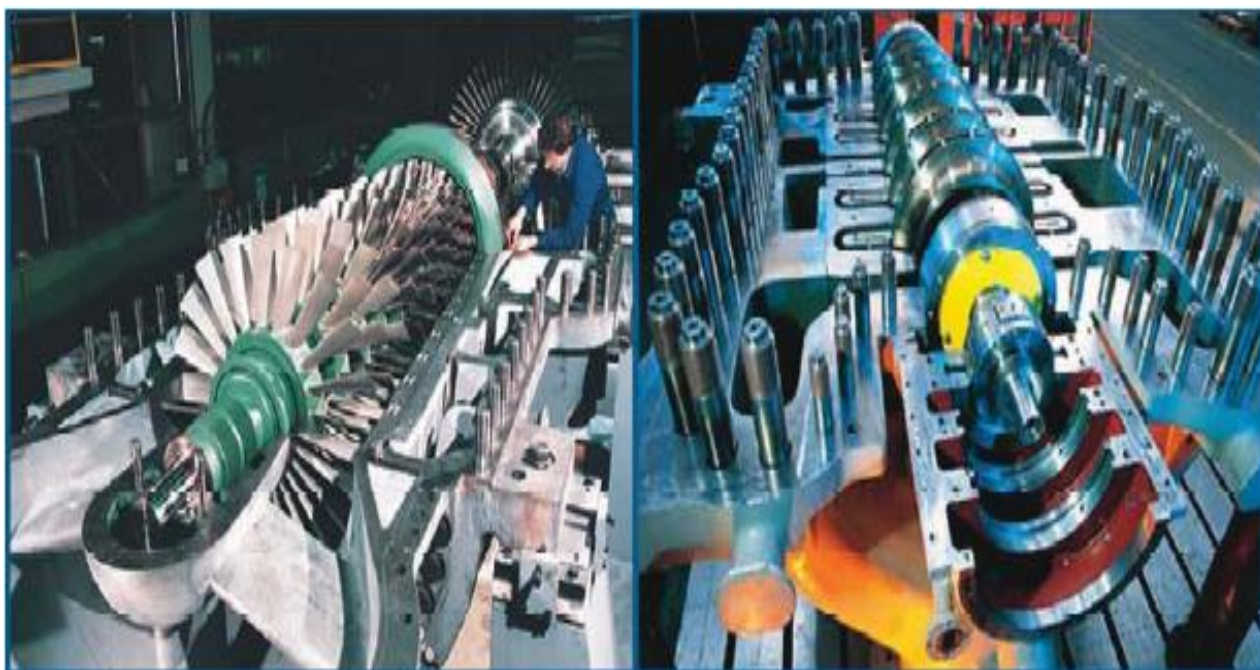
Οι συμπιεστές που υπάρχουν διαθέσιμοι στο εμπόριο έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν τις απαιτήσεις πίεσης και ισχύος, ωστόσο δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή συμπιεστές που μπορούν να συνδυάσουν τις απαιτήσεις αυτές με την επιπλέον απαίτηση της υψηλής θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από τη συμπίεση. Από την άλλη, υπάρχουν συμπιεστές που δημιουργούν την απαιτούμενη θερμοκρασία εξόδου του αέρα, αλλά δεν ικανοποιούν την ταυτόχρονη συμπίεση του σε τόσο υψηλές πιέσεις ή δεν μπορούν να χειριστούν την επιθυμητή ποσότητα παροχής που απαιτείται.

Ο συνδυασμός των απαιτήσεων των υψηλών τιμών πίεσης και θερμοκρασίας στην έξοδο των συμπιεστών, του υψηλού ισεντροπικού βαθμού απόδοσης και του μικρού χρόνου εκκίνησης οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι αναγκαίο να κατασκευαστούν νέοι συμπιεστές υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Αυτοί θα πρέπει να έχουν ως βάση για το σχεδιασμό τους τους ακτινικούς συμπιεστές. Ο σχεδιασμός αυτός βέβαια είναι ιδιαίτερα απαιτητικός, καθώς η ικανοποίηση ενός χαρακτηριστικού πολύ συχνά έρχεται σε σύγκρουση με τα υπόλοιπα [27]. Η επικρατέστερη ιδέα είναι η δημιουργία ενός συμπιεστή με πολλαπλά κελύφη (ενδεχομένως τρία), ο οποίος θα αποτελείται από:

i) Τμήμα χαμηλής πίεσης: Αξονικός συμπιεστής σε περίπτωση διακίνησης μεγάλων παροχών ή ακτινικός συμπιεστής απλής ατράκτου για χαμηλές παροχές. Ο αέρας στην έξοδο του από το τμήμα χαμηλής πίεσης θα ψύχεται πριν εισαχθεί στο τμήμα μέσης και υψηλής πίεσης, μεταφέροντας μέρος της θερμότητάς του στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας.

ii) Τμήμα μέσης και υψηλής πίεσης: Ακτινικός συμπιεστής απλής ατράκτου, μετά από τον οποίο ο αέρας θα αποδίδει τη θερμότητα του ξανά στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας [42].

Κατά τη σχεδίαση των νέων συμπιεστών προσοχή πρέπει να δίδεται στην επιλογή των υλικών, τη σταθερότητα, τις μεθόδους σταθεροποίησης του ρότορα του συμπιεστή, και την ομαλή θερμική συμπεριφορά της μηχανής σε ένα μεγάλο εύρος μεταβλητών λειτουργίας [42].



Εικόνα 3.3 : Αξονικός συμπιεστής (αριστερά) για το τμήμα χαμηλής πίεσης και ακτινικός (δεξιά) για τα τμήματα μέσης και υψηλής πίεσης. Πηγή: [42]

3.3.3 Στρόβιλοι

Ο ρόλος των στροβίλων σε ένα σύστημα AA-CAES είναι η μετατροπή του θερμού συμπιεσμένου αέρα σε μηχανική ενέργεια, ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γεννήτριας. Ο στρόβιλος πρέπει να είναι ικανός να λειτουργεί αποδοτικά για ένα μεγάλο εύρος πιέσεων εισόδου και παροχής αέρα από τη δεξαμενή αέρα.

Έχουν μελετηθεί αρκετοί τύποι στροβίλων για την καταλληλότητά τους ως μέρος ενός συστήματος AA-CAES. Οι αεριοστρόβιλοι αξονικής ροής έχουν το πλεονέκτημα της ανθεκτικότητας σε υψηλή θερμοκρασία, αλλά υστερούν στην διαχείριση μεγάλων διακυμάνσεων παροχής μάζας. Οι ατμοστρόβιλοι από την άλλη, παρόλο που διαχειρίζονται με ευκολία μεγάλες διακυμάνσεις στην παροχή, έχουν σαφώς μικρότερο βαθμό απόδοσης και μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερο χρόνο εκκίνησης σε σχέση με τους αεριοστροβίλους. Επιπλέον, απαιτούν ειδική ρύθμιση

ώστε να λειτουργούν στις απαιτούμενες από ένα AA-CAES υψηλές θερμοκρασίες εισόδου [44].

Οι πιέσεις εισόδου στο στρόβιλο για ένα AA-CAES με δεξαμενή σταθερού όγκου κυμαίνονται μεταξύ μιας μέγιστης και μίας ελάχιστης τιμής. Επίσης, η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο δεν μπορεί να μείνει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της εκτόνωσης, καθώς η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας αποδίδει σταδιακά τη θερμότητα που έχει αποθηκεύσει, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας του αέρα εισόδου στον στρόβιλο υψηλής πίεσης αντίστοιχα. Επομένως, η πίεση εισόδου στο στρόβιλο υψηλής πίεσης πρέπει να μειωθεί, ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία εξόδου από το στρόβιλο σε αρκούντως υψηλό επίπεδο (να αποφευχθεί ο σχηματισμός πάγου από την υγρασία του αέρα κατά την εκτόνωση). Έτσι, συνήθως ο αέρας αποθηκεύεται σε υψηλότερη πίεση από την πίεση εισόδου στο στρόβιλο υψηλής πίεσης, και στραγγαλίζεται στην έξοδό του από τη δεξαμενή στην επιθυμητή τιμή της πίεσης μέσω μια στραγγαλιστικής βαλβίδας.

Με τον στραγγαλισμό του αέρα στην έξοδό του από τη δεξαμενή, υπάρχουν εξεργειακές απώλειες, με την επακόλουθη μείωση της απόδοσης της μονάδας. Για την αποφυγή του στραγγαλισμού και της μείωσης του βαθμού απόδοσης που αυτός προκαλεί, απαιτείται ο επανασχεδιασμός των στροβίλων του συστήματος, ώστε να μπορούν να λειτουργούν υπό μεταβαλλόμενη παροχή αέρα και πίεση εισόδου. Μία λύση είναι η εισαγωγή μιας προσαρμοσμένης βαθμίδας εισόδου στο στρόβιλο, η οποία, με βάση ειδικά σχεδιασμένα πτερύγια, να επιτρέπει τη διαχείριση των μεταβολών πίεσης και παροχής μάζας, προσφέροντας παράλληλα υψηλή απόδοση [42].

Μια ακόμα σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ο χρόνος απόκρισης του στροβίλου. Το αδιαβατικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα απαιτεί την παραγωγή ενέργειας σε ελάχιστο χρονικό διάστημα (τάξη μεγέθους μερικών λεπτών), οπότε ο στρόβιλος θα πρέπει να φτάνει στο πλήρες φορτίο όσο το δυνατόν ταχύτερα. Μια λύση για το ζήτημα αυτό είναι η προθέρμανση του στροβίλου χρησιμοποιώντας τη θερμότητα από τη συμπίεση προκειμένου να αναπτυχθούν τα κατάλληλα θερμοκρασιακά προφίλ ταχύτερα και έτσι να μειωθεί ο χρόνος απόκρισής του.

Τέλος, απαραίτητη κρίνεται η χρήση προστατευτικών φίλτρων αέρα στην είσοδο του στροβίλου, ειδικά όταν η κοιλότητα αποθήκευσης είναι αλατούχου ορίζοντα. Ο προς εκτόνωση αέρας μπορεί να περιέχει υπολείμματα άλατος, σταγονίδια νερού, και διαβρωτικά χημικά στοιχεία. Επομένως, κατά τον σχεδιασμό των στροβίλων πρέπει να ληφθεί υπόψη η προστασία των κινούμενων μερών του από τους παραπάνω κινδύνους. Αναφέρεται ότι στη μονάδα CAES στο Huntorf παρατηρήθηκαν έντονα φαινόμενα διάβρωσης και υψηλά επίπεδα σκουριάς στα πτερύγια του στροβίλου, μετά από μόνο μερικούς μήνες λειτουργίας [44].

3.3.4 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (Thermal Energy Storage- TES)

Το αδιαβατικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας διαφέρει σε σχέση με το συμβατικό CAES υπό την έννοια ότι η θερμότητα της συμπίεσης ανακτάται, αποθηκεύεται, και επαναπροσδίδεται κατά την εκτόνωση. Επομένως, απαραίτητη συνιστώσα των συστημάτων AA-CAES είναι η δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (TES). Οι απαιτήσεις από μια τέτοια δεξαμενή είναι η μεγάλη αποθηκευτική της ικανότητα (τυπικά 120-1200MWth), ο υψηλός ρυθμός απόδοσης της θερμότητας και η διατήρηση της θερμοκρασίας της κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης, τυπικά για ένα

χρονικό διάστημα 4-12 ωρών [42]. Επίσης, λόγω της συνύπαρξης υψηλών θερμοκρασιών (~600°C) και πιέσεων (~70 bar) οφείλει να είναι μια κατασκευή υψηλών προδιαγραφών αντοχής. Οι κύριες λειτουργίες της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας είναι:

- i) Η ανάκτηση της θερμότητας της συμπίεσης, κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, όσο ο αέρας συμπιέζεται και αποθηκεύεται στη δεξαμενή αέρα.
- ii) Η αποθήκευση της θερμότητας συμπίεσης σε ένα μέσο αποθήκευσης θερμότητας στερεάς ή υγρής μορφής, όπως ορυκτά έλαια, ρευστά άλατα ή κεραμικά υλικά.
- iii) Η χρησιμοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας για την προθέρμανση του ψυχρού συμπιεσμένου αέρα, κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης της ενέργειας, ώστε να εκτονωθεί στους στροβίλους και να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια [41].

Εν γένει, η αποθήκευση θερμότητας μπορεί να γίνει σε μία από τις τρεις παρακάτω μορφές:

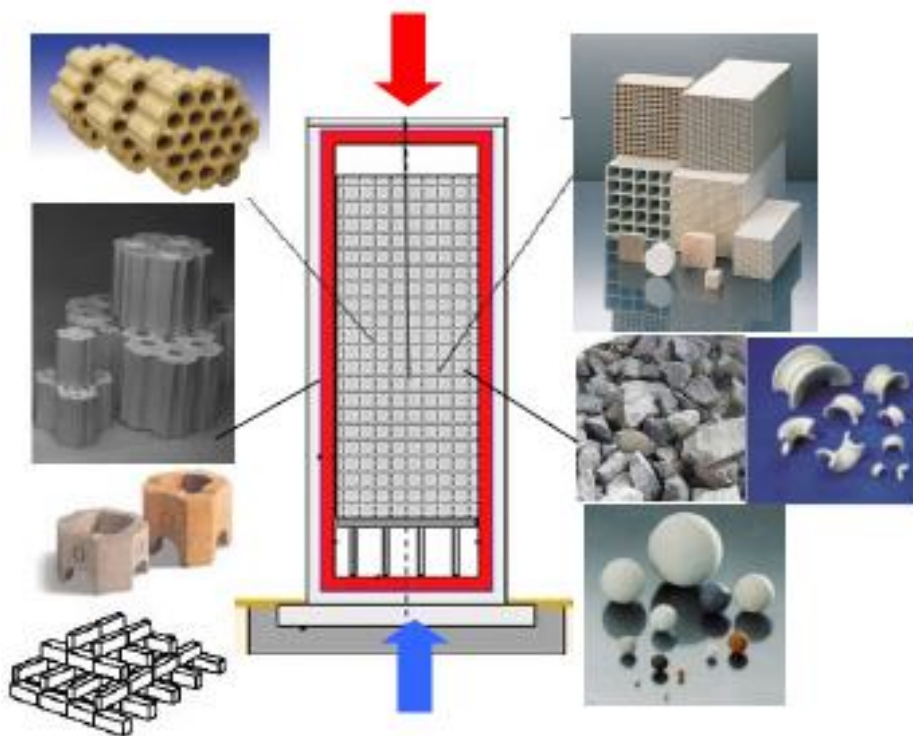
- i) Αισθητή θερμότητα (sensible heat storage). Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποδοθεί σε ένα υλικό αυξάνοντας την θερμοκρασία του, άρα την εσωτερική του ενέργεια. Σημαντικές παράμετροι ώστε ένα υλικό να είναι κατάλληλο για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε αυτό είναι η πυκνότητα του, η ειδική του θερμοχωρητικότητα, η θερμική του αγωγιμότητα, ο συντελεστής απωλειών θερμότητάς που παρουσιάζει, κ.α. Παραδείγματα μέσων αποθήκευσης στερεάς μορφής είναι τα πετρώματα, το τσιμέντο και τα κεραμικά υλικά, ενώ ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας υγρής μορφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν βιομηχανικά ή ορυκτά έλαια, νερό, ή διαλύματα αλάτων.
- ii) Λανθάνουσα θερμότητα (latent heat storage media). Η θερμική ενέργεια μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σχεδόν ισόθερμα σε κάποια υλικά ως λανθάνουσα θερμότητα, κατά τη διάρκεια αλλαγής της φάσης τους, είτε ως θερμότητα τήξης είτε ως θερμότητα ατμοποίησης. Συνήθως χρησιμοποιείται η θερμότητα τήξης, και οι ουσίες αυτές ονομάζονται υλικά αλλαγής φάσεως (phase change materials- PCM).
- iii) Θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας (chemical heat storage). Με το συγκεκριμένο τρόπο, η αποθήκευση της θερμότητας γίνεται μέσω χημικών αντιδράσεων. Για να γίνει εφικτή η θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας είναι απαραίτητο η χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται να είναι απολύτως αναστρέψιμες. Η ενέργεια αποθηκεύεται ως ενέργεια σύνδεσης για τη διάσπαση μορίων στα άτομα που το αποτελούν [45].

Η θερμότητα στα συστήματα AA-CAES μπορεί να αποθηκευτεί κυρίως με τη μορφή αισθητής θερμότητας, καθώς οι θερμοκρασίες στο ψυχρό και στο θερμό άκρο της δεξαμενής αποθήκευσης είναι καθορισμένες. Οι άλλες δύο μορφές αποθήκευσης θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο υπό προϋποθέσεις, εξ αιτίας του γεγονότος ότι η θερμοκρασία του αποθηκευτικού μέσου διατηρείται σταθερή [27].

Όσον αφορά την κατασκευή της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας για ένα AA-CAES, οι δύο μορφές που ερευνώνται περισσότερο είναι:

- i) Μια συμπαγής δεξαμενή που περιέχει στερεό υλικό ως μέσο αποθήκευσης της θερμότητας (π.χ. κεραμικά υλικά, τσιμέντο, φυσικά πετρώματα). Το μέσο αυτό, ανάλογα με τη φάση λειτουργίας του AA-CAES (συμπίεση ή εκτόνωση), υπόκειται σε αλλαγή της θερμοκρασίας του ερχόμενο σε άμεση επαφή με τον συμπιεσμένο αέρα (θερμαίνεται στην συμπίεση, ψύχεται στην εκτόνωση), αποθηκεύοντας ή αποδίδοντας θερμότητα αντίστοιχα. Η μέθοδος αυτή παρέχει μια μεγάλη και

οικονομική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, με ελάχιστες απώλειες. Παρόλα αυτά, εξ αιτίας του γεγονότος ότι οι θερμοκρασίες σε μια τέτοια δεξαμενή για μεγάλα συστήματα αποθήκευσης μπορεί να ξεπεράσουν τους 600°C και επειδή η πίεση του αέρα είναι πολύ υψηλή, απαιτείται η κατασκευή μιας ανθεκτικής σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία δεξαμενής [28], το οποίο αυξάνει το κόστος του συστήματος.



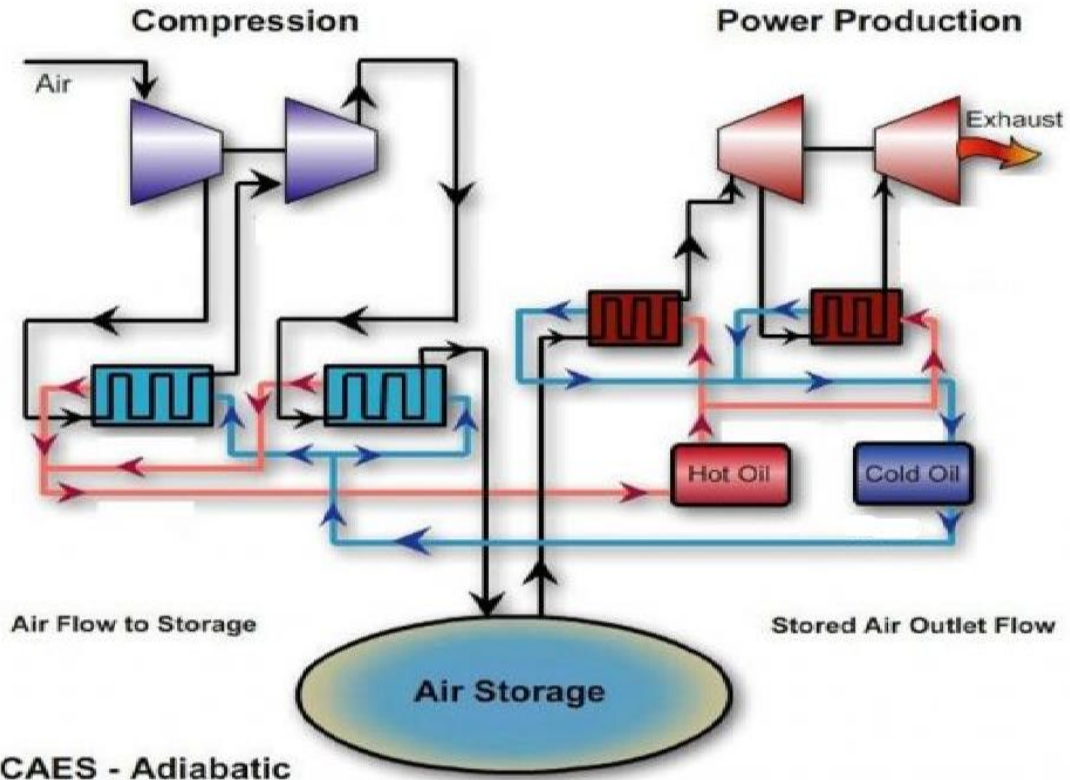
Εικόνα 3.4 : Μορφή δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας στερεού υλικού. Πηγή: [46]

ii) Η χρήση ελαίου ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι δοκιμασμένη σε βιομηχανικές εφαρμογές ηλιακών θερμικών συστημάτων. Σε αυτή τη μέθοδο αποθήκευσης θερμότητας, το έλαιο αποθηκεύεται σε δύο δεξαμενές, μια ψυχρή και μια θερμή. Κατά τη διάρκεια φόρτισης, έλαιο από την ψυχρή δεξαμενή εξάγεται και οδηγείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας αέρα-ελαίου, όπου απορροφά τη θερμότητα του συμπιεσμένου αέρα ψύχοντάς τον, και καταλήγει στη θερμή δεξαμενή. Αντίστροφα, κατά την εκτόνωση, το αποθηκευμένο έλαιο στη θερμή δεξαμενή χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του συμπιεσμένου αέρα σε έναν άλλο εναλλάκτη, πριν εκτονωθεί στους στροβίλους. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η κατασκευή μιας ακριβής ανθεκτικής δεξαμενής θερμότητας, αλλά η αποδοτικότητα της μετάδοσης θερμότητας είναι χαμηλότερη, λόγω της ύπαρξης εναλλακτών θερμότητας έμμεσης επαφής. Επομένως, απαιτείται μεγαλύτερη χωρητικότητα στη δεξαμενή αποθήκευσης του ελαίου σε σχέση με τον προηγούμενο τρόπο κατασκευής με στερεό υλικό [28]. Επίσης, οι εναλλάκτες αυξάνουν το κόστος της μονάδας, και κάνουν το σύστημα πιο πολύπλοκο.

Όσον αφορά το έλαιο μεταφοράς θερμότητας, εάν πρόκειται για σύστημα AA-CAES χωρίς ενδιάμεση ψύξη κατά τη συμπίεση (επομένως μεγαλύτερης θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από αυτήν-τυπικά 600°C), δεν υπάρχει κάποιο έλαιο που να καλύπτει ολόκληρη τη θερμοκρασιακή περιοχή 50-600°C. Επομένως είτε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ενδιάμεση ψύξη για να μειωθεί η θερμοκρασία εξόδου του

αέρα από τη συμπίεση, είτε να χρησιμοποιηθεί συνδυασμός δύο μέσων μεταφοράς, συνήθως ενός ελαίου και ενός ρευστού άλατος, όπου το καθένα καλύπτει διαφορετική περιοχή θερμοκρασιών [27].

Adiabatic Compressed Air Energy Storage System

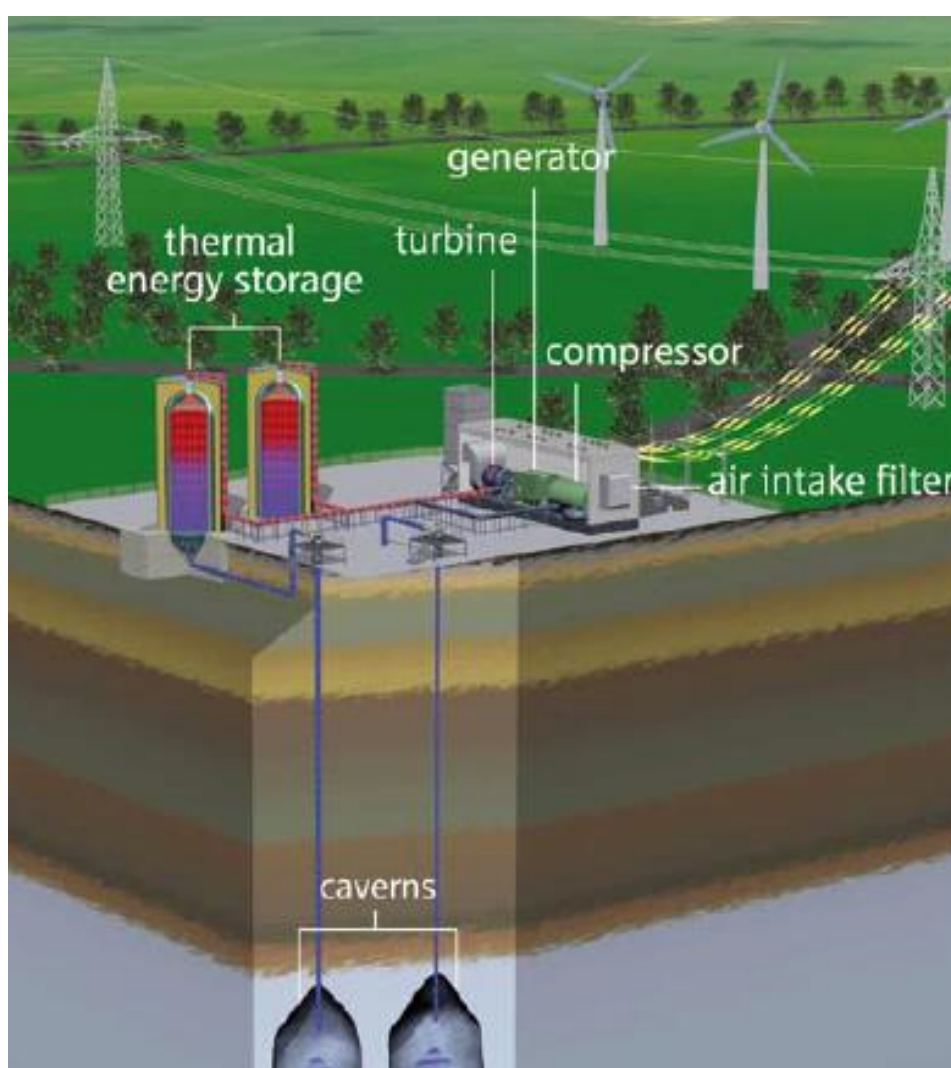


CAES - Adiabatic

Εικόνα 3.5 : Σύστημα AA-CAES με τη χρήση ελαίου ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, με ενδιάμεση ψύξη μεταξύ των συμπιέσεων. Πηγή: [47]

3.4 Το έργο ADELE

Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει ολοκληρωμένο σύστημα AA-CAES εν λειτουργία. Παρόλα αυτά, οι εταιρίες RWE, General Electric, Züblin και DLR μελετούν την κατασκευή του πρώτου συστήματος AA-CAES παγκοσμίως, με το έργο ADELE στη Γερμανία. Το έργο ξεκίνησε το 2010, και αναμένεται να ολοκληρωθεί τα επόμενα χρόνια. Μελέτες έχουν δείξει ότι ο βαθμός απόδοσης του συστήματος θα αγγίζει το 70%, καθιστώντας το πλήρως ανταγωνιστικό απέναντι στα συστήματα αντλησιοταμίευσης. Το σύστημα αναμένεται να έχει αποθηκευτική ικανότητα 360MWh με παραγωγή 90MW ηλεκτρικής ισχύος. Η φάση ανάπτυξης του έργου ADELE στηρίχθηκε από το υπουργείο οικονομικών της Γερμανίας, λαμβάνοντας χρηματοδότηση 12 εκατομμυρίων ευρώ το 2013, από το πρόγραμμα COORETEC [20].



Εικόνα 3.6 : Σχηματική απεικόνιση του έργου ADELE. Πηγή: [48]

Το έργο αυτό αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 3.6. Ο αέρας αναμένεται να συμπιέζεται σε πιέσεις έως 100 bar, και θα εισάγεται στην συσκευή αποθήκευσης θερμότητας για να συγκρατηθεί η θερμότητα της συμπίεσης. Η συσκευή αυτή θα αποτελείται από δεξαμενές που περιέχουν στερεά υλικά ως μέσα αποθήκευσης

θερμότητας (πέτρες ή κεραμικά υλικά σε μορφοποίηση τούβλων), και θα έχει ύψος περίπου 40 μέτρα. Στη συνέχεια, ο ψυχρός πλέον αέρας θα αποθηκεύεται σε υπόγειες κοιλότητες. Η διαδικασία αυτή θα διεξάγεται αντίστροφα κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης στους στρόβιλους, με τον αέρα να θερμαίνεται από τη συσκευή αποθήκευσης θερμότητας πριν εκτονωθεί.

Τα προβλήματα στα οποία οι σχεδιαστές καλούνται να δώσουν λύση για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος είναι πολλά. Καταρχάς, εάν δεν χρησιμοποιηθεί ενδιάμεση ψύξη στη συμπίεση, η θερμοκρασία εντός του συμπιεστή μπορεί να φτάσει τους 600°C, σε πίεση 100 bar, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει αστοχία του συμπιεστή ή άλλων μηχανημάτων. Επομένως, πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλος συμπιεστής με μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Επίσης, η συσκευή αποθήκευσης θερμότητας απαιτείται να αντέχει σε κυκλικές καταπονήσεις πίεσης και θερμοκρασίας, να έχει πολύ υψηλών προδιαγραφών μόνωση, και να περιβάλλεται από μια εξωτερική κατασκευή ικανή να αντέξει τις πολύ υψηλές πιέσεις που αναπτύσσονται. Για την κοιλότητα αποθήκευσης αέρα τα κύρια προβλήματα από άποψη αντοχής είναι η συχνή διακύμανση της πίεσης λόγω φόρτισης-εκφόρτισης και τα προβλήματα διάβρωσης εξαρτημάτων που βρίσκονται εντός αυτής (π.χ. σωληνώσεων), λόγω της υγρασίας. Η τοποθεσία και η γεωλογία της κοιλότητας επίσης, είναι ακόμα ένα ζήτημα που πρέπει να διερευνηθεί εκτενώς. Τέλος, για το κομμάτι της εκτόνωσης, στρόβιλοι ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας, όπως αεριοστρόβιλοι, δεν είναι συμβατοί με τόσο υψηλή πίεση εισόδου, αλλά ούτε με την αποδοτική διαχείριση διακυμάνσεων της πίεσης εισόδου, το οποίο είναι ένα πολύ σύνηθες γεγονός στη φάση της εκφόρτισης ενός συστήματος AA-CAES. Επομένως, νέοι στρόβιλοι πρέπει να σχεδιαστούν ώστε η απόδοση του συστήματος να είναι η επιθυμητή [48].

3.5 Ανασκόπηση ερευνών στα συστήματα AA-CAES

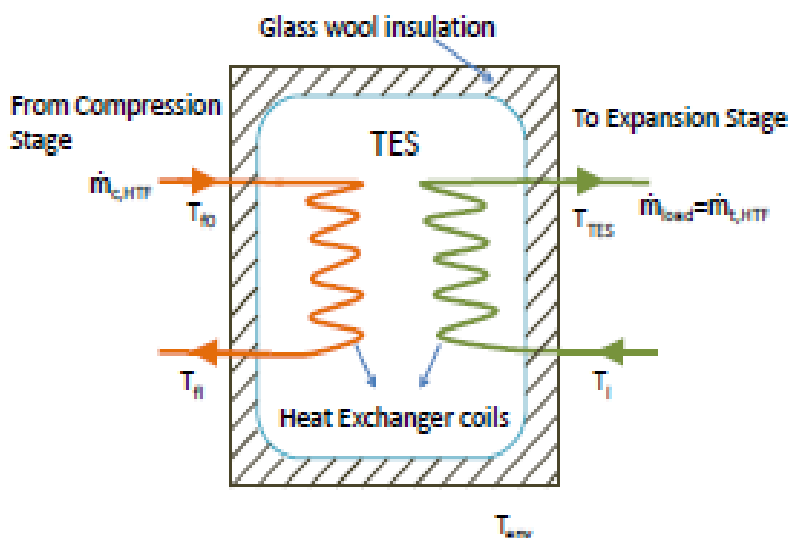
Τα συστήματα AA-CAES παρουσιάζουν ενδιαφέρον για πολλούς ερευνητές, και υπάρχουν αρκετές δημοσιευμένες έρευνες τα τελευταία χρόνια σχετικές με τα συστήματα αυτά. Επίσης, υπάρχουν πολλές διαφορετικές ιδέες περί της διάταξης τους και του τρόπου αποθήκευσης της θερμότητας. Οι συνηθέστερες διατάξεις που μελετώνται είναι τα AA-CAES στα οποία η θερμότητα της συμπίεσης αποθηκεύεται σε κάποιο στερεό υλικό, συνήθως ερχόμενο σε άμεση επαφή με τον συμπιεσμένο αέρα αέρα, και αυτά στα οποία η αποθήκευση της θερμότητας γίνεται σε υγρό μέσο μεταφοράς θερμότητας (συνήθως θερμικού ελαίου). Επίσης, εξετάζονται και τα AA-CAES χαμηλής θερμοκρασίας, στα οποία χρησιμοποιείται πεπιεσμένο νερό ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τεχνολογικές προσεγγίσεις και τα αποτελέσματα επιλεγμένων δημοσιευμένων ερευνών πάνω στα συστήματα AA-CAES.

3.5.1 AA-CAES με αποθήκευση θερμότητας σε στερεό μέσο

Αρκετές έρευνες για συστήματα AA-CAES που αποθηκεύουν τη θερμότητα συμπίεσης σε στερεό υλικό έχουν πραγματοποιηθεί. Στην [14] μελετάται ένα AA-CAES με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (TES) στερεού υλικού, με το οποίο ο αέρας έρχεται σε άμεση επαφή. Μελετήθηκαν διαφορετικές διαμορφώσεις: η συμπίεση να γίνεται σε ένα, δύο και τρία στάδια, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται

εναλλάκτες θερμότητας για την ψύξη του αέρα. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος υπολογίστηκε περίπου στο 60%. Σύμφωνα με τη μελέτη, ζωτικής σημασίας για την αύξηση του βαθμού απόδοσης είναι η κατασκευή δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών (>600°C) και η κατασκευή συμπιεστών με αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης παρατηρήθηκε στο διβάθμιο σύστημα AA-CAES, και είναι 52-62%, ανάλογα με τις ανάγκες ψύξης του αέρα πριν την είσοδό του στην κοιλότητα αποθήκευσης, και τις ανάγκες θέρμανσής του κατά την έξοδό του από αυτή. Η αύξηση του βαθμού απόδοσης στο διβάθμιο σε σχέση με το μονοβάθμιο σύστημα αγγίζει το 10%.

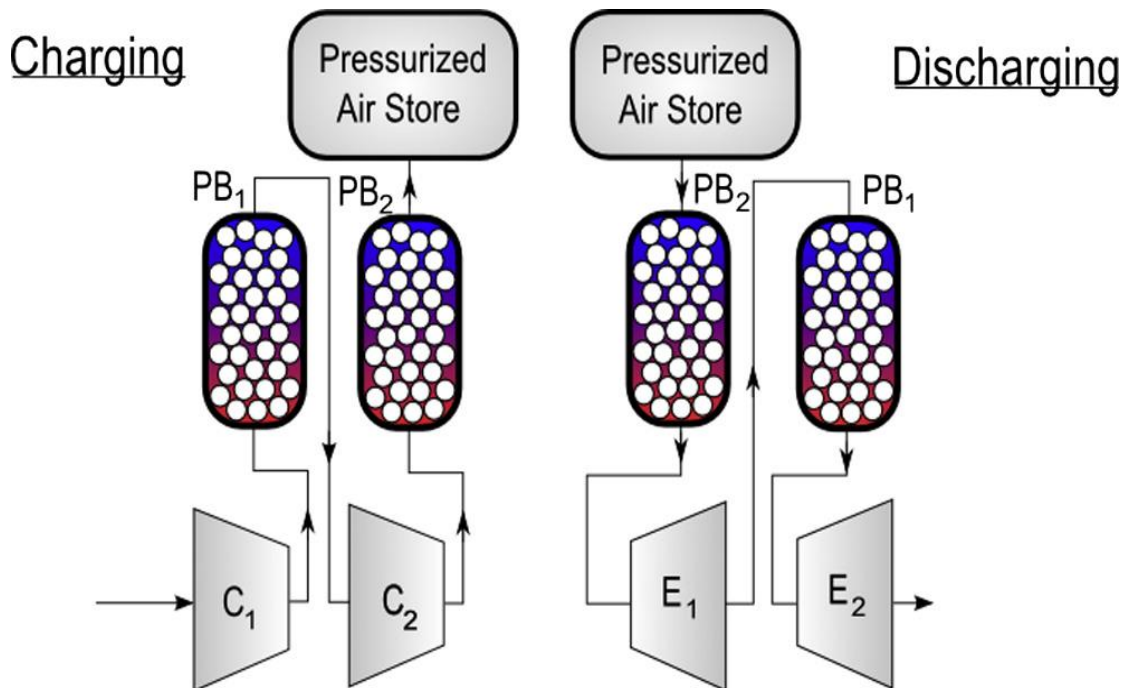
Ένα παρόμοιο σύστημα στο οποίο η θερμότητα της συμπίεσης αποθηκεύεται σε δεξαμενή από στερεό υλικό (σκυρόδεμα) μελετάται στην [49]. Η συμπίεση γίνεται σε τέσσερα στάδια, και η εκτόνωση σε δύο. Η διαφορά εδώ είναι, ότι μετά από το κάθε στάδιο συμπίεσης η θερμότητα του αέρα ανακτάται μέσω ενός εναλλάκτη αέρα-λαδιού, επομένως δεν υπάρχει άμεση επαφή του αέρα με το σκυρόδεμα. Το θερμό λάδι στη συνέχεια, διέρχεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας μέσω σωληνώσεων, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του σκυροδέματος. Το αντίστροφο συμβαίνει κατά την εκτόνωση. Στην Εικόνα 3.7 φαίνεται σχηματικά η συγκεκριμένη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας. Ο αέρας αποθηκεύεται σε μια υπόγεια δεξαμενή αλατούχου ορίζοντα στις προδιαγραφές της μονάδας του McIntosh (560.000m³). Η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για τη φόρτιση του συστήματος είναι 64MW, η ισχύς που παράγεται κατά την εκτόνωση 85MW, ενώ ο βαθμός απόδοσης της μονάδας υπολογίστηκε στο 57%.



Εικόνα 3.7 : Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιείται στην [49]

Μια άλλη μορφοποίηση συσκευής αποθήκευσης θερμότητας σε στερεά υλικά που ερευνάται είναι οι κλίνες με πορώδη στερεά υλικά ως αναγεννητές (packed bed regenerators). Στην [50] μελετάται ένα σύστημα AA-CAES στο οποίο η αποθήκευση θερμότητας της συμπίεσης γίνεται σε τέτοιες κλίνες. Συγκεκριμένα, οι κλίνες αυτές είναι στήλες από πορώδη υλικά, με τα οποία ο συμπιεσμένος αέρας έρχεται σε άμεση επαφή και εναποθέτει τη θερμότητά του, αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους. Η θερμοκρασία δεν είναι σταθερή σε όλο το ύψος της στήλης, καθώς μειώνεται κατά

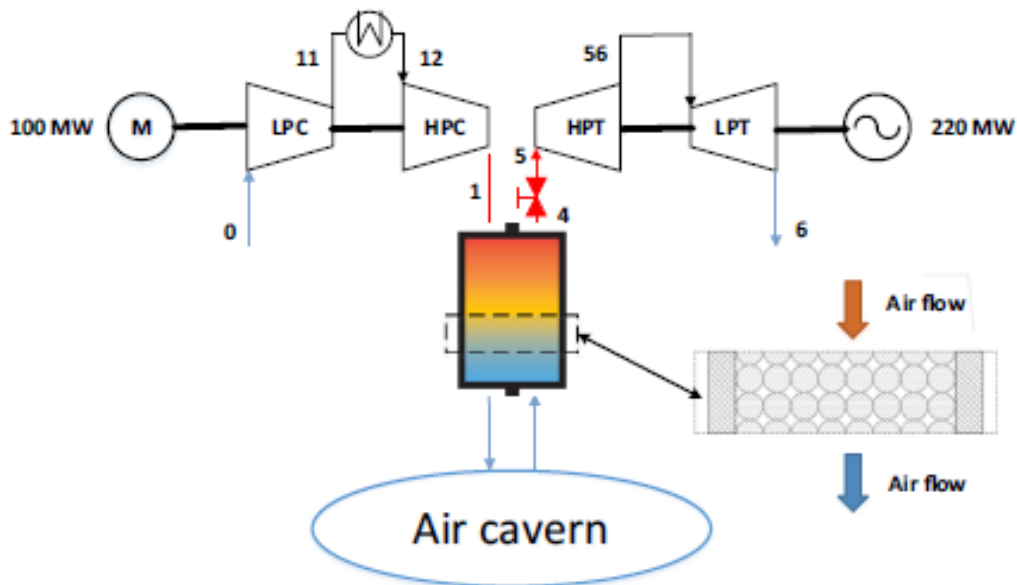
μήκος της διαδρομής που διανύει ο αέρας από την έξοδο του συμπιεστή προς την είσοδο της κοιλότητας αποθήκευσης του αέρα. Το σύστημα συμπίεσης αλλά και εκτόνωσης είναι διβάθμιο και λειτουργεί με δύο τέτοιες κλίνες αποθήκευσης θερμότητας. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίστηκε ότι μπορεί να φτάσει το 70%.



Εικόνα 3.8 : Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος με αναγεννητικές κλίνες πορωδών υλικών (packed bed regenerators) που μελετάται στην [50]

Η έρευνα [51] ασχολείται με τη δυναμική μοντελοποίηση ενός παρόμοιου συστήματος AA-CAES με μια κλίνη με πετρώματα ως δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας. Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.9. Η συμπίεση και η εκτόνωση γίνονται σε δύο στάδια, και ενδιάμεση ψύξη παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο σταδίων συμπίεσης. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίστηκε ανάμεσα στο 60-70%, όταν η απόδοση του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (TES) είναι πάνω από 90%. Τα επιπλέον συμπεράσματα που εξήχθησαν ήταν ότι:

- i) Η μέγιστη απόδοση του συστήματος παρατηρείται όταν τα θερμοκρασιακά προφίλ στο TES σταθεροποιηθούν.
- ii) Η απόδοση του AA-CAES φθίνει προς το τέλος της εκφόρτισης, λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του TES.
- iii) Η μείωση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το TES κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης αναγκάζει το στρόβιλο να λειτουργήσει σε συνθήκες εκτός σημείου σχεδίασης, προκαλώντας αύξηση της ροής μάζας του αέρα.
- iv) Οι συνθήκες λειτουργίας των συμπιεστών αποκλίνουν σημαντικά από το σημείο σχεδίασης τους, γεγονός το οποίο επηρεάζει τα θερμοκρασιακά προφίλ που αναπτύσσονται στο TES.



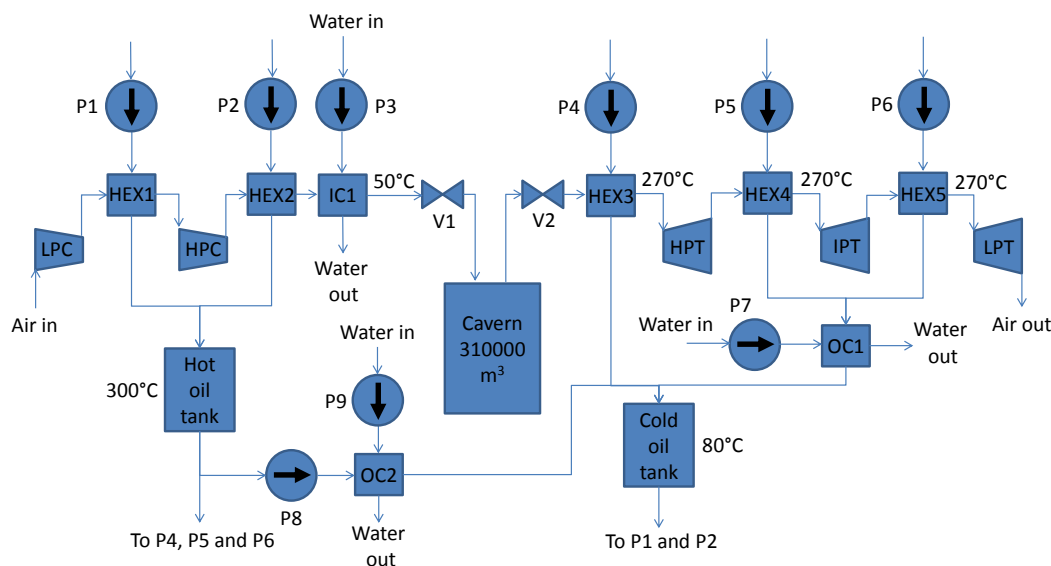
Εικόνα 3.9 : Διάταξη συστήματος AA-CAES που μελετάται στην [51]

3.5.2 AA-CAES με αποθήκευση θερμότητας σε υγρό μέσο

Σε ένα μεγάλο κλάσμα των ερευνών σχετικά με τα AA-CAES χρησιμοποιείται υγρό μέσο αποθήκευσης θερμότητας της συμπίεσης. Στην δημοσίευση [52] μελετώνται τέσσερις διαφορετικές διατάξεις συστημάτων AA-CAES, και επιχειρείται μια τεχνοοικονομική σύγκριση ανάμεσα στην αποθήκευση θερμότητας με στερεό και σε αυτή με υγρό μέσο μεταφοράς. Η πρώτη διάταξη που μελετάται αποτελείται από ένα συμπιεστή και ένα στρόβιλο, χωρίς ενδιάμεσες ψύξεις και αναθερμάνσεις. Στη δεύτερη και στην τρίτη διάταξη το σύστημα είναι διβάθμιο και τριβάθμιο αντίστοιχα, με ενδιάμεσες ψύξεις στη συμπίεση και αναθερμάνσεις στην εκτόνωση. Στις τρεις διατάξεις αυτές χρησιμοποιείται δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας στερεού μέσου, με το οποίο ο αέρας έρχεται σε άμεση επαφή. Η τέταρτη διάταξη αποτελείται από ένα διβάθμιο σύστημα AA-CAES με μέσο αποθήκευσης θερμότητας (heat transfer fluid – HTF) βιομηχανικό έλαιο. Το έλαιο ρέει από μια ψυχρή σε μια θερμή δεξαμενή κατά τη φόρτιση του συστήματος, ψύχοντας μέσω εναλλακτών τον αέρα, και η αντίστροφη διαδικασία διενεργείται κατά την εκφόρτιση. Το συμπέρασμα της σύγκρισης των διατάξεων ήταν ότι παρόλο που εκείνες με αποθήκευση θερμότητας σε στερεό μέσο παρουσίαζαν ελαφρώς καλύτερη απόδοση, το υψηλό κόστος και οι κατασκευαστικές και λειτουργικές προκλήσεις που παρουσιάζουν προκαλούν αβεβαιότητα, αν ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι υπάρχει έλλειψη βιομηχανικής εμπειρίας σε αυτή την τεχνολογία. Αντιθέτως, η αποθήκευση θερμότητας σε θερμικά έλαια είναι βασισμένη σε βιομηχανικά εφαρμοσμένες τεχνολογίες και είναι σχετικά οικονομικότερη, εξαρτώμενη μόνο από την τιμή του βιομηχανικού ελαίου που θα χρησιμοποιηθεί και αυτή των εναλλακτών θερμότητας. Επομένως, από άποψη βιομηχανικής διαθεσιμότητας και χαμηλού κόστους κεφαλαίου προτείνεται η χρήση TES με θερμικό έλαιο ως μέσο μεταφοράς θερμότητας.

Στην [53] γίνεται μια ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος, μέσω ενός μοντέλου δυναμικής προσομοίωσης. Ως μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το βιομηχανικό έλαιο Therminol 55. Η συμπίεση πραγματοποιείται σε δύο στάδια, η εκτόνωση σε τρία, ενώ η θερμοκρασία της θερμής

δεξαμενή λαδιού είναι 300°C και της ψυχρής 80°C. Ο αέρας αποθηκεύεται μεταξύ των πιέσεων 43-70 bar, και πριν το στρόβιλο χρησιμοποιείται στραγγαλιστική βαλβίδα που σταθεροποιεί την πίεση εισόδου στον πρώτο στρόβιλο στα 43 bar καθ'όλη τη διάρκεια της εκτόνωσης, παρόλο που αυτό προκαλεί μια αναπόφευκτη μείωση της απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος υπολογίστηκε στο 50%. Στην εικόνα 3.10 παρουσιάζεται σχηματικά η διάταξη του συστήματος.



Εικόνα 3.10 : Διάταξη του AA-CAES που μελετήθηκε στην [53]

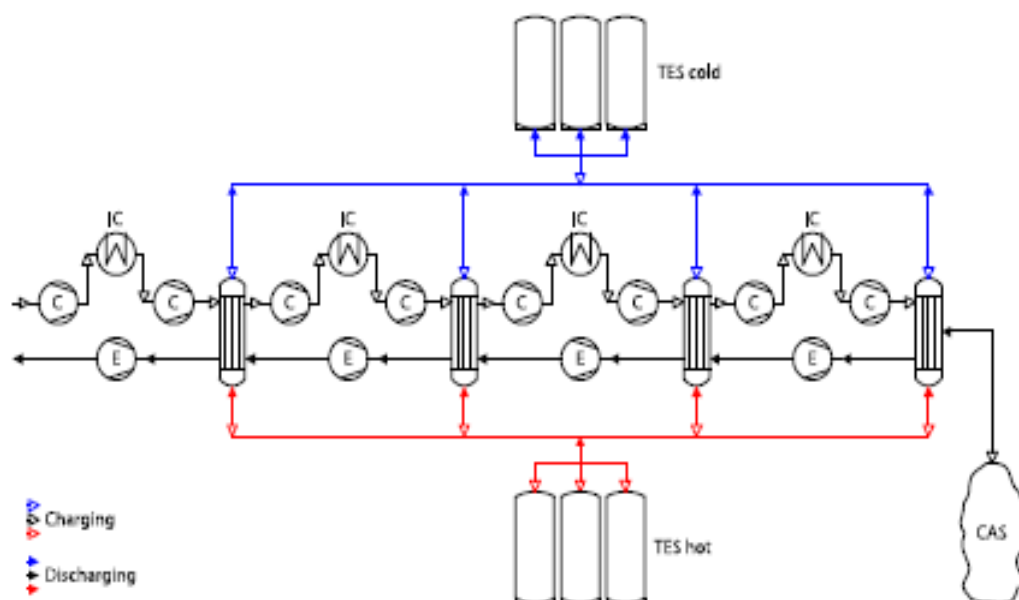
Μια παρόμοια μελέτη παρουσιάζεται στην [54]. Χρησιμοποιήθηκε και πάλι το βιομηχανικό έλαιο Therminol VP1 ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, το οποίο αποθηκεύεται σε μια θερμή και μια ψυχρή δεξαμενή. Η συμπίεση έγινε σε τέσσερα στάδια, και μετά από το κάθε στάδιο εκτός του πρώτου ο αέρας διέρχεται από εναλλάκτες θερμότητας αέρα-λαδιού ώστε να ψυχθεί. Η εκτόνωση πραγματοποιείται σε δύο στάδια, με προθέρμανση του αέρα πριν κάθε ένα από αυτά. Η συμπίεση διαρκεί 7,8 ώρες και απαιτεί 60MW ηλεκτρική ισχύ, και η εκτόνωση 2,3 ώρες, παράγοντας ισχύ 110MW. Τα όρια πιέσεων αποθήκευσης του αέρα στη δεξαμενή είναι 70-100 bar, ενώ μεταξύ του τέλους της συμπίεσης και της αρχής της εκτόνωσης μεσολαβεί ένα διάστημα 12 ωρών κατά το οποίο το σύστημα είναι ανενεργό. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος AA-CAES προέκυψε 55.4%.

3.5.3 AA-CAES χαμηλής θερμοκρασίας (LTA-CAES)

Οι περισσότερες έρευνες στα συστήματα AA-CAES στοχεύουν στην αποθήκευση της θερμότητας της συμπίεσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την υψηλή πίεση του συμπιεσμένου αέρα, χαρακτηριστικό όλων των συστημάτων AA-CAES, δημιουργεί σχεδιαστικές προκλήσεις για το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και για τις στροβιλομηχανές. Πρόσφατα έχουν διενεργηθεί μελέτες για συστήματα AA-CAES χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Adiabatic Compressed Air Energy Storage – LTA-CAES), προκειμένου να αποφευχθεί ο συνδυασμός υψηλής θερμοκρασιακής φόρτισης και υψηλής πίεσης.

Η δημοσιευμένη έρευνα [55] παρουσιάζει ένα τέτοιο σύστημα. Η θερμοκρασία στο TES κυμαίνεται από 90-200°C, όντας εμφανώς χαμηλότερη από τα AA-CAES υψηλής θερμοκρασίας. Η αποθήκευση της θερμότητας γίνεται είτε σε πεπιεσμένο νερό είτε σε θερμικό έλαιο. Η διάταξη αποτελείται από οκτώ στάδια συμπίεσης και τέσσερα στάδια εκτόνωσης, και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.11. Ο βαθμός απόδοσης κυμάνθηκε μεταξύ 52-60%. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει μια τέτοια διάταξη σύμφωνα με την έρευνα ήταν:

- i) Ο χρόνος μεταβατικής λειτουργίας του συστήματος ήταν πολύ μικρός, συγκεκριμένα μικρότερος από 5 λεπτά.
- ii) Είναι δυνατή η χρήση πεπιεσμένου νερού ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας, γεγονός που καθιστά πολύ οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική τη λειτουργία του συστήματος.
- iii) Δεν υπάρχει άμεση επαφή του αέρα με το μέσο μεταφοράς θερμότητας, αποφεύγοντας φαινόμενα εισχώρησης ξένων σωματιδίων στο ρεύμα του αέρα.
- iv) Ευρύ πεδίο λειτουργίας και καλή λειτουργία σε συνθήκες μερικού φορτίου
- v) Δυνατότητα επίτευξης υψηλών πιέσεων αποθήκευσης του αέρα (>150 bar), γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα του συστήματος.



Εικόνα 3.11 : Διάταξη AA-CAES χαμηλής θερμοκρασίας. Πηγή: [55]

Ένα ακόμα παράδειγμα έρευνας που ασχολείται με τα LTA-CAES είναι η [56]. Σε αυτή γίνεται ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση ενός τέτοιου συστήματος. Συμπεραίνεται ότι τη μεγαλύτερη επιρροή ασκούν οι βαθμοί απόδοσης των στροβιλομηχανών, και ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας στο TES. Επίσης, η αύξηση των βαθμίδων συμπίεσης και εκτόνωσης μπορούν να αυξήσουν την απόδοση του συστήματος, χωρίς αυτό να σημαίνει όμως ότι μπορούν να υπάρχουν απεριόριστες βαθμίδες. Επιπλέον, η ρύθμιση της παροχής μάζας του αέρα που συμπιέζεται και εκτονώνεται επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Η μελέτη έδειξε ότι τέτοια συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν με απόδοση έως 68%.

4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (AA-CAES)

Όπως έγινε αντιληπτό στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα αδιαβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES) αποτελούν μια ανανεώσιμη τεχνολογία αποθήκευσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας με υψηλή απόδοση, και με αμελητέες περιβαλλοντικές παρεμβάσεις για την κατασκευή τους, σε αντίθεση με τις μονάδες αντλησιοταμίευσης. Παρόλο που είναι δεδομένο ότι τα AA-CAES θα απασχολήσουν πολύ την ενεργειακή βιομηχανία στο μέλλον, μέχρι τώρα δεν υπάρχει κάποια εγκατεστημένη μονάδα τους. Επομένως, δημιουργείται η ανάγκη μοντελοποίησης και προσομοίωσης ενός τέτοιου συστήματος προκειμένου να μελετηθεί η λειτουργία και η απόδοσή του. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παραδοχές, αλλά και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος.

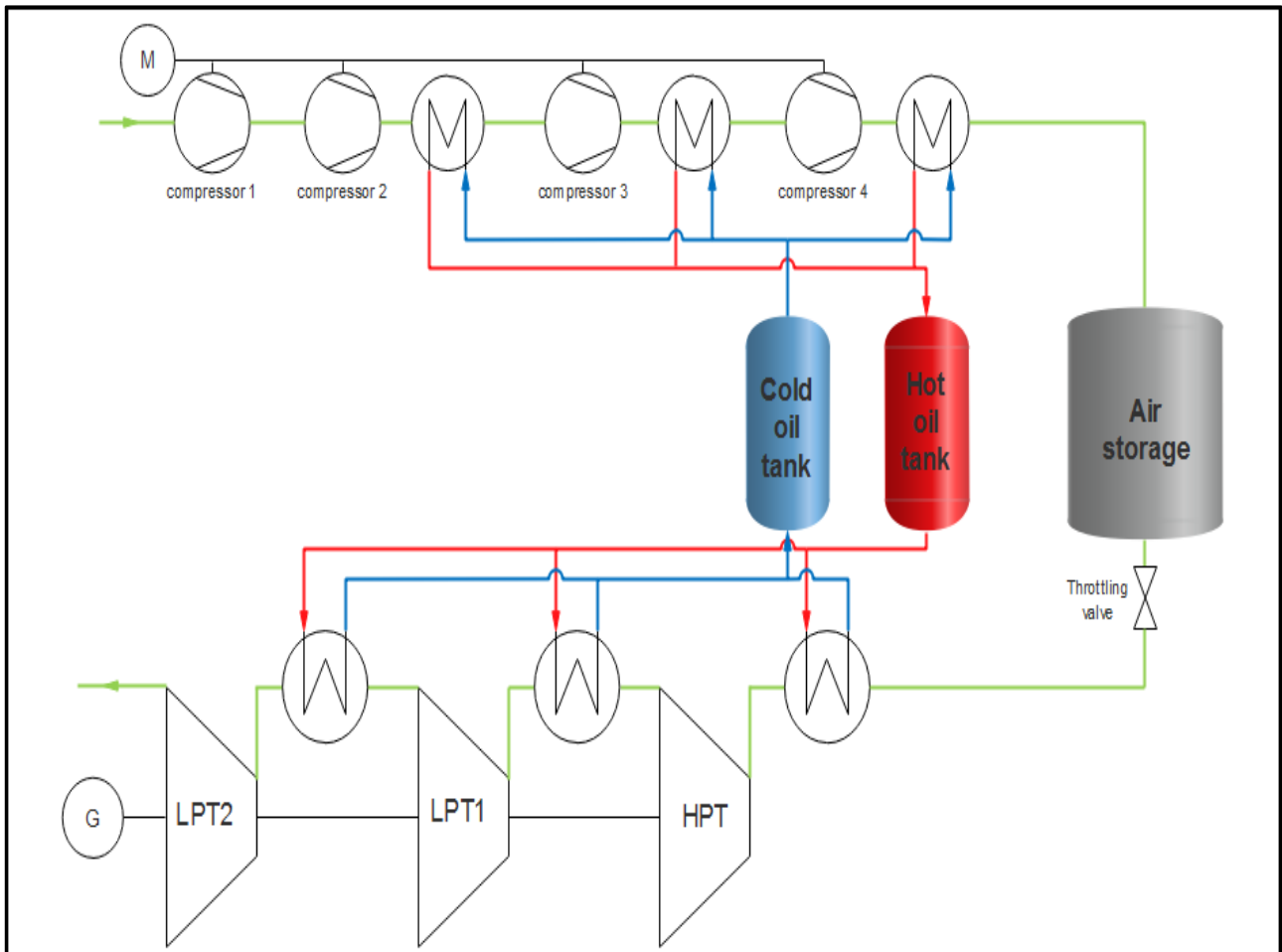
4.1 Περιγραφή διάταξης – Γενικές παραδοχές

Το σύστημα AA-CAES που μοντελοποιήθηκε αποτελείται από τέσσερις κύριες συνιστώσες: το σύστημα συμπίεσης, τη δεξαμενή αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και το σύστημα εκτόνωσης.

Κατά τη φόρτιση του συστήματος, ο αναρροφώμενος αέρας από το περιβάλλον συμπιέζεται διερχόμενος από τέσσερις συμπίεστες συνδεδεμένους εν σειρά. Στην έξοδό του από κάθε συμπίεστη, με εξαίρεση τον πρώτο, ψύχεται σε εναλλάκτες θερμότητας, προκειμένου να αποθηκευτεί η θερμότητά του στο μέσο μεταφοράς θερμότητας, μειώνοντας παράλληλα το απαιτούμενο έργο συμπίεσης, λόγω της ενδιάμεσης ψύξης του. Το μέσο αποθήκευσης θερμότητας, το οποίο είναι ένα βιομηχανικό έλαιο, ρέει κατά τη συμπίεση μέσω σωληνώσεων από μια ψυχρή δεξαμενή αποθήκευσης στους εναλλάκτες των συμπίεστων, και όταν εξέλθει από αυτούς αποθηκεύεται, θερμό πλέον, στη θερμή δεξαμενή αποθήκευσης. Ο αέρας, στην έξοδό του από τη διάταξη συμπίεσης, αποθηκεύεται σε θερμοκρασία κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος στη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα, η οποία είναι μια υπόγεια κοιλότητα αλατούχου ορίζοντα, όπως και στα εν λειτουργία συμβατικά συστήματα CAES του Huntorf και του McIntosh.

Κατά την εκφόρτιση του συστήματος, ο συμπιεσμένος αέρας στην υπόγεια κοιλότητα απελευθερώνεται και εκτονώνεται σε μια διάταξη τριών στροβίλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η διάταξη αυτή αποτελείται από το στρόβιλο υψηλής πίεσης (High Pressure Turbine – HPT), και τους δύο στροβίλους χαμηλής πίεσης (Low Pressure Turbines – LPT1 και LPT2). Ο αέρας θερμαίνεται πριν την είσοδό του σε κάθε έναν από τους στροβίλους σε εναλλάκτες θερμότητας, μέσω ροής του αποθηκευμένου θερμού ελαίου από τη θερμή δεξαμενή αποθήκευσης στους εναλλάκτες. Το έλαιο κατά την έξοδό του από τους εναλλάκτες των στροβίλων επιστρέφει στην ψυχρή δεξαμενή.

Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται παρακάτω, στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 : Διάταξη μελετούμενου συστήματος AA-CAES

Ο ρόλος του συστήματος AA-CAES είναι να φορτίζεται αντλώντας ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο τις ώρες χαμηλής ζήτησης ενέργειας (π.χ. κατά τη διάρκεια της νύχτας) ή από το πλεόνασμα της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (π.χ. από ένα αιολικό πάρκο πλησίον του), να αποθηκεύει την ενέργεια για κάποιο χρονικό διάστημα με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες, και να την επαναπροσδίδει στο δίκτυο τις ώρες αιχμής της ζήτησης ενέργειας. Το σύστημα μοντελοποιήθηκε με στόχο η διάρκεια ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας του να διαρκεί περίπου ένα 24ωρο. Η διάρκεια της φόρτισης του είναι επιθυμητό να διαρκεί περίπου 8 ώρες, και η διάρκεια της εκφόρτισης περίπου 4 ώρες. Κατά τη μοντελοποίηση, επιλέχθηκε μεταξύ του τέλους της φόρτισης και της αρχής της εκφόρτισης το σύστημα να παραμένει ανενεργό για ένα διάστημα αναμονής 12 ωρών, δηλαδή να συγκρατεί την αποθηκευμένη σε αυτό ενέργεια χωρίς να φορτίζεται, αλλά ούτε να εκφορτίζεται.

Ο αέρας αποθηκεύεται στην κοιλότητα αλατούχου οριζόντα μεταξύ δύο επιτρεπόμενων τιμών πιέσεων αποθήκευσης. Ως ελάχιστη επιτρεπόμενη πίεση στο σπήλαιο αποθήκευσης αέρα ορίστηκε η τιμή των 70 bar, ενώ ως μέγιστη τα 100 bar, καθώς αυτό το εύρος πιέσεων αποθήκευσης έχει επιλεγεί και για το έργο ADELE [54]. Επίσης, στην έξοδο του αέρα από την κοιλότητα αποθήκευσης, πριν την εκτόνωσή του, υπάρχει μια στραγγαλιστική βαλβίδα, η οποία είναι ρυθμισμένη να στραγγαλίζει τον αέρα στην ελάχιστη επιτρεπόμενη πίεση αποθήκευσης του, τα 70 bar. Αυτό συμβαίνει ώστε η πίεση εισόδου στους στροβίλους να παραμένει σταθερή, για να αποφεύγεται η λειτουργία τους σε συνθήκες εκτός σημείου σχεδίασης, γεγονός

που θα μείωνε την απόδοση του συστήματος και θα αύξανε σημαντικά την πιθανότητα αστοχίας τους.

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις απώλειες ενέργειας του συστήματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Καταρχάς, το σύστημα χάνει ενέργεια, λόγω απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, λήφθηκαν υπόψη τόσο οι απώλειες θερμότητας από τις δεξαμενές λαδιού προς το περιβάλλον, όσο και από τον αέρα εντός της υπόγειας κοιλότητας προς τα τοιχώματα της. Επιπλέον, προσμετρήθηκαν οι απώλειες ενέργειας στις ηλεκτρικές μηχανές μέσω του βαθμού απόδοσής τους, καθώς και οι απώλειες ενέργειας των στροβιλομηχανών λόγω της μη ισεντροπικής συμπεριφοράς τους, μέσω του πολυτροπικού τους βαθμού απόδοσης. Τυχόν απώλειες πίεσεως σε συσκευές όπως εναλλάκτες, δεξαμενή αέρα και σωληνώσεις δεν λήφθηκαν υπόψη κατά τη μοντελοποίηση. Επίσης, ο στραγγαλισμός του αέρα στην βαλβίδα πριν τους στροβίλους θεωρήθηκε ισηθαλπικός, επομένως χωρίς απώλειες ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (TES) αποτελείται από δύο δεξαμενές αποθήκευσης που περιέχουν το βιομηχανικό έλαιο, το οποίο αποτελεί το μέσο μεταφοράς θερμότητας του συστήματος. Το μέσο μεταφοράς θερμότητας πρέπει να διατηρείται σε υγρή μορφή καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του AA-CAES, επομένως να είναι υγρό σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι και την μέγιστη θερμοκρασία που αποκτά ο αέρας μετά τη συμπίεση. Σε περίπτωση που δεν συμβαίνει αυτό, τότε είναι απαραίτητη η ύπαρξη και δευτερεύοντος μέσου αποθήκευσης θερμότητας, έτσι ώστε να καλύπτεται το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Βέβαια η ύπαρξη δευτερεύοντος μέσου καθιστά το σύστημα πιο πολύπλοκο. Για τη μοντελοποίηση επιλέχθηκε ως μέσο μεταφοράς θερμότητας το βιομηχανικό έλαιο Therminol VP1, του οποίου το θερμοκρασιακό όριο λειτουργίας είναι 0-400°C, επιτρέποντας έτσι στο σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα σε θερμοκρασίες μέχρι 400°C. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του είναι 2309 J/kgK ενώ η μέση πυκνότητά του 817 kg/m³ [54]. Τα πλεονεκτήματά του είναι η χαμηλή συνεκτικότητα, το ότι δεν είναι τοξικό και η υψηλή θερμική σταθερότητά του.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας μοντελοποιήθηκε ως τέλειο αέριο με λόγο ειδικών θερμοχωρητικότητας $\gamma=1,4$, σταθερά αερίου $R_a=286,7$ J/kgK και σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση στο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας του συστήματος, $c_{p,a}=1050$ J/kgK. Οι τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος που χρησιμοποιήθηκαν είναι $p_{amb}=1,013 \cdot 10^5$ Pa και $T_{amb}=20^\circ\text{C}$.

Οι τιμές των παροχών μάζας αέρα των συμπιεστών και των στροβίλων επηρεάζουν το χρόνο φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος αντίστοιχα. Συνήθως, σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα ο λόγος ρυθμός φόρτισης/ρυθμός εκφόρτισης είναι σταθερός και προκαθορισμένος. Για παράδειγμα, στη μονάδα του Huntorf ο λόγος αυτός έχει την τιμή 1/2. Στο σύστημα AA-CAES που μοντελοποιήθηκε, ο λόγος αυτός έχει την ίδια τιμή. Συγκεκριμένα, το σύστημα λειτουργεί με σταθερή παροχή μάζας αέρα στους συμπιεστές και στους στροβίλους ίση με $\dot{m}_{a,c}=80$ kg/s και $\dot{m}_{a,t}=160$ kg/s αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζονται υπό τη μορφή πίνακα οι τιμές των γενικών παραμέτρων του μοντέλου. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων (π.χ. χαρακτηριστικά στροβιλομηχανών, δεξαμενής αέρα, συστήματος αποθήκευσης θερμότητας κ.λπ.) θα παρουσιαστούν στις αντίστοιχες ενότητες.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Χρόνος αναμονής συστήματος μεταξύ συμπίεσης-εκτόνωσης	H_{idle}	12	[h]
Ελάχιστη επιτρεπόμενη πίεση αποθήκευσης	p_{min}	70	[bar]
Μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση αποθήκευσης	p_{max}	100	[bar]
Ειδική σταθερά αέρα	R_a	286,7	[J/kgK]
Λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων αέρα	γ	1,4	[-]
Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα	$c_{p,a}$	1050	[J/kgK]
Πίεση περιβάλλοντος	p_{amb}	1,013	[bar]
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{amb}	20	[°C]
Λόγος παροχής αέρα προς συμπίεση/παροχή αέρα προς εκτόνωση	$\dot{m}_{a,c}/\dot{m}_{a,t}$	1/2	[-]
Παροχή αέρα συμπιεστών	$\dot{m}_{a,c}$	80	[kg/s]
Παροχή αέρα στροβίλων	$\dot{m}_{a,t}$	160	[kg/s]
Ειδική θερμοχωρητικότητα μέσου μεταφοράς θερμότητας (Therminol VP1)	$c_{p,HTF}$	2309	[J/kgK]
Πυκνότητα μέσου μεταφοράς θερμότητας (Therminol VP1)	den_{HTF}	817	[kg/m ³]

Πίνακας 4.1 : Τιμές γενικών παραμέτρων μοντέλου AA-CAES

4.2 Σύστημα συμπίεσης

Το σύστημα συμπίεσης του AA-CAES αποτελείται από μια διάταξη τεσσάρων συμπιεστών συνδεδεμένων σε κοινή άτρακτο, οι οποίοι λαμβάνουν κίνηση από έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Ο αέρας ψύχεται ενδιάμεσα των διαδοχικών συμπιέσεων του σε εναλλάκτες θερμότητας (με εξαίρεση μετά τον πρώτο συμπιεστή, όπου δεν ψύχεται), ώστε να αποθηκευτεί η θερμότητα της συμπίεσης του στο έλαιο που λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Fluid-HTF). Ο λόγος για τον οποίο ο αέρας δεν ψύχεται μετά τον πρώτο συμπιεστή είναι για να αποκτήσει μια αρκούντως υψηλή θερμοκρασία πριν αποδώσει τη θερμότητα συμπίεσής του, καθώς η θερμική απόδοση ενός συστήματος βελτιώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στην οποία αποθηκεύεται η θερμότητα. Επίσης, μετά την έξοδο του αέρα από τον τελευταίο συμπιεστή ο αέρας ψύχεται ξανά μέσω εναλλάκτη αέρα-ελαίου σε θερμοκρασία σχετικά κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος, καθώς λόγω των ιδιοτήτων της κοιλότητας αλατούχου ορίζοντα, ο αέρας δε μπορεί να αποθηκευτεί εντός αυτής σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η παροχή μάζας αέρα που διέρχεται από τους συμπιεστές είναι όπως αναφέρθηκε προηγουμένως σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια της συμπίεσης και ίση με $\dot{m}_{a,c}=80$ kg/s. Ο λόγος συμπίεσης των συμπιεστών κατά τη διάρκεια της φόρτισης του συστήματος δεν είναι σταθερός, καθώς ο αέρας αποθηκεύεται μεταξύ των πιέσεων 70-100 bar. Επιλέχθηκε ίσος λόγος συμπίεσης και για τους τέσσερις συμπιεστές, επομένως αυτός μεταβάλλεται σε κάθε συμπιεστή από την τιμή $b_{c,min} = \sqrt[4]{\frac{p_{min}}{p_{amb}}} = \sqrt[4]{\frac{70}{1,013}} = 2,88$ (στην έναρξη της συμπίεσης) μέχρι $b_{c,max} = \sqrt[4]{\frac{p_{max}}{p_{amb}}} = \sqrt[4]{\frac{100}{1,013}} = 3,15$ (στο τέλος της συμπίεσης). Ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης των συμπιεστών γενικά κυμαίνεται από 80-90%. Κατά τη μοντελοποίηση επιλέχθηκε μια μέση τιμή $\eta_{p,c}=85\%$, κοινή και για τους τέσσερις συμπιεστές. Σημειώνεται ότι για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο πολυτροπικός βαθμός συμπίεσης και όχι ο ισεντροπικός, καθώς ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης είναι ανεξάρτητος της τιμής του λόγου συμπίεσης.

Η πίεση του αέρα στην έξοδο του από κάθε συμπιεστή κατά τη διάρκεια της συμπίεσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_{out,c} = p_{in,c} \cdot b_c \quad (5)$$

Όπου $p_{out,c}$ και $p_{in,c}$ οι πιέσεις εξόδου και εισόδου του αέρα αντίστοιχα, και b_c ο τρέχων λόγος πίεσης του συμπιεστή. Προφανώς, η πίεση εισόδου για κάθε επόμενο συμπιεστή ισούται με την πίεση εξόδου του προηγούμενου του, καθώς αμελούνται οι απώλειες πιέσεως στους εναλλάκτες.

Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από κάθε συμπιεστή υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης της πολυτροπικής μεταβολής για τέλεια αέρια, η οποία γράφεται εδώ στη μορφή:

$$T_{out,c} = T_{in,c} \cdot b_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma \cdot \eta_{p,c}}} \quad (6)$$

$T_{out,c}$ και $T_{in,c}$ είναι οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου του αέρα αντίστοιχα, γ ο λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων του αέρα και $n_{p,c}$ ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης των συμπιεστών.

Η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς από κάθε συμπιεστή υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$P_{el,c} = \frac{1}{n_m} \cdot \dot{m}_{a,c} \cdot c_{p,a} \cdot (T_{out,c} - T_{in,c}) \quad (7)$$

Όπου n_m ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα που κινεί την άτρακτο των συμπιεστών και εκφράζει το ποσοστό μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται σε μηχανική ισχύ της άτρακτου. Επιλέχθηκε $n_m = 99\%$.

Μετά την έξοδο του από κάθε συμπιεστή εκτός του πρώτου, ο αέρας εισέρχεται σε εναλλάκτη θερμότητας για να αποδώσει τη θερμότητά του στο λάδι. Ο βαθμός απόδοσης κάθε εναλλάκτη του σταδίου συμπίεσης λήφθηκε $n_{HX,c}=80\%$, και ορίζεται ως:

$$n_{HX,c} = \frac{T_{a,in} - T_{a,out}}{T_{a,in} - T_{HTF,in,c}} \quad (8)$$

Όπου $T_{a,in}$ και $T_{a,out}$ η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου αντίστοιχα του αέρα από τον εναλλάκτη, και $T_{HTF,in,c}$ η θερμοκρασία εισόδου του λαδιού στον εναλλάκτη της συμπίεσης. Ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη εκφράζει το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται από τον αέρα στο λάδι προς το μέγιστο ποσό θερμότητας που είναι θεωρητικά δυνατό να μεταφερθεί. Οι τρεις εναλλάκτες της διάταξης συμπίεσης είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, επομένως η $T_{HTF,in,c}$ είναι η ίδια για κάθε εναλλάκτη, και ισούται με τη θερμοκρασία της ψυχρής δεξαμενής λαδιού. Από τη σχέση (8) υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη. Προκύπτει ότι:

$$T_{a,out} = T_{a,in} - n_{HX,c} \cdot (T_{a,in} - T_{HTF,in,c}) \quad (9)$$

Η θερμοκρασία εξόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από τις ιδιότητες του εναλλάκτη. Στο παρόν μοντέλο θεωρήθηκε ότι η τελική θερμοκρασιακή διαφορά (Terminal Temperature Difference) των δύο ρευστών είναι 10°C , επομένως για την θερμοκρασία εξόδου του λαδιού, $T_{HTF,out,c}$ ισχύει:

$$T_{HTF,out,c} = T_{a,in} - 10^\circ\text{C} \quad (10)$$

Η απαιτούμενη ροή μάζας του μέσου μεταφοράς θερμότητας από τον κάθε εναλλάκτη, $\dot{m}_{HTF,c}$ υπολογίζεται μέσω του ισολογισμού θερμότητας σε αυτόν. Προκύπτει ότι:

$$\dot{m}_{HTF,c} = \frac{\dot{m}_{a,c} \cdot c_{p,a} \cdot (T_{a,in} - T_{a,out})}{c_{p,HTF} \cdot (T_{HTF,out,c} - T_{HTF,in,c})} \quad (11)$$

Σημειώνεται ότι ο έλεγχος της ροής μάζας του λαδιού από την ψυχρή δεξαμενή προς τους εναλλάκτες του συμπιεστή γίνεται μέσω ελεγκτών, οι οποίοι ρυθμίζουν την παροχή αυτή στην επιθυμητή ποσότητα.

Τέλος, τα τρία ρεύματα θερμού λαδιού, μετά την έξοδό τους από τους εναλλάκτες του σταδίου συμπίεσης θεωρήθηκε ότι αναμιγνύονται χωρίς συναλλαγή θερμότητας, και εισέρχονται στη θερμή δεξαμενή λαδιού. Η συνολική ροή μάζας του λαδιού που εισέρχεται στη θερμή δεξαμενή είναι το άθροισμα των τριών επιμέρους παροχών εξόδου λαδιού από τους εναλλάκτες, δηλαδή:

$$\dot{m}_{HTF,c,tot} = \dot{m}_{HTF,c2} + \dot{m}_{HTF,c3} + \dot{m}_{HTF,c4} \quad (12)$$

Όπου $\dot{m}_{HTF,c,tot}$ η συνολική παροχή θερμού λαδιού που οδηγείται στη θερμή δεξαμενή αποθήκευσης και $\dot{m}_{HTF,c2}$, $\dot{m}_{HTF,c3}$, $\dot{m}_{HTF,c4}$ οι παροχές θερμού λαδιού στην έξοδο των εναλλακτών μετά τον δεύτερο, τρίτο και τέταρτο συμπιεστή αντίστοιχα.

Η θερμοκρασία του συνολικού ρεύματος λαδιού δίνεται από την εξίσωση της αδιαβατικής ανάμιξης των τριών ρευμάτων:

$$T_{HTF,c,tot} = \frac{\dot{m}_{HTF,c2} \cdot T_{HTF,out,c2} + \dot{m}_{HTF,c3} \cdot T_{HTF,out,c3} + \dot{m}_{HTF,c4} \cdot T_{HTF,out,c4}}{\dot{m}_{HTF,c,tot}} \quad (13)$$

Με $T_{HTF,out,c2}$, $T_{HTF,out,c3}$ και $T_{HTF,out,c4}$ συμβολίζεται η θερμοκρασία εξόδου του λαδιού από τον εναλλάκτη μετά τον δεύτερο, τρίτο και τέταρτο συμπιεστή αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 4.2 συνοψίζονται οι τιμές των παραμέτρων της διάταξης συμπίεσης:

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Παροχή αέρα συμπιεστών	$\dot{m}_{a,c}$	80	[kg/s]
Εύρος λόγου πίεσης κάθε συμπιεστή	b_c	2,88-3,15	[-]
Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστών	$n_{p,c}$	0,85	[-]
Βαθμός απόδοσης κινητήρα	n_m	0,99	[-]
Βαθμός απόδοσης εναλλακτών σταδίου συμπίεσης	$n_{HX,c}$	0,80	[-]
Τελική θερμοκρασιακή διαφορά εναλλακτών συμπίεσης	TTD_c	10	[°C]

Πίνακας 4.2 : Τιμές παραμέτρων διάταξης συμπίεσης

4.3 Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Στην παρούσα υποενότητα περιγράφεται η διαδικασία, αλλά και οι παραδοχές που έγιναν για τη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το σύστημα αποθήκευσης του αέρα αποτελείται από μια υπόγεια κοιλότητα αλατούχου ορίζοντα (salt cavern). Ο όγκος της κοιλότητας επιλέχθηκε να είναι $V_c=100.000 \text{ m}^3$, και η κοιλότητα θεωρήθηκε κυλινδρικού σχήματος, με ύψος $H_c=100 \text{ m}$. Θεωρήθηκε επίσης ότι τα τοιχώματα του σπηλαιού καλύπτονται από NaCl, το οποίο έχει ειδική θερμοχωρητικότητα $c_{p,r}=920 \text{ J/kgK}$ [49], πυκνότητα $den_r=2200 \text{ kg/m}^3$ και θερμική αγωγιμότητα $k_r=5 \text{ W/mK}$ [57].

Οι παραδοχές που έγιναν για τη μοντελοποίηση της κοιλότητας αποθήκευσης αέρα είναι οι εξής:

i) Η συμπιεστότητα των τοιχωμάτων άλατος θεωρήθηκε αμελητέα σε σχέση με αυτή του αέρα που βρίσκεται εντός της κοιλότητας, συνεπώς ο όγκος αποθήκευσης είναι σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

ii) Η ροή του αέρα κατά τη διάρκεια της εισροής και εκροής του αέρα από την κοιλότητα θεωρήθηκε τυρβώδης, επομένως οι μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης είναι αρκετά μικρές. Έτσι, η θερμοκρασία T_c και η πίεση p_c του αέρα εντός της κοιλότητας, όπως και όλες του οι ιδιότητες, θεωρούνται ομοιόμορφες σε όλη την έκτασή της, εξαρτώμενες μόνο από το χρόνο.

iii) Οι ενεργειακές απώλειες του συστήματος είναι οι απώλειες θερμότητας του αέρα εντός της κοιλότητας προς τα τοιχώματα της. Η μεταφορά θερμότητας από τον αέρα προς τα τοιχώματα θεωρήθηκε ότι γίνεται μόνο μέσω αγωγής, λόγω της υπόθεσης ότι ο αποθηκευμένος συμπιεσμένος αέρας στην κοιλότητα έχει πολύ μικρή ταχύτητα, ώστε να αμεληθούν φαινόμενα συναγωγής, ενώ η μετάδοση μέσω ακτινοβολίας αμελήθηκε λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του αέρα. Το πάχος του τοιχώματος άλατος στο οποίο μεταδίδεται η θερμότητα με αγωγή υποτέθηκε ίσο με 1 m . Επομένως, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από τον αέρα της κοιλότητας προς τα τοιχώματα της είναι:

$$U_{wall} = \frac{k_r}{1m} = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (14)$$

iv) Οι τιμές των θερμοκρασιών και των παροχών μάζας του αέρα που εισέρχεται και εξέρχεται από την κοιλότητα είναι γνωστές. Συγκεκριμένα, για τον εισερχόμενο αέρα, η θερμοκρασία του, T_{in} , είναι ίση με τη θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον τελευταίο εναλλάκτη της διάταξης συμπίεσης, η παροχή του είναι ίση με την παροχή των συμπιεστών $\dot{m}_{a,c}=80 \text{ kg/s}$. Επίσης, η θερμοκρασία του εξερχόμενου αέρα είναι ίση με τη θερμοκρασία εντός της κοιλότητας, T_c , και η παροχή του ίση με την παροχή αέρα των στροβίλων, δηλαδή $\dot{m}_{a,t}=160 \text{ kg/s}$.

Η συνολική μάζα, η θερμοκρασία και η πίεση του αέρα εντός της κοιλότητας για κάθε χρονική στιγμή βρίσκονται μέσω των εξισώσεων διατήρησης μάζας και ενέργειας εφαρμοσμένες στο σύνολο του όγκου της υπόγειας κοιλότητας. Η εξίσωση διατήρησης μάζας παίρνει τη μορφή:

$$\frac{dM_c}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \dot{m}_{a,c} - \dot{m}_{a,t} \quad (15)$$

Σημειώνεται ότι ο αέρας είτε μόνο θα εισέρχεται στην κοιλότητα (συμπίεση), είτε μόνο θα εξέρχεται (εκτόνωση), είτε ούτε θα εισέρχεται ούτε θα εξέρχεται

(σύστημα σε αναμονή), επομένως η παραπάνω μορφή είναι γενική, καθώς διαρκώς τουλάχιστον η μία εκ των δύο ποσοτήτων $\dot{m}_{a,c}$ και $\dot{m}_{a,t}$ θα είναι μηδέν.

Η πίεση του αέρα εντός της κοιλότητας κατά την έναρξη του κύκλου λειτουργίας του συστήματος θεωρείται ότι είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη πίεση αποθήκευσης ($p_0 = p_{min} = 70$ bar). Επίσης, ως αρχική θερμοκρασία του αέρα στην κοιλότητα επιλέχθηκε η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} . Επομένως εφόσον ο αέρας θεωρήθηκε τέλειο αέριο, η αρχική μάζα του εντός της κοιλότητας βρίσκεται από την καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων:

$$M_0 = \frac{p_{min} \cdot V_c}{R_a \cdot T_{amb}} \quad (16)$$

Η συνολική μάζα του αέρα στην κοιλότητα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, M_c , βρίσκεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση (15) με αρχική συνθήκη την τιμή που προκύπτει από την εξίσωση (16).

Για τη θερμοκρασία T_c του αέρα στην κοιλότητα εφαρμόζουμε την αρχή διατήρησης ενέργειας σε όγκο ελέγχου που αποτελείται από τον όγκο της υπόγειας κοιλότητας. Η εξίσωση αυτή, με την υπόθεση ομοιόμορφης ροής, και αμελώντας την κινητική και δυναμική ενέργεια του αέρα, είναι:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_{inlet} \dot{m} \cdot h - \sum_{exit} \dot{m} \cdot h = \frac{dE_{sys}}{dt} \quad (17)$$

Όπου \dot{Q} η συναλλασσόμενη ροή θερμότητας ανάμεσα στον όγκο ελέγχου και στο περιβάλλον ($\dot{Q} < 0$ όταν η θερμότητα είναι προς το περιβάλλον), \dot{W} το παραγόμενη ή καταναλισκόμενο έργο στον όγκο ελέγχου, το οποίο είναι μηδενικό, $\sum_{inlet} \dot{m} \cdot h$ και $\sum_{exit} \dot{m} \cdot h$ οι ροές ενέργειας στην είσοδο και στην έξοδο της κοιλότητας, και $\frac{dE_{sys}}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας εντός του όγκου ελέγχου.

Εφόσον ο αέρας θεωρείται τέλειο αέριο, για τον αέρα εντός της κοιλότητας ισχύουν οι σχέσεις:

$$h_c = c_{p,a} \cdot T_c \quad (18)$$

$$u_c = h_c - R_a \cdot T_c = (c_{p,a} - R_a) \cdot T_c \quad (19)$$

Όπου h_c η ενθαλπία του και u_c η εσωτερική του ενέργεια. Ο δείκτης c (cavern) χρησιμοποιείται για τις ιδιότητες του αέρα εντός της κοιλότητας.

Για το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας του όγκου ελέγχου $\frac{dE_{sys}}{dt}$ ισχύει:

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \frac{d}{dt} \int u_c \cdot \rho_c \cdot dV = \frac{d}{dt} (u_c \cdot \rho_c \cdot V_c) = \frac{d}{dt} (u_c \cdot M_c) = \frac{dM_c}{dt} \cdot u_c + M_c \cdot \frac{du_c}{dt} \quad (20)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (15) και (19), καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = (\dot{m}_{a,c} - \dot{m}_{a,t}) \cdot (c_{p,a} - R_a) \cdot T_c + M_c \cdot (c_{p,a} - R_a) \cdot \frac{dT_c}{dt} \quad (21)$$

Το αριστερό μέλος της εξίσωσης (17), με τη βοήθεια της εξίσωσης (18) και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\dot{W} = 0$, γίνεται:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_{inlet} \dot{m} \cdot h - \sum_{exit} \dot{m} \cdot h = \dot{Q} + \dot{m}_{a,c} \cdot c_{p,a} \cdot T_{in} - \dot{m}_{a,t} \cdot c_{p,a} \cdot T_c \quad (22)$$

Επομένως, χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις των εξισώσεων (21) και (22) για το δεξί και το αριστερό μέλος της εξίσωσης ενέργειας αντίστοιχα, και κάνοντας αλγεβρικές πράξεις, η εξίσωση ενέργειας λυμένη ως προς το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα στην κοιλότητα γράφεται:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{\dot{m}_{a,c} \cdot c_{p,a} \cdot (T_{in} - T_c) + (\dot{m}_{a,c} - \dot{m}_{a,t}) \cdot R_a \cdot T_c + \dot{Q}}{M_c \cdot (c_{p,a} - R_a)} \quad (23)$$

Όπου T_{in} η θερμοκρασία εισόδου του συμπιεζόμενου αέρα στην κοιλότητα, T_c και M_c η θερμοκρασία και η συνολική μάζα του αέρα μέσα σε αυτή αντίστοιχα, και \dot{Q} η συναλλασσόμενη ροή θερμότητας ανάμεσα στον αέρα εντός της κοιλότητας και τα τοιχώματά της.

Όπως δηλώθηκε προηγουμένως, για τον υπολογισμό της συναλλασσόμενης ροής θερμότητας \dot{Q} , υποτέθηκε συντελεστής μετάδοσης θερμότητας $U_{wall} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Η ποσότητα \dot{Q} είναι ίση με:

$$\dot{Q} = -U_{wall} \cdot A_w \cdot (T_c - T_w) \quad (24)$$

Με A_w την συνολική επιφάνεια των τοιχωμάτων της κοιλότητας που είναι σε επαφή με τον αέρα και T_w τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων της κοιλότητας σε δεδομένο χρόνο. Το αρνητικό πρόσημο στη συναλλασσόμενη ροή θερμότητας υποδηλώνει ότι η κοιλότητα χάνει ενέργεια, καθώς ο θερμότερος αέρα εντός αυτής μεταφέρει θερμότητα προς τα ψυχρότερα περιβάλλοντα τοιχώματά της.

Η συνολική εσωτερική επιφάνεια επαφής αέρα και τοιχωμάτων της κυλινδρικής κοιλότητας δεν ισούται με την επιφάνεια του κυλίνδρου, αλλά είναι μεγαλύτερη, καθώς ρωγμές και σχισμές εντός αυτής αυξάνουν αρκετά την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Έτσι, η επιφάνεια του κυλίνδρου επιλέχθηκε να πολλαπλασιαστεί με έναν διορθωτικό παράγοντα $F_e=1,8$ ώστε να προκύψει η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, A_w , δηλαδή:

$$A_w = F_e \cdot (2 \cdot \frac{V_c}{H_c} + \pi \cdot d_c \cdot H_c) \quad (25)$$

Όπου V_c και H_c ο όγκος και το ύψος της κυλινδρικής κοιλότητας, και d_c η ακτίνα του κυλίνδρου, που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot H_c}} \quad (26)$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης (24), χωρίς το αρνητικό πρόσημο, και με αρχική συνθήκη $Q_{start} = 0$, υπολογίζονται οι απώλειες θερμότητας Q του αέρα εντός της κοιλότητας.

Η μόνη μεταβλητή που πρέπει να προσδιοριστεί προκειμένου να είναι εφικτός ο υπολογισμός των ιδιοτήτων του αέρα στην κοιλότητα σε κάθε χρονικό βήμα, είναι η θερμοκρασία των τοιχωμάτων της κοιλότητας T_w , ώστε να υπολογιστεί ο ρυθμός απωλειών θερμότητας \dot{Q} , και να αρχίσει η επίλυση της εξίσωσης ενέργειας (23) για την πρώτη χρονική στιγμή. Ο υπολογισμός της T_w απαιτεί την αριθμητική επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας. Η διαδικασία επίλυσής παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α, καθώς χρίζει υπολογιστικής ανάλυσης που ξεφεύγει από την παρούσα διαδικασία περιγραφής της μοντελοποίησης.

Μετά από την παραπάνω ανάλυση, γίνεται φανερό ότι όλες οι παράμετροι για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα εντός της κοιλότητας σε κάθε χρονική στιγμή έχουν προσδιοριστεί. Μέσω της εξίσωσης (23) υπολογίζεται η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας T_c του αέρα, και στη συνέχεια ολοκληρώνοντας την με αρχική συνθήκη την: $T_{c,start} = T_{amb}$, προκύπτει η θερμοκρασία T_c σε κάθε χρονική στιγμή λειτουργίας του συστήματος.

Έχοντας υπολογίσει τη θερμοκρασία T_c , η πίεση p_c του αέρα στην κοιλότητα για κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται μέσω της καταστατικής εξίσωσης των τέλειων αερίων:

$$p_c = \frac{M_c \cdot R_a \cdot T_c}{V_c} \quad (27)$$

Έτσι, ο κοινός λόγος πίεσης των τεσσάρων συμπιεστών στο επόμενο χρονικό βήμα θα είναι $b_c = \sqrt[4]{\frac{p_c}{p_{amb}}}$.

Η παραπάνω διαδικασία αρχίζει από το πρώτο χρονικό βήμα, και συνεχίζεται σειριακά και στις επόμενες χρονικές στιγμές, από την έναρξη της συμπίεσης μέχρι το τέλος της εκτόνωσης.

Παρακάτω, στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων για την κοιλότητα αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα κατά τη μοντελοποίηση.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Όγκος κυλινδρικής κοιλότητας αποθήκευσης αέρα	V_c	100000	[m ³]
Ύψος κυλινδρικής κοιλότητας αποθήκευσης αέρα	H_c	100	[m]
Ειδική θερμοχωρητικότητα άλατος τοιχωμάτων κοιλότητας	$c_{p,r}$	920	[J/kgK]
Πυκνότητα άλατος	den_r	2200	[kg/m ³]
Θερμική αγωγιμότητα άλατος	k_r	5	[W/mK]
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από αέρα σε τοιχώματα	U_{wall}	5	[W/m ² K]

Πίνακας 4.3 : Τιμές παραμέτρων κοιλότητας αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

4.4 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (TES)

Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας (TES) του συστήματος αποτελείται, όπως αναφέρθηκε, από τις δύο δεξαμενές αποθήκευσης του βιομηχανικού ελαίου Therminol VP1, μια θερμή και μια ψυχρή. Ο ρόλος της θερμής δεξαμενής είναι να αποθηκεύει το θερμό έλαιο που εισέρχεται σε αυτή από τους εναλλάκτες της διάταξης συμπίεσης με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του αέρα πριν τους εναλλάκτες του στροβίλου κατά την εκτόνωση. Αντιθέτως, η ψυχρή δεξαμενή τροφοδοτεί με έλαιο θερμοκρασίας κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος τους εναλλάκτες του σταδίου συμπίεσης προκειμένου να αποθηκευτεί σε αυτό η θερμότητα συμπίεσης. Κατά την εκτόνωση, το έλαιο που έχει μεταφέρει τη θερμότητά του στον αέρα μέσω των εναλλακτών πριν τους στροβίλους, εισέρχεται ξανά στην ψυχρή δεξαμενή ώστε να επιστρέψει το σύστημα στην αρχική του κατάσταση στο τέλος του κύκλου λειτουργίας του.

Οι διαστάσεις των δεξαμενών επιλέχθηκαν έτσι ώστε να μην φτάνουν κοντά στην υπερχειλίση σε κανένα σημείο του κύκλου λειτουργίας. Τόσο η θερμή όσο και η ψυχρή δεξαμενή είναι υπέργειες, εκτεθειμένες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, και είναι δύο όμοιες κυλινδρικές δεξαμενές με ύψος $H_{tank} = H_{hot} = H_{cold} = 12 \text{ m}$ και διάμετρο $d_{tank} = d_{hot} = d_{cold} = 20 \text{ m}$. Επομένως, η μέγιστη ποσότητα μάζας που δύναται να αποθηκευτεί σε κάθε δεξαμενή δύναται από τη σχέση:

$$M_{HTF,max} = V_{tank} \cdot den_{HTF} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{tank}^2 \cdot H_{tank} \cdot den_{HTF} = 3.080.017 \text{ kg} \quad (28)$$

Όπου V_{tank} ο όγκος της δεξαμενής και den_{HTF} η πυκνότητα του ελαίου Therminol VP1.

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των λειτουργικών χαρακτηριστικών των δεξαμενών κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

4.4.1 Θερμή δεξαμενή ελαίου (Hot HTF Tank)

Για τον υπολογισμό των μεγεθών που σχετίζονται με τη θερμή δεξαμενή κατά τη διάρκεια λειτουργίας της, θα χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας στη δεξαμενή. Ο ισολογισμός μάζας της είναι:

$$\frac{dM_{HTF,hot}}{dt} = \dot{m}_{HTF,hot,in} - \dot{m}_{HTF,hot,out} = \dot{m}_{HTFc,tot} - \dot{m}_{HTFt,tot} \quad (29)$$

Όπου $\dot{m}_{HTF,hot,in}$ η παροχή του μέσου μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Fluid – HTF) που εισέρχεται στη θερμή δεξαμενή (και ισούται με την παροχή $\dot{m}_{HTFc,tot}$, δηλαδή τη συνολική παροχή ελαίου που θερμαίνεται στους εναλλάκτες της συμπίεσης, που υπολογίζεται από την εξίσωση (12)), και $\dot{m}_{HTF,hot,out}$ η παροχή του ελαίου που εξέρχεται από αυτήν (και ισούται με την παροχή $\dot{m}_{HTFt,tot}$ που εισέρχεται στους εναλλάκτες των στροβίλων) αντίστοιχα.

Η εύρεση της μάζας του ελαίου στη θερμή δεξαμενή σε κάθε χρονική στιγμή, $M_{HTF,hot}$, γίνεται ολοκληρώνοντας τη σχέση (29), με αρχική συνθήκη την ποσότητα μάζας που υπάρχει στη θερμή δεξαμενή την χρονική στιγμή της έναρξης της συμπίεσης. Επιλέχθηκε την αρχική χρονική στιγμή η στάθμη του υγρού της θερμής

δεξαμενής να είναι στο 5%, δηλαδή για την αρχική ποσότητα μάζας θερμού ελαίου ισχύει:

$$M_{HTF,hot,start} = 5\% \cdot M_{HTF,max} \quad (30)$$

Η εξίσωση ενέργειας της δεξαμενής γράφεται ως εξής:

$$M_{HTF,hot} \cdot c_{p,HTF} \cdot \frac{dT_{HTF,hot}}{dt} = \dot{q}_{charge} - \dot{q}_{loss,hot} \quad (31)$$

Όπου $M_{HTF,hot}$ και $T_{HTF,hot}$ η μάζα και η θερμοκρασία του ελαίου εντός της θερμής δεξαμενής αντίστοιχα, $c_{p,HTF}$ η ειδική του θερμοχωρητικότητα, \dot{q}_{charge} η ροή θερμότητας στη δεξαμενή λόγω της πλήρωσης της με θερμό έλαιο κατά τη φόρτιση του συστήματος (δείκτης: charge), και $\dot{q}_{loss,hot}$ η ροή θερμότητας λόγω απωλειών προς το περιβάλλον.

Για το \dot{q}_{charge} ισχύει η σχέση:

$$\dot{q}_{charge} = \dot{m}_{HTF,hot,in} \cdot c_{p,HTF} \cdot (T_{HTF,hot,in} - T_{HTF,hot}) \quad (32)$$

Όπου $T_{HTF,hot,in}$ τη θερμοκρασία εισόδου του θερμού ελαίου στη δεξαμενή, που είναι ίση με τη θερμοκρασία εξόδου του ελαίου από τους εναλλάκτες της συμπίεσης και υπολογίζεται από την εξίσωση (13).

Για τις απώλειες θερμότητας της δεξαμενής προς το περιβάλλον, σύμφωνα με την [58], ισχύει:

$$\dot{q}_{loss,hot} = U_{hot} \cdot A_{hot} \cdot (T_{HTF,hot} - T_{amb}) \quad (33)$$

Όπου U_{hot} ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το έλαιο προς το περιβάλλον για τη θερμή δεξαμενή, $T_{HTF,hot}$ η θερμοκρασία του ελαίου κάθε χρονική στιγμή, T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος και A_{hot} η εκτιθέμενη επιφάνεια της δεξαμενής στο περιβάλλον (περιβάλλουσα επιφάνεια του κυλίνδρου εκτός της βάσης της), η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{hot} = \pi \cdot d_{hot} \cdot H_{hot} + \frac{\pi}{4} \cdot d_{hot}^2 \quad (34)$$

Εφόσον ο ρόλος της θερμής δεξαμενής ελαίου είναι η αποθήκευση της θερμότητας, επιλέχθηκε αυτή να είναι μονωμένη με μόνωση πάχους 2", ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες προς το περιβάλλον. Για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U_{hot} , σύμφωνα με την [58], για δεξαμενές με μόνωση 2", ταχύτητα αέρα περιβάλλοντος 10 mph και θερμική αγωγιμότητα υλικού μόνωσης $k_{ins} = 0,40 \text{ W/mK}$, προκύπτει $U_{hot} = 0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Το ποσό θερμότητας $Q_{loss,hot}$ που μεταφέρεται από τη δεξαμενή προς το περιβάλλον υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση (33).

Έχοντας πλέον ορίσει όλες τις παραμέτρους της εξίσωσης (31), υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του ελαίου στη θερμή δεξαμενή ως εξής:

$$\frac{dT_{HTF,hot}}{dt} = \frac{\dot{q}_{charge} - \dot{q}_{loss,hot}}{M_{HTF,hot} \cdot c_{p,HTF}} \quad (35)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση με αρχική συνθήκη την θερμοκρασία της δεξαμενής τη στιγμή έναρξης της συμπίεσης προκύπτει η θερμοκρασία $T_{HTF,hot}$ σε κάθε χρονική στιγμή. Η αρχική θερμοκρασία της δεξαμενής $T_{HTF,hot,start}$ εκλέχθηκε με κριτήριο να είναι σχετικά κοντά στη θερμοκρασία που διατηρεί η δεξαμενή κατά τη λειτουργία του συστήματος, και, αν είναι δυνατόν, να προσεγγίζει τη θερμοκρασία που έχει η δεξαμενή στο τέλος της εκτόνωσης. Έπειτα από δοκιμές, επιλέχθηκε $T_{HTF,hot,start} = 275^{\circ}\text{C}$.

4.4.2 Ψυχρή δεξαμενή ελαίου (Cold HTF Tank)

Η διαδικασία που ακολουθείται για την ψυχρή δεξαμενή είναι όμοια με αυτή για τη θερμή. Η μάζα του ελαίου στην ψυχρή δεξαμενή $M_{HTF,cold}$ υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση διατήρησης μάζας:

$$\frac{dM_{HTF,cold}}{dt} = \dot{m}_{HTF,cold,in} - \dot{m}_{HTF,cold,out} = \dot{m}_{HTF,tot} - \dot{m}_{HTF,c,tot} \quad (36)$$

Όπου $\dot{m}_{HTF,cold,in}$ η παροχή του ελαίου που εισέρχεται στη ψυχρή δεξαμενή (και ισούται με την παροχή $\dot{m}_{HTF,tot}$, δηλαδή τη συνολική παροχή ελαίου που εξέρχεται από τους εναλλάκτες των στροβίλων), και $\dot{m}_{HTF,cold,out}$ η παροχή του ελαίου που εξέρχεται από αυτήν (και ισούται με την παροχή $\dot{m}_{HTF,c,tot}$ που εισέρχεται στους εναλλάκτες των συμπιεστών και υπολογίζεται από την εξίσωση (12)).

Η αρχική ποσότητα μάζας ελαίου στην ψυχρή δεξαμενή, που θα χρησιμοποιηθεί ως αρχική συνθήκη (στην αρχή της συμπίεσης) για την εύρεση της $M_{HTF,cold}$, επιλέχθηκε να είναι το 95% της μέγιστης επιτρεπόμενης ποσότητας ελαίου στη δεξαμενή, δηλαδή:

$$M_{HTF,cold,start} = 95\% \cdot M_{HTF,max} \quad (37)$$

Η εξίσωση ενέργειας για την ψυχρή δεξαμενή είναι:

$$M_{HTF,cold} \cdot c_{p,HTF} \cdot \frac{dT_{HTF,cold}}{dt} = \dot{q}_{discharge} - \dot{q}_{loss,cold} \quad (38)$$

Στην παραπάνω σχέση $M_{HTF,cold}$ είναι η μάζα του ψυχρού ελαίου στη δεξαμενή, $T_{HTF,cold}$ η θερμοκρασία του και $\dot{q}_{loss,cold}$ η ροή θερμότητας από την ψυχρή δεξαμενή προς το περιβάλλον. Για το $\dot{q}_{discharge}$, το οποίο είναι η ροή θερμότητας λόγω της εισόδου του ελαίου εντός της ψυχρής δεξαμενής κατά την εκτόνωση (discharge) ισχύει:

$$\dot{q}_{discharge} = \dot{m}_{HTF,cold,in} \cdot c_{p,HTF} \cdot (T_{HTF,cold,in} - T_{HTF,cold}) \quad (39)$$

Όπου $T_{HTF,cold,in}$ η θερμοκρασία εισόδου του ελαίου στην ψυχρή δεξαμενή. Ο υπολογισμός των $\dot{m}_{HTF,cold,in}$ και $T_{HTF,cold,in}$ θα γίνει στην υποενότητα της περιγραφής της διάταξης εκτόνωσης.

Για την ποσότητα $\dot{q}_{loss,cold}$, ξανά σύμφωνα με την [58], ισχύει:

$$\dot{q}_{loss,cold} = U_{cold} \cdot A_{cold} \cdot (T_{HTF,cold} - T_{amb}) \quad (40)$$

Όπου U_{cold} ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το έλαιο προς το περιβάλλον για την ψυχρή δεξαμενή και $T_{HTF,cold}$ η θερμοκρασία του. Η εκτιθέμενη επιφάνεια της ψυχρής δεξαμενής στο περιβάλλον A_{cold} ισούται με την αντίστοιχη της θερμής δεξαμενής, εφόσον είναι όμοιες.

Η ψυχρή δεξαμενή δεν περιβάλλεται από θερμική μόνωση, καθώς δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας η διατήρηση της θερμοκρασίας του ελαίου. Για τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας U_{cold} , σύμφωνα με την [58], για δεξαμενή χωρίς μόνωση, ταχύτητα αέρα περιβάλλοντος 10 mph, γενική διαφορά θερμοκρασιών $T_{HTF,cold} - T_{amb} \approx 60^\circ\text{C}$, και εφαρμόζοντας διορθωτικό παράγοντα για δεξαμενές χωρίς μόνωση και μεσαίας κατηγορίας λάδια: $c_f = 0,70$ προκύπτει $U_{cold} = 16,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Το ποσό θερμότητας $Q_{loss,cold}$ που μεταφέρεται από τη δεξαμενή προς το περιβάλλον υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση (40).

Μετά από τα παραπάνω, ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας $T_{HTF,cold}$ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{dT_{HTF,cold}}{dt} = \frac{\dot{q}_{discharge} - \dot{q}_{loss,cold}}{M_{HTF,cold} \cdot c_{p,HTF}} \quad (41)$$

Η θερμοκρασία της ψυχρής δεξαμενής υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση χρονικά. Ως αρχική συνθήκη στην έναρξη της συμπίεσης επιλέχθηκε $T_{HTF,cold,start} = 40^\circ\text{C}$.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων για το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Ύψος κυλινδρικών δεξαμενών	H_{tank}	12	[m]
Διάμετρος κυλινδρικών δεξαμενών	d_{tank}	20	[m]
Μέγιστη επιτρεπόμενη μάζα ελαίου εντός των δεξαμενών	$M_{HTF,max}$	3.080.017	[kg]
Αρχική ποσότητα ελαίου στην θερμή δεξαμενή	$M_{HTF,hot,start}$	$5\% \cdot M_{HTF,max}$	[kg]
Αρχική ποσότητα ελαίου στην ψυχρή δεξαμενή	$M_{HTF,cold,start}$	$95\% \cdot M_{HTF,max}$	[kg]
Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας θερμής δεξαμενής	U_{hot}	0,62	[W/m ² K]
Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ψυχρής δεξαμενής	U_{cold}	16,3	[W/m ² K]
Αρχική θερμοκρασία θερμής δεξαμενής	$T_{HTF,hot,start}$	275	[°C]
Αρχική θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής	$T_{HTF,cold,start}$	40	[°C]

Πίνακας 4.4 : Τιμές παραμέτρων συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (TES)

4.5 Σύστημα εκτόνωσης

Το σύστημα εκτόνωσης αποτελείται από τρεις όμοιους στρόβιλους και τρεις όμοιους εναλλάκτες αέρα-λαδιού, που αναθερμαίνουν τον αέρα σε θερμοκρασία κοντά σε αυτή που επικρατεί στην θερμή δεξαμενή λαδιού, πριν την είσοδό του στον κάθε στρόβιλο. Οι στρόβιλοι λειτουργούν με σταθερή παροχή αέρα $\dot{m}_{a,t}=160$ kg/s καθ'όλη τη διάρκεια της εκτόνωσης, και έχουν κοινό πολυτροπικό βαθμό απόδοσης $n_{p,t} = 85\%$. Παρόλο που η πίεση του αποθηκευμένου στην κοιλότητα αέρα κυμαίνεται από 70-100 bar, οι στρόβιλοι απαιτούν σταθερή πίεση εισόδου, επομένως χρησιμοποιείται μια στραγγαλιστική βαλβίδα, όπως αναφέρθηκε, που στραγγαλίζει ισενθαλπικά τον εξερχόμενο από την κοιλότητα αέρα στα 70 bar. Οι τρεις στρόβιλοι έχουν ίσους

λόγους πίεσης, επομένως ισχύει $b_t = \sqrt[3]{\frac{p_{min}}{p_{amb}}} = \sqrt[3]{\frac{70}{1,013}} = 4,10$.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των απαιτούμενων μεγεθών της διάταξης εκτόνωσης είναι όμοιες με αυτές για τη συμπίεση, αλλά προσαρμοσμένες για την εκτόνωση. Πριν την είσοδό του σε κάθε στρόβιλο, ο αέρας εισέρχεται σε εναλλάκτες προκειμένου να θερμανθεί από το έλαιο που είναι αποθηκευμένο στη θερμή δεξαμενή. Ο κοινός βαθμός απόδοσης των εναλλακτών του σταδίου εκτόνωσης, που λήφθηκε επίσης $n_{HX,t}=80\%$, ορίζεται ως:

$$n_{HX,t} = \frac{T_{a,out} - T_{a,in}}{T_{HTF,in,t} - T_{a,in}} \quad (42)$$

Όπου $T_{a,in}$ και $T_{a,out}$ η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου αντίστοιχα του αέρα από τον εναλλάκτη, και $T_{HTF,in,t}$ η θερμοκρασία εισόδου του λαδιού στους εναλλάκτες της εκτόνωσης. Οι τρεις εναλλάκτες της διάταξης εκτόνωσης είναι και αυτοί συνδεδεμένοι παράλληλα, επομένως η $T_{HTF,in,t}$ είναι η ίδια για κάθε εναλλάκτη, και ισούται με τη θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής λαδιού. Από τη σχέση (42) υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη:

$$T_{a,out} = T_{a,in} + n_{HX,t} \cdot (T_{HTF,in,t} - T_{a,in}) \quad (43)$$

Για θερμοκρασία εξόδου του ελαίου από τον εναλλάκτη θεωρήθηκε ξανά ότι η τελική θερμοκρασιακή διαφορά (Terminal Temperature Difference) των δύο ρευστών είναι 10°C , επομένως για την, $T_{HTF,out,t}$ ισχύει:

$$T_{HTF,out,t} = T_{a,in} + 10^\circ\text{C} \quad (44)$$

Η παροχή μάζας ελαίου του κάθε εναλλάκτη, $\dot{m}_{HTF,t}$, η ρύθμιση της οποίας γίνεται μέσω ελεγκτών, υπολογίζεται μέσω του ισολογισμού θερμότητας στον εναλλάκτη. Επομένως, προκύπτει ότι:

$$\dot{m}_{HTF,t} = \frac{\dot{m}_{a,t} \cdot c_{p,a} \cdot (T_{a,out} - T_{a,in})}{c_{p,HTF} \cdot (T_{HTF,in,t} - T_{HTF,out,t})} \quad (45)$$

Για τα τρία ρεύματα ψυχρού ελαίου, στην έξοδό τους από τους εναλλάκτες, έγινε η ίδια θεώρηση όπως και σε αυτά από τους εναλλάκτες της συμπίεσης, ότι δηλαδή αναμιγνύονται αδιαβατικά, και επιστρέφουν στην ψυχρή δεξαμενή. Η συνολική ροή μάζας του ελαίου που εισέρχεται στην ψυχρή δεξαμενή είναι το άθροισμα των τριών επιμέρους παροχών, δηλαδή:

$$\dot{m}_{HTF,t,tot} = \dot{m}_{HTF,t1} + \dot{m}_{HTF,t2} + \dot{m}_{HTF,t3} \quad (46)$$

Όπου $\dot{m}_{HTF,t,tot}$ η συνολική παροχή ελαίου που οδηγείται στην ψυχρή δεξαμενή αποθήκευσης και $\dot{m}_{HTF,t1}$, $\dot{m}_{HTF,t2}$, $\dot{m}_{HTF,t3}$ οι παροχές ελαίου των εναλλακτών πριν τον πρώτο, δεύτερο και τρίτο στρόβιλο αντίστοιχα.

Η θερμοκρασία του συνολικού ρεύματος λαδιού δίνεται από την εξίσωση της αδιαβατικής ανάμιξης των τριών ρευμάτων:

$$T_{HTF,t,tot} = \frac{\dot{m}_{HTF,t1} \cdot T_{HTF,out,t1} + \dot{m}_{HTF,t2} \cdot T_{HTF,out,t2} + \dot{m}_{HTF,t3} \cdot T_{HTF,out,t3}}{\dot{m}_{HTF,t,tot}} \quad (47)$$

Με $T_{HTF,out,t1}$, $T_{HTF,out,t2}$ και $T_{HTF,out,t3}$ συμβολίζεται η θερμοκρασία εξόδου του ελαίου από τον εναλλάκτη πριν τον πρώτο, δεύτερο και τρίτο στρόβιλο αντίστοιχα.

Ο αέρας, αφού θερμανθεί σε κάποιο εναλλάκτη, εισέρχεται στον ακριβώς επόμενο στρόβιλο για να εκτονωθεί. Η πίεση του αέρα στην έξοδο του από κάθε στρόβιλο υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_{out,t} = \frac{p_{in,t}}{b_t} \quad (48)$$

Όπου $p_{out,t}$ και $p_{in,t}$ οι πιέσεις εξόδου και εισόδου του αέρα αντίστοιχα, και b_t ο λόγος πίεσης του στρόβιλου. Η πίεση εισόδου για κάθε επόμενο στρόβιλο ισούται με την πίεση εξόδου του προηγούμενου του, καθώς αμελούνται οι απώλειες πίεσεως στους εναλλάκτες.

Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από κάθε στρόβιλο υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$T_{out,t} = T_{in,t} \cdot b_t^{\frac{(1-\gamma) \cdot n_{p,t}}{\gamma}} \quad (49)$$

$T_{out,t}$ και $T_{in,t}$ είναι οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου του αέρα αντίστοιχα, γ ο λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων του αέρα και $n_{p,t}$ ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης των στρόβιλων.

Η μηχανική ισχύς που παράγεται από κάθε στρόβιλο υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$P_t = \dot{m}_{a,t} \cdot c_{p,a} \cdot (T_{in,t} - T_{out,t}) \quad (50)$$

Αθροίζοντας τις επιμέρους παραγόμενες μηχανικές ισχύεις των στροβίλων, P_{t1} , P_{t2} και P_{t3} προκύπτει η συνολική παραγόμενη μηχανική ισχύς στην άτρακτο της γεννήτριας. Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται στη γεννήτρια υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και το βαθμό απόδοσης της γεννήτριας, ο οποίος επιλέχθηκε $n_g = 99\%$. Η συνολική ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από το σύστημα επομένως δίνεται από τη σχέση:

$$P_{el,g} = n_g \cdot (P_{t1} + P_{t2} + P_{t3}) \quad (51)$$

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ κατά το χρονικό διάστημα της εκτόνωσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα οι παράμετροι της διάταξης εκτόνωσης:

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Παροχή αέρα στροβίλων	$\dot{m}_{a,t}$	160	[kg/s]
Λόγος πίεσης κάθε στροβίλου	b_t	4,10	[-]
Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλων	$n_{p,t}$	0,85	[-]
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	n_g	0,99	[-]
Βαθμός απόδοσης εναλλακτών σταδίου εκτόνωσης	$n_{HX,t}$	0,80	[-]
Τελική θερμοκρασιακή διαφορά εναλλακτών συμπίεσης	TTD_t	10	[°C]

Πίνακας 4.5 : Τιμές παραμέτρων διάταξης εκτόνωσης

4.6 Σύστημα καύσης (σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης ισχύος)

Στο μοντέλο του συστήματος AA-CAES που μελετήθηκε, εξετάστηκε επίσης η προσθήκη θαλάμων καύσης φυσικού αερίου για περαιτέρω θέρμανση του αέρα σε υψηλότερη θερμοκρασία, πριν την εκτόνωσή του. Η προσθήκη αυτή έγινε για να είναι δυνατόν να αυξηθεί η παραγόμενη από τη γεννήτρια ηλεκτρική ισχύς στις περιπτώσεις που υπάρχει αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής την οποία το αδιαβατικό σύστημα από μόνο του δεν μπορεί να καλύψει. Οι θάλαμοι καύσης παρεμβάλλονται μεταξύ των εναλλακτών του σταδίου συμπίεσης και των αντίστοιχων στρόβιλων. Έτσι, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται η θερμότητα που αποθηκεύεται κατά τη συμπίεση στο θερμό έλαιο μέσω των εναλλακτών, και η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται περαιτέρω λόγω της καύσης του με φυσικό αέριο, οδηγώντας σε παραγωγή αυξημένης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την αρχική διάταξη. Η επιλογή να μην λειτουργούν οι εναλλάκτες θέρμανσης του αέρα πριν τους θαλάμους καύσης κρίνεται ασύμφορη, καθώς η θερμότητα που είναι ήδη αποθηκευμένη στη θερμή δεξαμενή θα έμενε ανεκμετάλλευτη. Σημειώνεται βέβαια, ότι κατά τη διάρκεια λειτουργίας των θαλάμων καύσης, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια παύει να είναι ανανεώσιμη, λόγω της καύσης του φυσικού αερίου.

Εξετάστηκε το ενδεχόμενο προσθήκης θαλάμων καύσης μόνο στα δύο τελευταία στάδια της εκτόνωσης (πριν τους δύο στρόβιλους χαμηλής πίεσης). Η επιλογή της προσθήκης θαλάμου καύσης πριν το στρόβιλο υψηλής πίεσης απορρίφθηκε, καθώς η πίεση εισόδου του είναι πολύ υψηλή (70 bar) και μια πολύ μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του, λόγω της καύσης, πέρα από τα επίπεδα που βρίσκεται ήδη (περίπου 225°C), θα δημιουργούσε εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες για το στρόβιλο. Επίσης, ακόμα και αν αυτή η δυσκολία είναι δυνατόν να ξεπεραστεί, η θερμοκρασία εξόδου του στρόβιλου υψηλής πίεσης θα είναι αρκετά υψηλότερη, με αποτέλεσμα να προσεγγίζει ή ακόμα και να ξεπερνάει τη θερμοκρασία του θερμού ελαίου που αναθερμαίνει τον αέρα πριν την είσοδό του στους επόμενους θαλάμους καύσης και στρόβιλους. Αυτό δημιουργεί προβλήματα, καθώς η αποδοτική προθέρμανση του αέρα στους δύο εναλλάκτες πριν τους στρόβιλους χαμηλής πίεσης δεν θα είναι πλέον εφικτή. Ίσως χρειαστεί να τεθούν εκτός λειτουργίας οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες καθώς δε θα έχουν τη δυνατότητα να θερμάνουν τον ήδη θερμό αέρα από την καύση, που έχει ως επόμενο την πολύ μεγάλη μείωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, καθώς δεν θα αξιοποιείται η ήδη αποθηκευμένη θερμότητα συμπίεσης.

Για τους παραπάνω λόγους εξετάστηκε η τοποθέτηση δύο θαλάμων καύσης, ενός πριν κάθε στρόβιλο χαμηλής πίεσης, καθώς η πίεση εισόδου τους είναι σαφώς μικρότερη (περίπου 17 bar για τον LPT1 και 4,1 bar για τον LPT2). Επίσης, ο μόνος περιορισμός είναι η θερμοκρασία εξόδου από τον πρώτο στρόβιλο χαμηλής πίεσης (LPT1) να μην προσεγγίζει αρκετά τη θερμοκρασία του ελαίου στη θερμή δεξαμενή, ώστε να λειτουργεί σωστά ο τελευταίος κατά σειρά εναλλάκτης.

Το καίόμενο καύσιμο στους θαλάμους καύσης είναι φυσικό αέριο, που χρησιμοποιείται κατά κόρον σε συμβατικά συστήματα CAES. Τα χαρακτηριστικά του είναι: κατώτερη θερμογόνο δύναμη $H_u = 50 \text{ MJ/kg}$ και ειδική θερμοχωρητικότητα $c_{p,fuel} = 2340 \text{ J/kgK}$. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του καυσαερίου επιλέχθηκε ίση με αυτή του αέρα, καθώς οι ποσότητες καυσίμου που χρησιμοποιήθηκαν είναι αρκετά μικρές σχετικά με την ποσότητα του αέρα που καίγεται. Επίσης, ο αέρας δεν θερμαίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ώστε η

διαφορά στη θερμοχωρητικότητα να είναι σημαντική, επομένως $c_{p,g} = 1050 \text{ J/kgK}$. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης του κάθε θαλάμου καύσης επιλέχθηκε ίσος με $n_b = 98 \%$.

Το μόνο επιπλέον μέγεθος που χρειάζεται να προσδιοριστεί όσο λειτουργεί ο θάλαμος καύσης είναι η θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου από αυτόν. Ο ισολογισμός ενέργειας στο θάλαμο καύσης είναι:

$$\dot{m}_{a,t} \cdot c_{p,a} \cdot T_{a,out,HX,t} + n_b \cdot \dot{m}_{fuel} \cdot H_u + \dot{m}_{fuel} \cdot c_{p,fuel} \cdot T_{fuel} = (\dot{m}_{a,t} + \dot{m}_{fuel}) \cdot c_{p,g} \cdot T_g \quad (52)$$

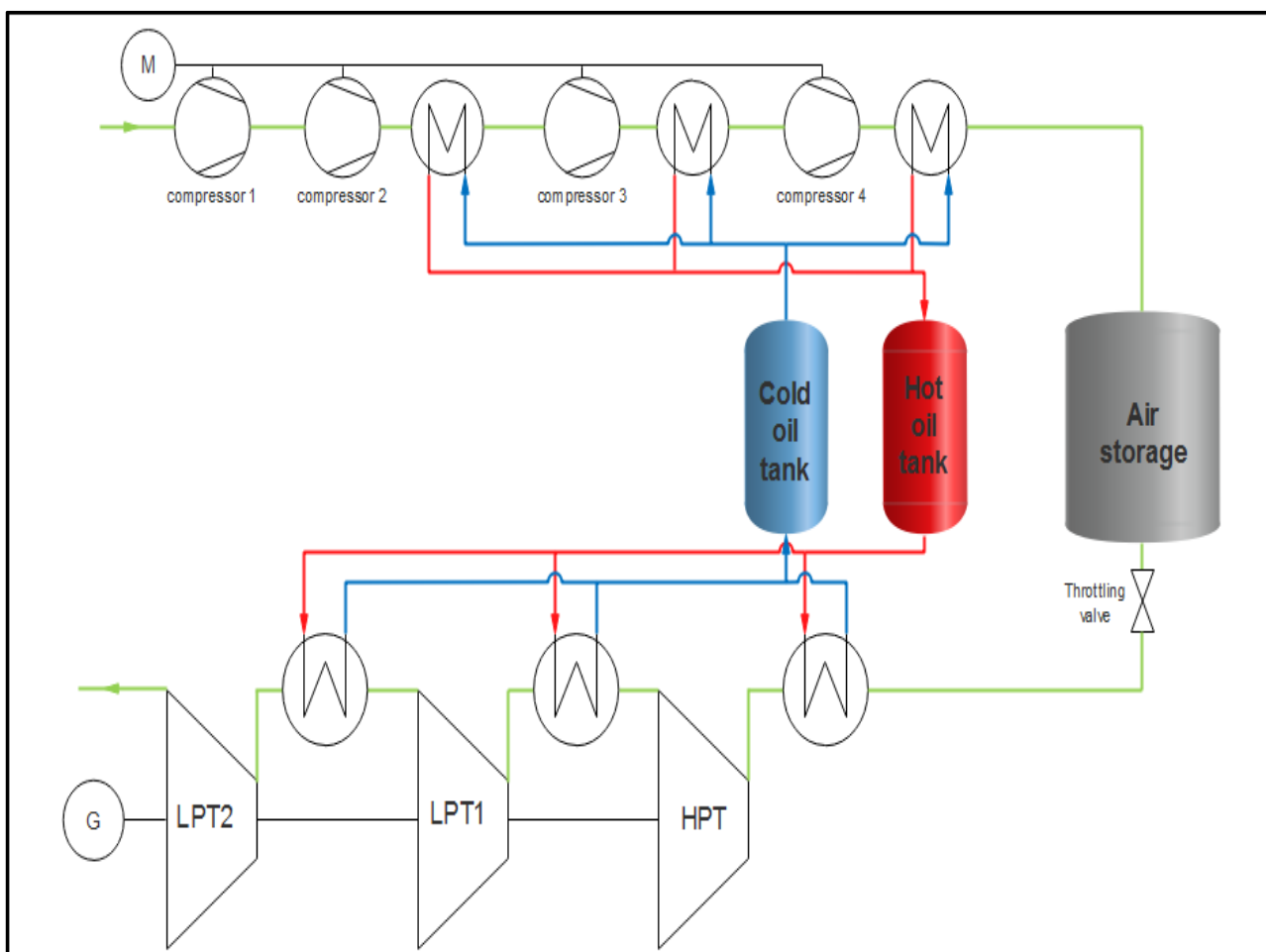
Όπου $T_{a,out,HX,t}$ η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη πριν το θάλαμο καύσης, \dot{m}_{fuel} η παροχή καυσίμου και T_{fuel} η θερμοκρασία του (λήφθηκε ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος), και T_g η θερμοκρασία εξόδου του καυσαερίου από το θάλαμο καύσης, η οποία και προσδιορίζεται λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς T_g . Δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές για την παροχή μάζας του καυσίμου \dot{m}_{fuel} που καίγεται στους θαλάμους καύσης. Οι τιμές αυτές θα παρουσιαστούν μαζί με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Κεφάλαιο 5. Τέλος, στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων για τους θαλάμους καύσης.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη καυσίμου (φυσικό αέριο)	H_u	50	[MJ/kg]
Ειδική θερμοχωρητικότητα καυσίμου	$c_{p,fuel}$	2340	[J/kgK]
Ειδική θερμοχωρητικότητα καυσαερίου	$c_{p,g}$	1050	[J/kgK]
Βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης	n_b	0,98	[-]
Θερμοκρασία εισαγόμενου καυσίμου	T_{fuel}	20	[°C]

Πίνακας 4.6 : Τιμές παραμέτρων θαλάμων καύσης

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AA-CAES

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος AA-CAES που μελετήθηκε. Στις ενότητες 5.1-5.7 παραθέτονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος AA-CAES, ενώ στην ενότητα 5.8 τα αποτελέσματα της ανάλυσης της επέκτασης του συστήματος με την προσθήκη θαλάμων καύσης. Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, κρίθηκε σκόπιμο να παρατεθεί ξανά η εικόνα της διάταξης του συστήματος AA-CAES, αλλά και συγκεντρωτικού πίνακα με τις τιμές όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν:



Εικόνα 5.1 : Διάταξη συστήματος AA-CAES

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Χρόνος αναμονής συστήματος μεταξύ τέλους συμπίεσης-αρχής εκτόνωσης	H_{idle}	12	[h]
Ελάχιστη επιτρεπόμενη πίεση αποθήκευσης	p_{min}	70	[bar]
Μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση αποθήκευσης	p_{max}	100	[bar]
Ειδική σταθερά αέρα	R_a	286,7	[J/kgK]
Λόγος ειδικών θερμοχωρητικότητας αέρα	γ	1,4	[-]
Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα	$c_{p,a}$	1050	[J/kgK]
Πίεση περιβάλλοντος	p_{amb}	1,013	[bar]
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{amb}	20	[°C]
Λόγος παροχής αέρα προς συμπίεση/παροχή αέρα προς εκτόνωση	$\dot{m}_{a,c}/\dot{m}_{a,t}$	½	[-]
Παροχή αέρα συμπιεστών	$\dot{m}_{a,c}$	80	[kg/s]
Παροχή αέρα στροβίλων	$\dot{m}_{a,t}$	160	[kg/s]
Ειδική θερμοχωρητικότητα μέσου μεταφοράς θερμότητας (Therminol VP1)	$c_{p,HTF}$	2309	[J/kgK]
Πυκνότητα μέσου μεταφοράς θερμότητας (Therminol VP1)	den_{HTF}	817	[kg/m ³]
Εύρος λόγου πίεσης κάθε συμπίεστη	b_c	2,88-3,15	[-]
Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστών	$n_{p,c}$	0,85	[-]
Βαθμός απόδοσης κινητήρα	n_m	0,99	[-]
Βαθμός απόδοσης εναλλακτών σταδίου συμπίεσης	$n_{HX,c}$	0,80	[-]
Τελική θερμοκρασιακή διαφορά εναλλακτών συμπίεσης	TTD_c	10	[°C]
Όγκος κυλινδρικής κοιλότητας αποθήκευσης αέρα	V_c	100.000	[m ³]
Ύψος κυλινδρικής κοιλότητας αποθήκευσης αέρα	H_c	100	[m]
Ειδική θερμοχωρητικότητα άλατος τοιχωμάτων κοιλότητας	$c_{p,r}$	920	[J/kgK]
Πυκνότητα άλατος	den_r	2200	[kg/m ³]
Θερμική αγωγιμότητα άλατος	k_r	5	[W/mK]
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από αέρα σε τοιχώματα	U_{wall}	5	[W/m ² K]
Ύψος κυλινδρικών δεξαμενών TES	H_{tank}	12	[m]
Διάμετρος κυλινδρικών δεξαμενών TES	d_{tank}	20	[m]
Μέγιστη επιτρεπόμενη μάζα ελαίου εντός των δεξαμενών	$M_{HTF,max}$	3.080.017	[kg]
Αρχική ποσότητα ελαίου στην θερμή δεξαμενή	$M_{HTF,hot,start}$	5% · $M_{HTF,max}$	[kg]
Αρχική ποσότητα ελαίου στην ψυχρή δεξαμενή	$M_{HTF,cold,start}$	95% · $M_{HTF,max}$	[kg]
Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας θερμής δεξαμενής	U_{hot}	0,62	[W/m ² K]
Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ψυχρής δεξαμενής	U_{cold}	16,3	[W/m ² K]
Αρχική θερμοκρασία θερμής δεξαμενής	$T_{HTF,hot,start}$	275	[°C]
Αρχική θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής	$T_{HTF,cold,start}$	40	[°C]
Λόγος πίεσης κάθε στροβίλου	b_t	4,10	[-]
Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλων	$n_{p,t}$	0,85	[-]
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	n_g	0,99	[-]
Βαθμός απόδοσης εναλλακτών σταδίου εκτόνωσης	$n_{HX,t}$	0,80	[-]
Τελική θερμοκρασιακή διαφορά εναλλακτών συμπίεσης	TTD_t	10	[°C]

Πίνακας 5.1 : Τιμές των παραμέτρων του συστήματος AA-CAES

Η δυναμική προσομοίωση υλοποιήθηκε στο Simulink της MATLAB, καθώς είναι ιδιαίτερα εύχρηστο στην μοντελοποίηση δυναμικών συστημάτων. Ο solver που επιλέχθηκε είναι ο ode45 (Dormand-Prince), μεταβλητού χρονικού βήματος, με μέγιστο χρονικό βήμα τα 30 δευτερόλεπτα, χρονικό διάστημα που κρίθηκε ικανοποιητικό ώστε οι μεταβολές των μεγεθών από το κάθε χρονικό βήμα στο επόμενο να είναι πολύ μικρές, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για την προσομοίωση είναι της τάξεως μερικών δευτερολέπτων.

5.1 Γενικά αποτελέσματα

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Βαθμός απόδοσης συστήματος	$\eta_{AA-CAES}$	60,73	[%]
Μέση παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συστήματος	$P_{el,g}$	73	[MW]
Μέση καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς συστήματος	$P_{el,m}$	55	[MW]
Συνολική διάρκεια κύκλου λειτουργίας	t_{total}	23,77	[h]
Διάρκεια συμπίεσης	t_c	8,06	[h]
Διάρκεια εκτόνωσης	t_e	3,71	[h]
Λόγος διάρκειας συμπίεσης/διάρκεια εκτόνωσης	t_c/t_e	2,17	[-]
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από γεννήτρια	$E_{el,g}$	271,2	[MWh]
Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια από κινητήρα	$E_{el,m}$	446,6	[MWh]

Πίνακας 5.2 : Κύρια αποτελέσματα μοντέλου AA-CAES

Τα κύρια αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου του συστήματος προέκυψε 60,73%, υψηλότερος από τον αντίστοιχο των εν λειτουργία συμβατικών συστημάτων CAES με καύση φυσικού αερίου στο Huntorf και στο McIntosh (όπως αναμενόταν), και κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με τις τιμές της βιβλιογραφίας (βλ. ενότητα 3.5). Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος AA-CAES υπολογίστηκε από την εξίσωση (4) :

$$\eta_{AA-CAES} = \frac{E_{elg}}{E_{elc}}$$

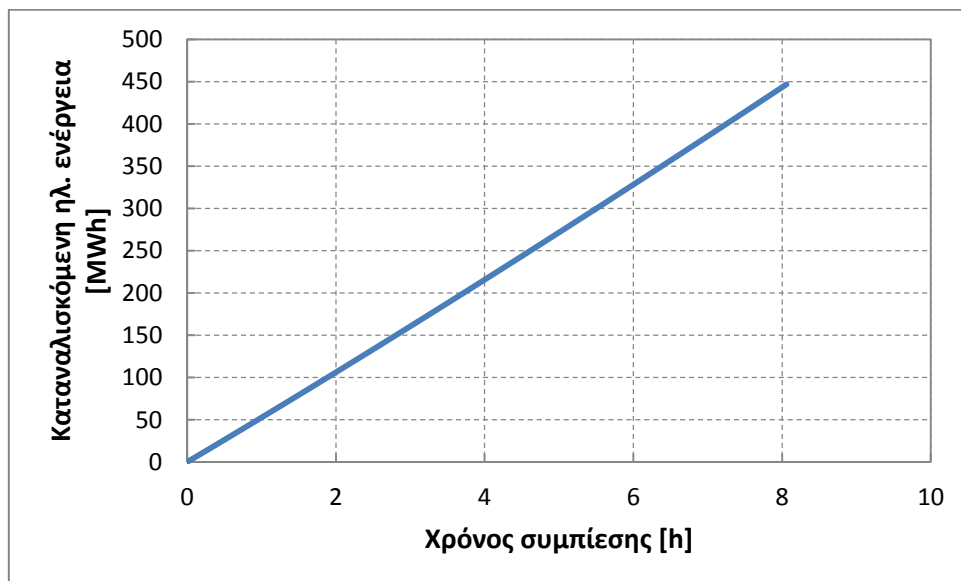
Η ηλεκτρική ισχύς που παράγει το σύστημα κατά την εκτόνωση είναι περίπου 73 MW, ενώ η μέση τιμή της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται κατά τη φόρτιση του συστήματος από τους συμπιεστές είναι τα 55MW. Η συνολική διάρκεια του κύκλου λειτουργίας προέκυψε 23,77 ώρες, αποτέλεσμα πολύ ικανοποιητικό αν το σύστημα προορίζεται για να εκτελεί έναν κύκλο λειτουργίας κάθε ημέρα. Η συμπίεση, η οποία θα πραγματοποιείται τις ώρες χαμηλής ζήτησης ενέργειας και κατά τη διάρκεια της οποίας καταναλώνονται 446,6 MWh ηλεκτρικής ενέργειας, διαρκεί 8,06 ώρες, επομένως το σύστημα μπορεί να φορτίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ η διάρκεια της εκτόνωσης είναι 3,71 ώρες, και παράγονται 271,2 MWh ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης. Σημειώνεται ότι η διάρκεια συμπίεσης του συστήματος AA-CAES είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εισαχθεί από τους συμπιεστές ικανή ποσότητα μάζας αέρα ώστε η πίεση του εντός της κοιλότητας να φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ($p_{max} = 100 \text{ bar}$), ενώ η

διάρκεια εκτόνωσης είναι ο χρόνος εκφόρτισης που απαιτείται ώστε η πίεση στην κοιλότητα να φτάσει ξανά την ελάχιστη επιτρεπόμενη ($p_{min} = 70 \text{ bar}$).

Παρακάτω παραθέτονται τα διαγράμματα καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος αλλά και ενέργειας από το σύστημα AA-CAES, συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης (Διαγράμματα 5.1 και 5.2). Όπως φαίνεται, η καταναλισκόμενη από τον κινητήρα ηλεκτρική ισχύς για τις ανάγκες της συμπίεσης αυξάνεται από περίπου 52 MW στην αρχή της συμπίεσης σε περίπου 58 MW στο τέλος της. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί ο λόγος πίεσης των συμπιεστών δεν είναι σταθερός, αλλά αυξάνεται καθώς η πίεση του αέρα στην κοιλότητα αποθήκευσης μεταβάλλεται από τα 70 στα 100 bar. Από την ολοκλήρωση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια της συμπίεσης προκύπτει η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει του χρόνου.

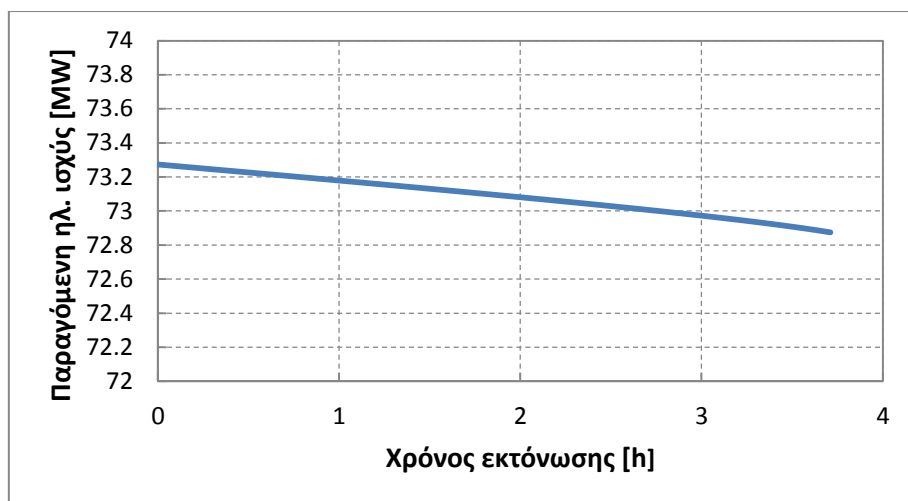


Διάγραμμα 5.1 : Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς κατά τη συμπίεση συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης

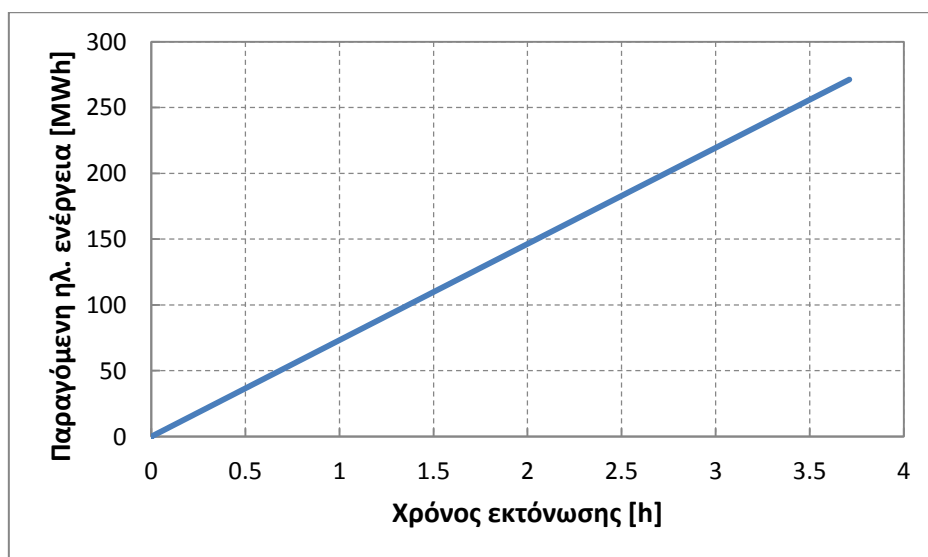


Διάγραμμα 5.2 : Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τη γεννήτρια του συστήματος συναρτήσει του χρόνου εκτόνωσης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.3. Η μεταβολή της παραγόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με τη μεταβολή της καταναλισκόμενης ισχύος κατά τη συμπίεση, καθώς κατά την εκτόνωση, εκτός από την παροχή μάζας αέρα, παραμένει σταθερή και η πίεση εισόδου σε κάθε στρόβιλο. Αυτό συμβαίνει λόγω της στραγγαλιστικής βαλβίδας, η οποία εξασφαλίζει σταθερή πίεση εισόδου στον στρόβιλο υψηλής πίεσης ίση με 70 bar. Η πολύ μικρή αυτή μεταβολή της παραγόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης (από 73,3 MW στην αρχή σε 72,9 MW στο τέλος της) οφείλεται στις απώλειες θερμότητας της θερμής δεξαμενής ελαίου προς το περιβάλλον, οι οποίες προκαλούν ελαφρά μείωση της θερμοκρασίας του θερμού ελαίου, το οποίο θερμαίνει τον αέρα πριν αυτός εκτονωθεί. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη γεννήτρια παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.4, και αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο εκτόνωσης, αφού η παραγόμενη ισχύς διατηρείται, όπως προαναφέρθηκε, σχεδόν σταθερή.



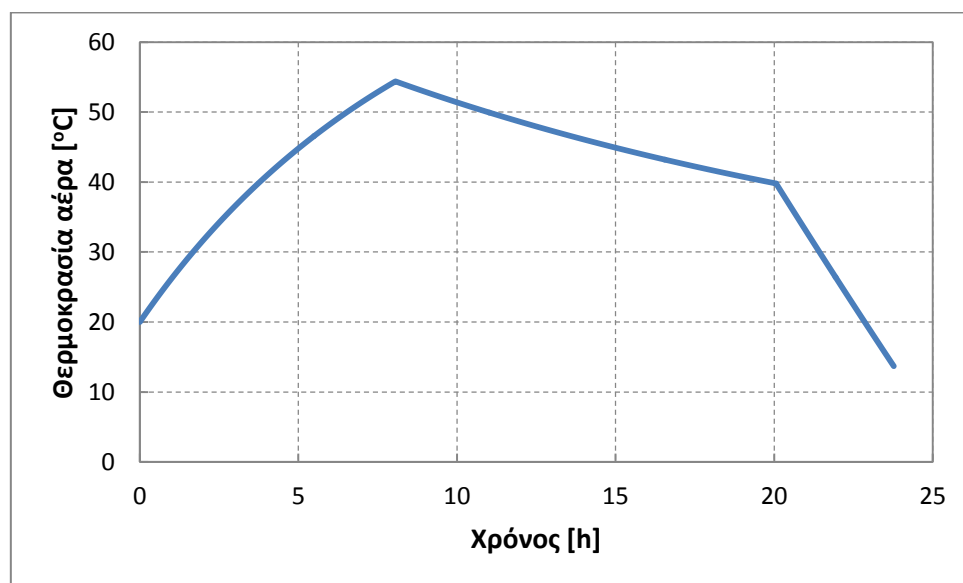
Διάγραμμα 5.3 : Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συστήματος συναρτήσει του χρόνου εκτόνωσης



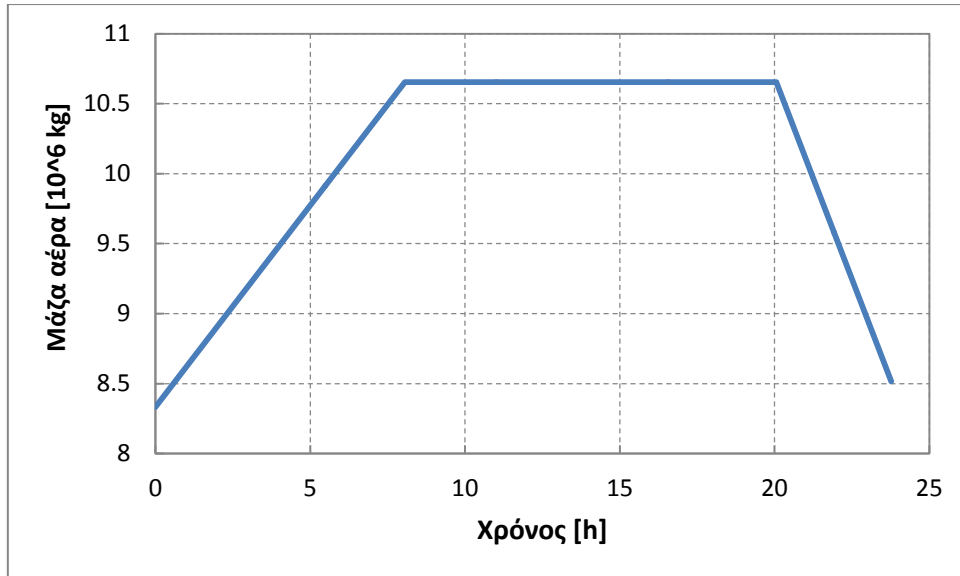
Διάγραμμα 5.4 : Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συναρτήσει του χρόνου εκτόνωσης

5.2 Κοιλότητα αποθήκευσης αέρα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα δυναμικά αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά την κοιλότητα αποθήκευσης αέρα. Στα Διαγράμματα 5.5 και 5.6 παραθέτονται η θερμοκρασία και η ποσότητα μάζας του αέρα στην κοιλότητα αντίστοιχα. Οι τρεις φάσεις λειτουργίας του κύκλου του συστήματος (συμπύεση-αναμονή-εκτόνωση) είναι εμφανείς στα διαγράμματα. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας παρατηρείται, όπως είναι λογικό, στο τέλος της συμπύεσης (54°C), και η ελάχιστη στο τέλος της εκτόνωσης. Οι απώλειες θερμότητας από τον αέρα προς τα τοιχώματα της κοιλότητας εξηγεί την μη γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη συμπύεση, την μείωση της όσο το σύστημα είναι σε αναμονή και το γεγονός ότι στο τέλος της εκτόνωσης η θερμοκρασία (14°C) είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η μεταβολή της μάζας αέρα εντός της κοιλότητας (Διάγραμμα 5.6) είναι γραμμική, καθώς οι παροχές αέρα κατά τη συμπύεση και την εκτόνωση παραμένουν σταθερές. Το γεγονός ότι στο τέλος του κύκλου λειτουργίας η ποσότητα μάζας αέρα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχή του, παρόλο που η πίεση είναι ίδια, εξηγείται μέσω της καταστατικής εξίσωσης των τέλειων αερίων, και οφείλεται στο γεγονός ότι ο αέρας στο τέλος του κύκλου βρίσκεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος, όπως προαναφέρθηκε.

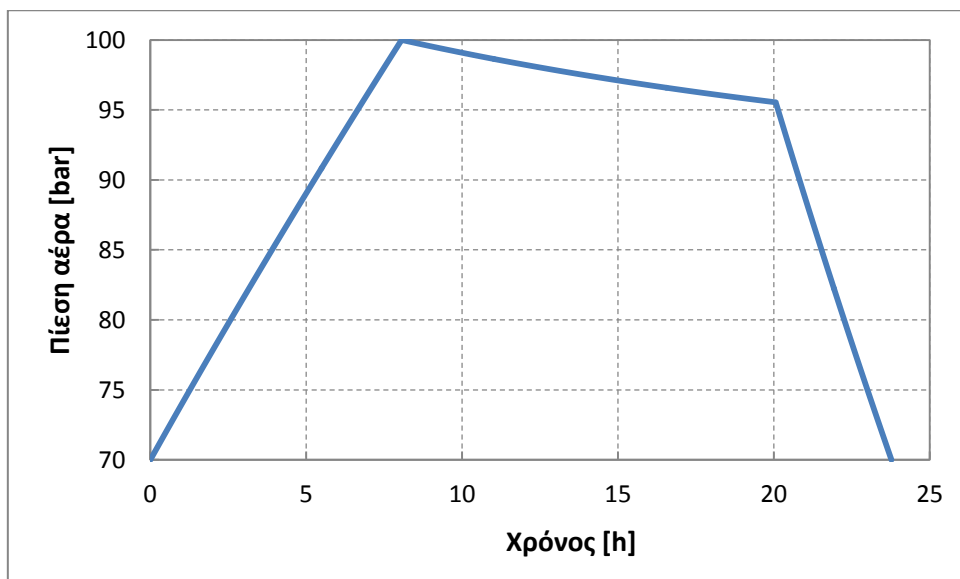


Διάγραμμα 5.5 : Θερμοκρασία αέρα εντός της κοιλότητας συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του συστήματος AA-CAES



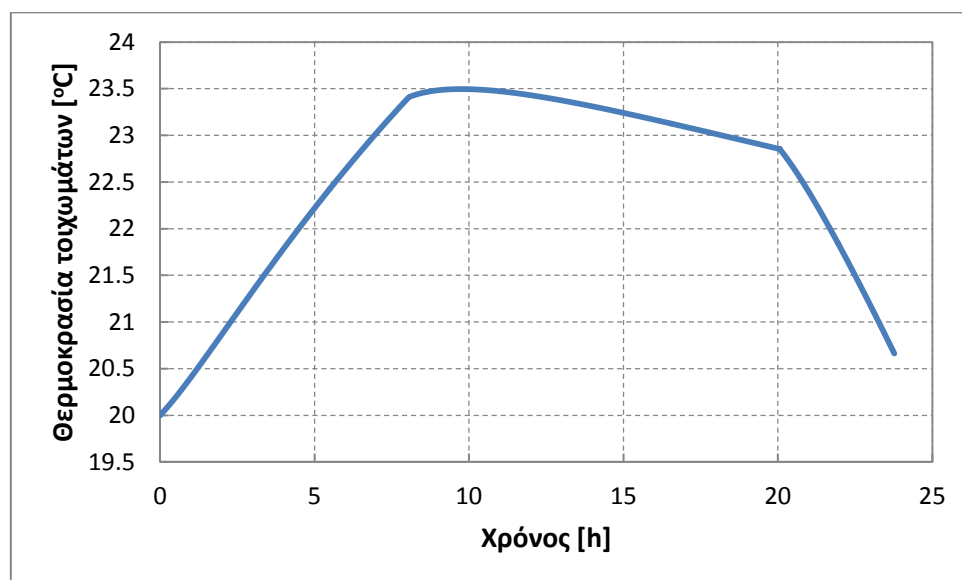
Διάγραμμα 5.6 : Ποσότητα αποθηκευμένης μάζας αέρα στην κοιλότητα συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του συστήματος

Η μεταβολή της πίεσης του αέρα εντός της κοιλότητας κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας του συστήματος φαίνεται στο Διάγραμμα 5.7. Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια αναμονής του συστήματος η πίεση δεν παραμένει σταθερή στα 100 bar, αλλά μειώνεται ελαφρώς, παρόλο που έχουμε υποθέσει μηδενικές απώλειες πίεσης και μάζας. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται λόγω συναλλαγής θερμότητας με τα τοιχώματα της κοιλότητας. Κατά τη συμπίεση και την εκτόνωση βέβαια, η μεταβολή της πίεσης είναι σχεδόν γραμμική, καθώς η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τις φάσεις αυτές είναι αμελητέα (περίπου 34°C στη συμπίεση και 26°C στην εκτόνωση) σε σχέση με την πολύ μεγαλύτερη και γραμμική μεταβολή που υφίσταται η μάζα του αέρα στην κοιλότητα (της τάξεως των $2 \cdot 10^6$ kg).



Διάγραμμα 5.7 : Πίεση αέρα εντός της κοιλότητας συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας

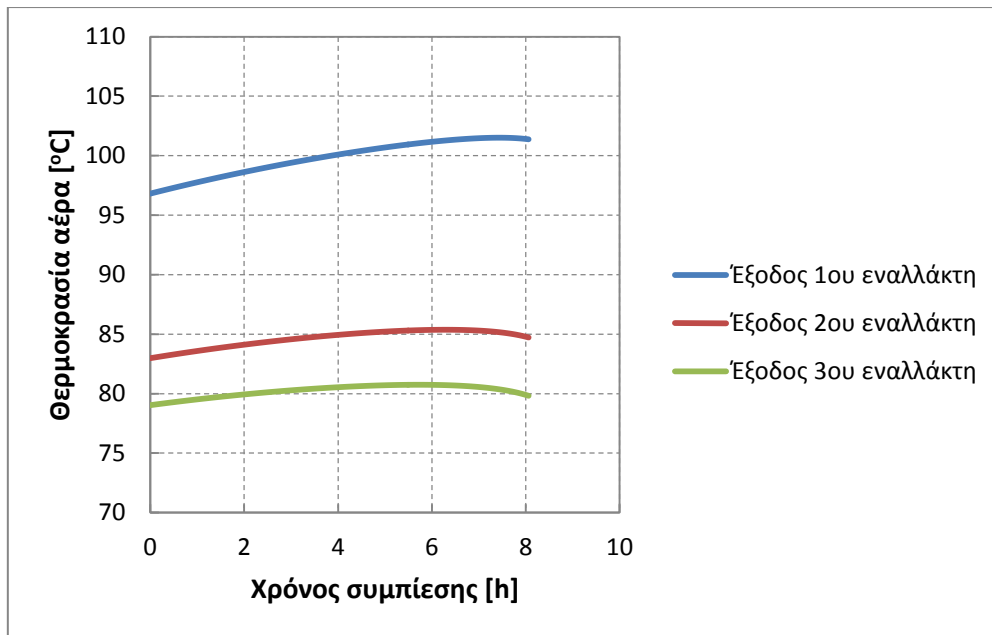
Στο Διάγραμμα 5.8 παρουσιάζεται η θερμοκρασία της επιφάνειας των τοιχωμάτων της κοιλότητας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Για τον υπολογισμό της, το τοίχωμα χωρίστηκε σε 10 κόμβους υπολογισμού, με απόσταση μεταξύ διαδοχικών κόμβων 0,11 m, καλύπτοντας συνολικά βάθος τοιχώματος 1,10 m, στο οποίο θεωρήθηκε ότι λαμβάνει χώρα η μεταφορά της θερμότητας από τον αέρα στα τοιχώματα. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία των τοιχωμάτων, όντας άμεσα εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία του αέρα στην κοιλότητα, ακολουθεί περίπου τη μεταβολή της, σε πολύ μικρότερη σαφώς κλίμακα.



Διάγραμμα 5.8 : Θερμοκρασία τοιχωμάτων κοιλότητας συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας

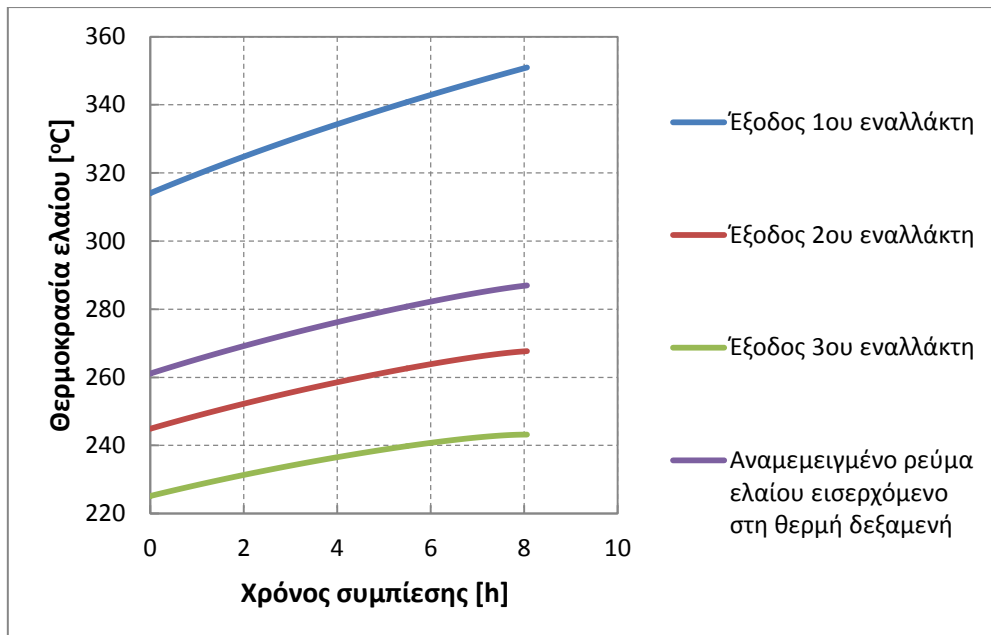
5.3 Σύστημα συμπίεσης

Όπως προαναφέρθηκε, μετά από κάθε συμπίεσή του συστήματος εκτός του πρώτου, ο αέρας ψύχεται σε εναλλάκτες αέρα-λαδιού, ώστε να αποθηκευτεί η θερμότητα του στο έλαιο, το οποίο καταλήγει στη θερμή δεξαμενή ελαίου και χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του προς εκτόνωση αέρα πριν τους στροβίλους. Ένας ακόμα λόγος για τον οποίο ψύχεται είναι ότι για λόγους σταθερότητας της κοιλότητας αλατούχου ορίζοντα, ο αέρας πρέπει να μην έχει ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία κατά την είσοδό του στην κοιλότητα. Στο Διάγραμμα 5.9 φαίνεται η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδό του από κάθε εναλλάκτη του σταδίου συμπίεσης. Παρατηρείται ότι και στους τρεις εναλλάκτες, η θερμοκρασία εξόδου του αέρα δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Ο αέρας στην έξοδο του από τον πρώτο εναλλάκτη είναι θερμότερος σε σχέση με την έξοδό του από τους επόμενους δύο, καθώς πριν από τον πρώτο εναλλάκτη παρεμβάλλονται δύο συμπίεστες, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται ψύξη του αέρα μετά από κάθε στάδιο συμπίεσης. Η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στην κοιλότητα αποθήκευσης είναι ίση με την θερμοκρασία εξόδου του από τον τρίτο εναλλάκτη, η οποία είναι, όπως φαίνεται στο διάγραμμα, περίπου 80°C. Η θερμοκρασία αυτή δεν κρίνεται ιδιαίτερα υψηλή, καθώς όπως παρουσιάστηκε στο Διάγραμμα 5.5, η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται στην κοιλότητα είναι 54°C.



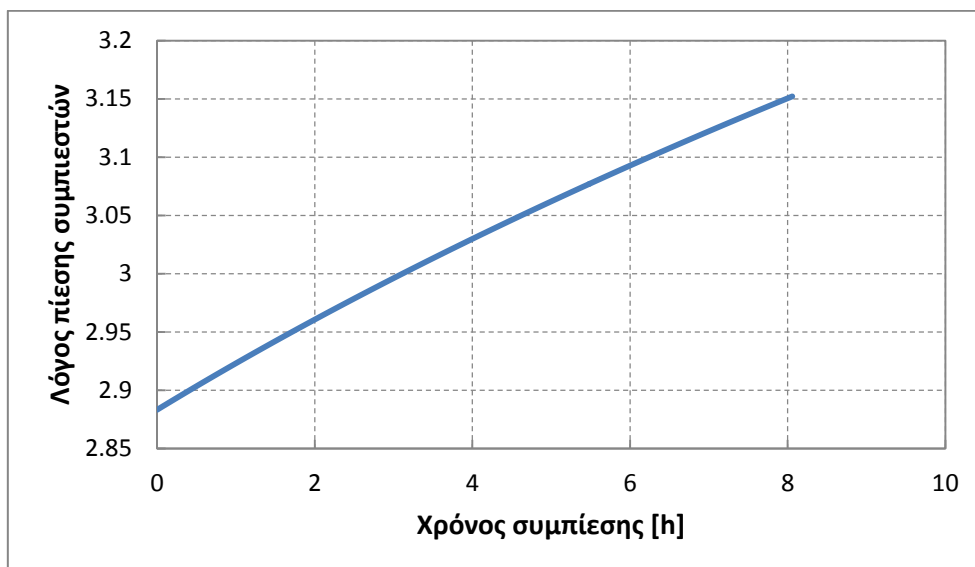
Διάγραμμα 5.9 : Θερμοκρασία αέρα στην έξοδο των εναλλακτών του σταδίου συμπίεσης συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης

Η θερμοκρασίες που αποκτούν τα ρεύματα ελαίου στην έξοδό τους από τους εναλλάκτες του σταδίου συμπίεσης παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.10. Το ρεύμα ελαίου που εξέρχεται από τον πρώτο εναλλάκτη έχει την υψηλότερη θερμοκρασία (315-350°C), καθώς το σημείο εισόδου του αέρα στον πρώτο εναλλάκτη είναι το σημείο μέγιστης θερμοκρασίας του συστήματος, αφού ο αέρας έχει περάσει από δύο στάδια συμπίεσης χωρίς ενδιάμεση ψύξη. Οι θερμοκρασίες των ρευμάτων ελαίου στην έξοδο από τους δύο επόμενους εναλλάκτες είναι σαφώς χαμηλότερες, καθώς ο αέρας είναι λιγότερο θερμός. Υπενθυμίζεται ότι η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδό του κάθε εναλλάκτη (άρα και στην έξοδό του από τον αμέσως προηγούμενο συμπιεστή) είναι 10°C υψηλότερη από την αντίστοιχη του ρεύματος ελαίου στην έξοδό του ίδιου εναλλάκτη, δηλαδή η διαφορά των θερμοκρασιών των δύο ρευστών σε αυτά τα σημεία είναι ίση με την τελική θερμοκρασιακή διαφορά (TTD) μεταξύ των δύο ρευμάτων. Στο Διάγραμμα 5.10 φαίνεται επίσης και η θερμοκρασία του συνολικού ρεύματος του θερμού ελαίου που προκύπτει από την ανάμιξη των τριών ρευμάτων ελαίου στην έξοδο τους από τους εναλλάκτες, και καταλήγει στη θερμή δεξαμενή. Η θερμοκρασία του συνολικού ρεύματος, όπως είναι λογικό, βρίσκεται μεταξύ των ρευμάτων με την ελάχιστη και τη μέγιστη θερμοκρασία, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι υπάρχουν εξεργειακές απώλειες κατά την ανάμιξη, καθώς η θερμότητα αποθηκεύεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη μέγιστη που αποκτά το έλαιο (στην έξοδο του πρώτου εναλλάκτη). Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί εάν το κάθε ρεύμα θερμού ελαίου αποθηκευόταν σε ξεχωριστή δεξαμενή, αλλά αυτό θα αύξανε σημαντικά την πολυπλοκότητα του συστήματος.



Διάγραμμα 5.10 : Θερμοκρασία ελαίου στην έξοδο των εναλλακτών του σταδίου συμπίεσης συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης

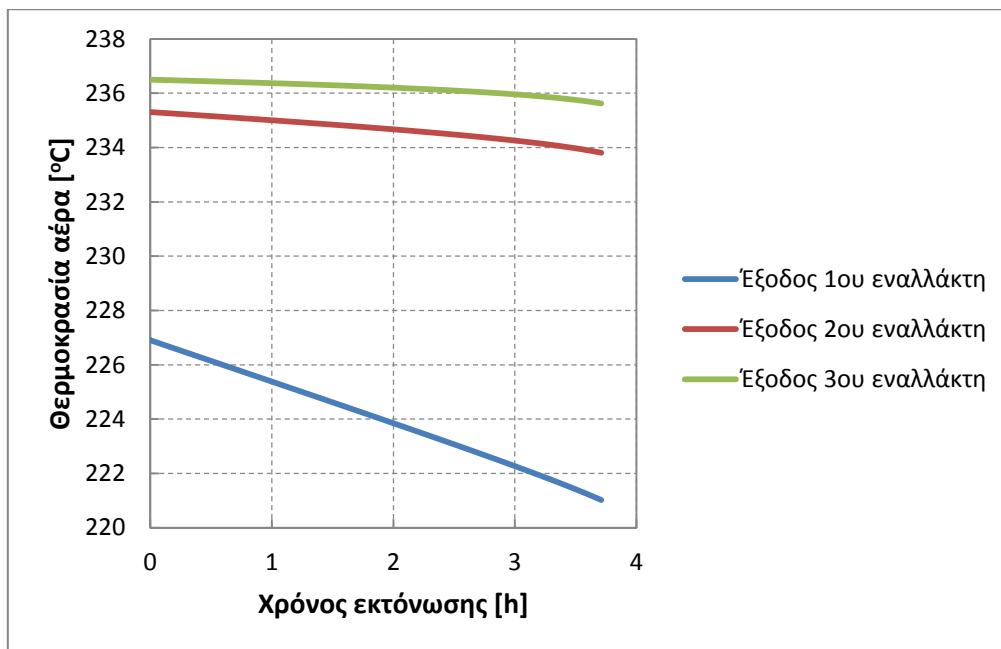
Το Διάγραμμα 5.11 απεικονίζει τη μεταβολή του λόγου πίεσης των συμπιεστών κατά τη διάρκεια της συμπίεσης. Ο λόγος συμπίεσης των συμπιεστών, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, μεταβάλλεται από 2,88 στην αρχή της συμπίεσης, έως 3,15 στο τέλος της. Σημειώνεται ότι θεωρήθηκε πως οι συμπιεστές έχουν περίπου σταθερή απόδοση κατά τη συμπίεση της σταθερής παροχής εισερχόμενου αέρα στο παραπάνω εύρος λόγων πίεσης, το οποίο όπως φαίνεται άλλωστε, δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο.



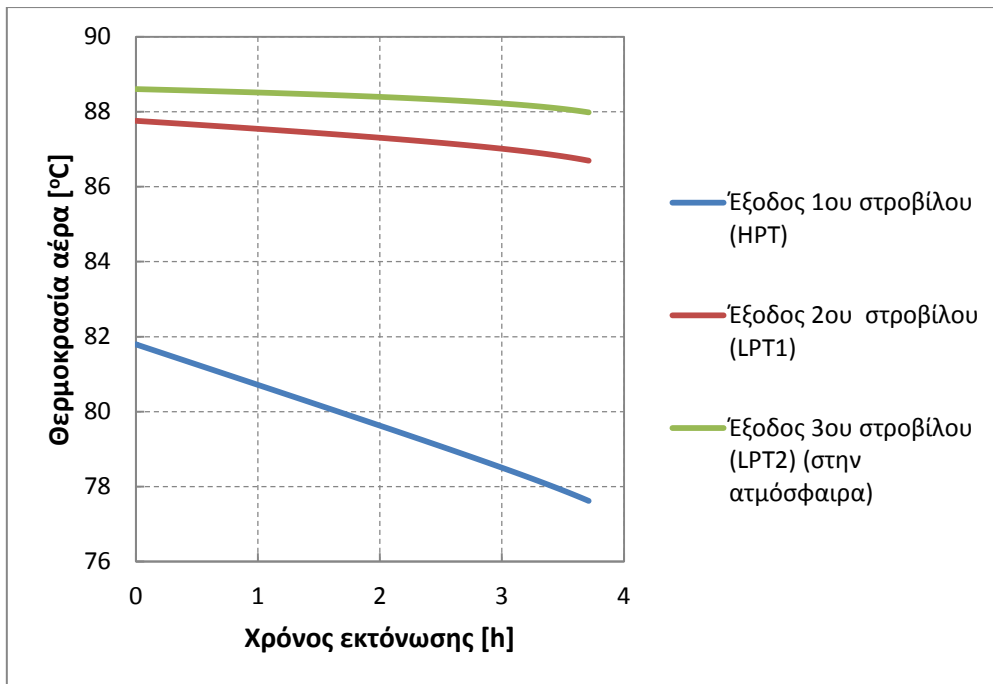
Διάγραμμα 5.11 : Μεταβολή του λόγου πίεσης κάθε συμπιεστή συναρτήσει του χρόνου συμπίεσης

5.4 Σύστημα εκτόνωσης

Κατά το στάδιο εκτόνωσης, ο αέρας, πριν την είσοδό του σε κάθε στρόβιλο, προθερμαίνεται από το έλαιο της θερμής δεξαμενής σε εναλλάκτες. Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο των εναλλακτών παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.12, ενώ στο Διάγραμμα 5.13 φαίνεται η θερμοκρασία εξόδου του από κάθε στρόβιλο. Όπως φαίνεται, οι θερμοκρασίες εξόδου του αέρα από τους εναλλάκτες και τους στρόβιλους δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης, καθώς η εισερχόμενη μάζα του αέρα σε κάθε στρόβιλο είναι σταθερή, όπως και η πίεση εισόδου του λόγω της στραγγαλιστικής βαλβίδας. Η ελαφρά μείωσή των θερμοκρασιών με την πάροδο του χρόνου εκτόνωσης οφείλεται στις απώλειες θερμότητας από τη θερμή δεξαμενή ελαίου προς το περιβάλλον. Η θερμοκρασία εξόδου από τον πρώτο εναλλάκτη και στρόβιλο είναι κατά λίγους βαθμούς χαμηλότερη σε σχέση με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες των επόμενων βαθμίδων. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αέρας που εισάγεται στον πρώτο εναλλάκτη έχει τη θερμοκρασία της κοιλότητας αποθήκευσης (από 40°C έως 15°C κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης), ενώ στην είσοδο των επόμενων εναλλακτών έχει υψηλότερη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.13 (η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από κάθε στρόβιλο ισούται με τη θερμοκρασία εισόδου του στον επόμενο εναλλάκτη). Παρατηρείται επίσης ότι ο αέρας στην έξοδο του στην ατμόσφαιρα, μετά την εκτόνωσή του, έχει θερμοκρασία περίπου 88°C.



Διάγραμμα 5.12 : Θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του από τους εναλλάκτες του σταδίου εκτόνωσης συναρτήσει του χρόνου εκτόνωσης

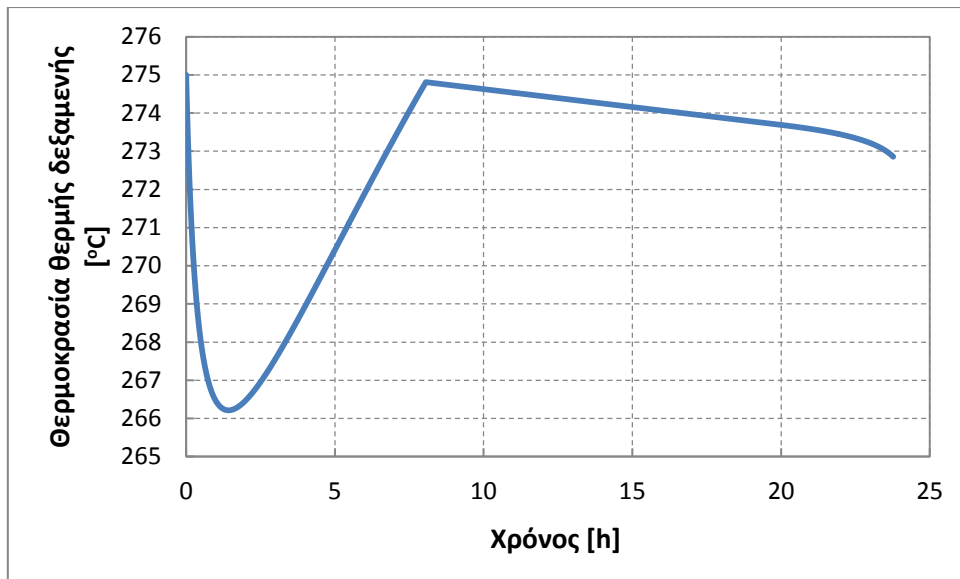


Διάγραμμα 5.13 : Θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του από τους στροβίλους συναρτήσει του χρόνου εκτόνωσης

5.5 Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας

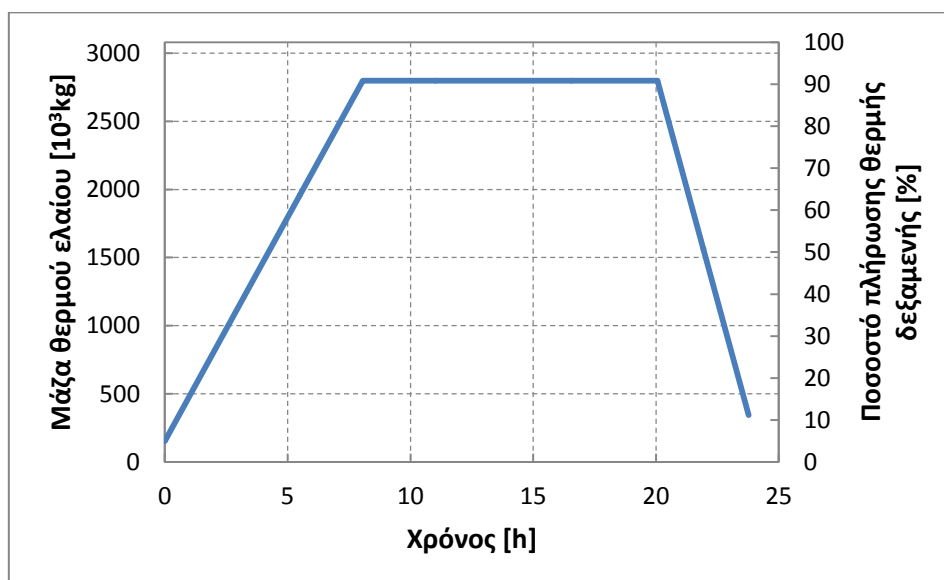
5.5.1 Θερμή δεξαμενή ελαίου

Η μεταβολή της θερμοκρασίας της θερμής δεξαμενής ελαίου φαίνεται στο Διάγραμμα 5.14. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι η εισερχόμενη μάζα του αναμεμιγμένου ρεύματος ελαίου από τους εναλλάκτες της συμπίεσης, και οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Όπως φαίνεται, στην αρχή της συμπίεσης η θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής μειώνεται από την αρχική της (275°C) σε περίπου 266°C , καθώς η θερμοκρασία του ρεύματος ελαίου που εισέρχεται στη θερμή δεξαμενή είναι στην αρχή χαμηλότερη από τη θερμοκρασία που επικρατεί σε αυτή (Διάγραμμα 5.10). Μέχρι το τέλος της συμπίεσης όμως, η θερμοκρασία της δεξαμενής επανέρχεται περίπου στην αρχική της θερμοκρασία (275°C), ενώ κατά τις φάσεις αναμονής και εκτόνωσης μειώνεται ελαφρώς, λόγω απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον. Η θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής στο τέλος του κύκλου είναι 273°C , και είναι μόλις δύο βαθμούς χαμηλότερη από την αρχική της.



Διάγραμμα 5.14 : Θερμοκρασία δεξαμενής θερμού ελαίου συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του συστήματος

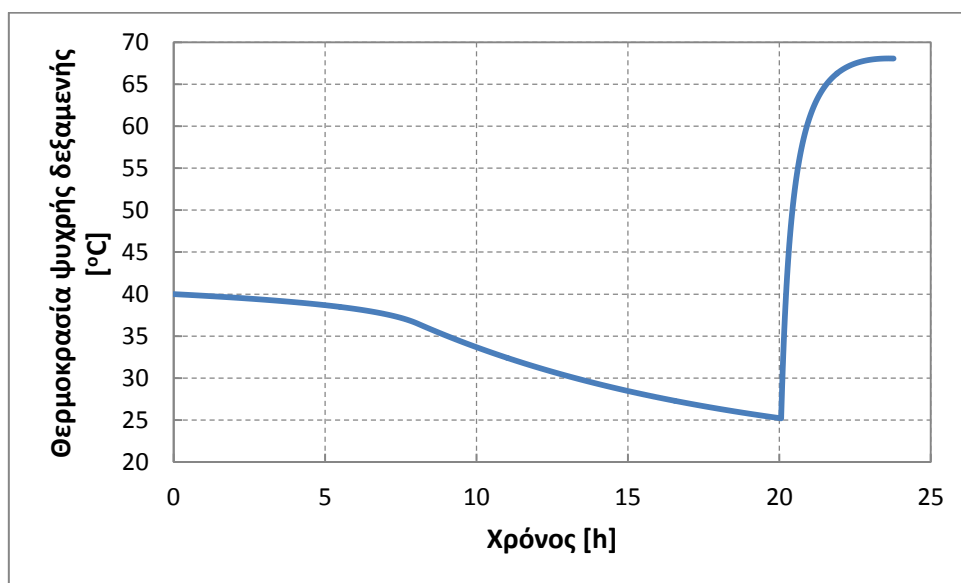
Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 5.15) παρουσιάζεται η ποσότητα του ελαίου που βρίσκεται εντός της θερμής δεξαμενής και το επίπεδο της στάθμης της δεξαμενής συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του συστήματος. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την έναρξη του κύκλου, η στάθμη πλήρωσης της θερμής δεξαμενής είναι στο 5% της μέγιστης χωρητικότητάς της. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, η δεξαμενή γεμίζει με θερμό έλαιο, η στάθμη του οποίου αγγίζει το 91% στο τέλος της. Στην εκτόνωση, το θερμό έλαιο χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του αέρα και η θερμή δεξαμενή αδειάζει, φτάνοντας στην τελική της στάθμη (11%) στο τέλος του κύκλου.



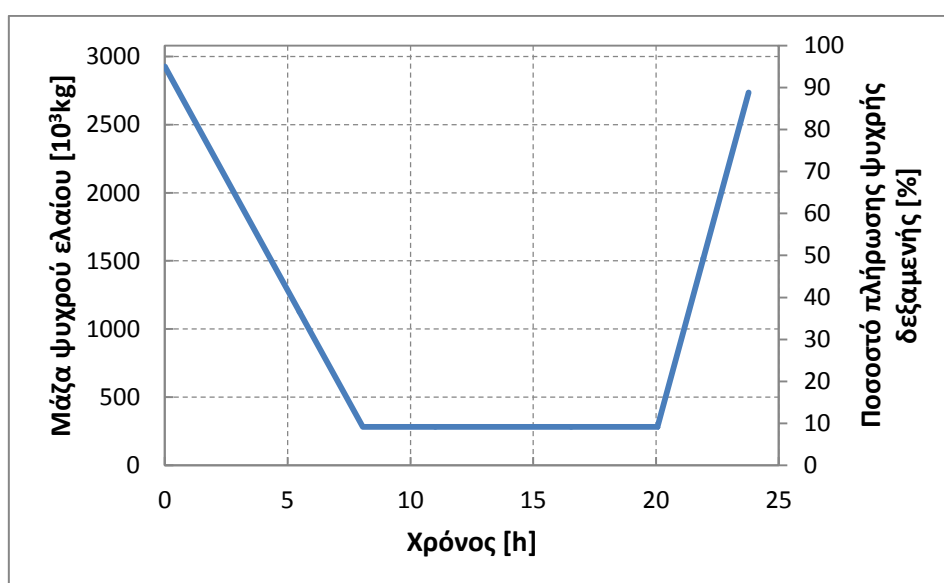
Διάγραμμα 5.15 : Μάζα αποθηκευμένου ελαίου στη θερμή δεξαμενή συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας

5.5.2 Ψυχρή δεξαμενή ελαίου

Η θερμοκρασία της ψυχρής δεξαμενής ελαίου παρουσιάζεται παρακάτω (Διάγραμμα 5.16). Στην έναρξη του κύκλου η θερμοκρασία είναι 40°C, και μειώνεται διαρκώς κατά τη συμπίεση και κατά τη διάρκεια της φάσης αναμονής του συστήματος λόγω απωλειών προς το περιβάλλον, αγγίζοντας τους 25°C ακριβώς πριν την έναρξη της εκτόνωσης. Ακολουθεί μια απότομη αύξηση της κατά την εκτόνωση, φτάνοντας τους 68°C στο τέλος του κύκλου. Η μεταβολή της μάζας του αποθηκευμένου ελαίου στην ψυχρή δεξαμενή είναι η αντίθετη από αυτή της θερμής δεξαμενής, καθώς το έλαιο μεταφέρεται από τη μία δεξαμενή στην άλλη. Η αρχική στάθμη της ψυχρής δεξαμενής είναι στο 95%, στο τέλος της συμπίεσης φτάνει το 9%, και στο τέλος του κύκλου είναι περίπου 89% (Διάγραμμα 5.17).



Διάγραμμα 5.16 : Θερμοκρασία δεξαμενής ψυχρού ελαίου συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του συστήματος



Διάγραμμα 5.17 : Μάζα αποθηκευμένου ελαίου στην ψυχρή δεξαμενή συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας

5.6 Ροές Ενέργειας συστήματος AA-CAES – Διάγραμμα Sankey

Οι ροές ενέργειας του συστήματος AA-CAES αποτελούνται από τις ενεργειακές ροές εισόδου και εξόδου, αλλά και τις ενεργειακές απώλειες του συστήματος. Οι εισερχόμενες ενεργειακές ροές στο σύστημα είναι η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τον κινητήρα για την κίνηση των συμπιεστών, αλλά και η αρχική θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο μέσο μεταφοράς θερμότητας στη θερμή και στην ψυχρή δεξαμενή, στην έναρξη του κύκλου λειτουργίας του συστήματος. Η αποθηκευμένη θερμότητα στη θερμή (δείκτης hot) και ψυχρή (δείκτης cold) δεξαμενή στην έναρξη της προσομοίωσης (δείκτης start) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{hot/cold,start} = M_{HTF,hot/cold,start} \cdot c_{p,HTF} \cdot (T_{HTF,hot/cold,start} - T_{amb}) \quad (53)$$

Οι ενεργειακές ροές εξόδου του συστήματος είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη γεννήτρια, και η θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο έλαιο των δύο δεξαμενών μετά το πέρας του κύκλου, η οποία υπολογίζεται επίσης από τη σχέση (53) (δείκτης final αντί για start).

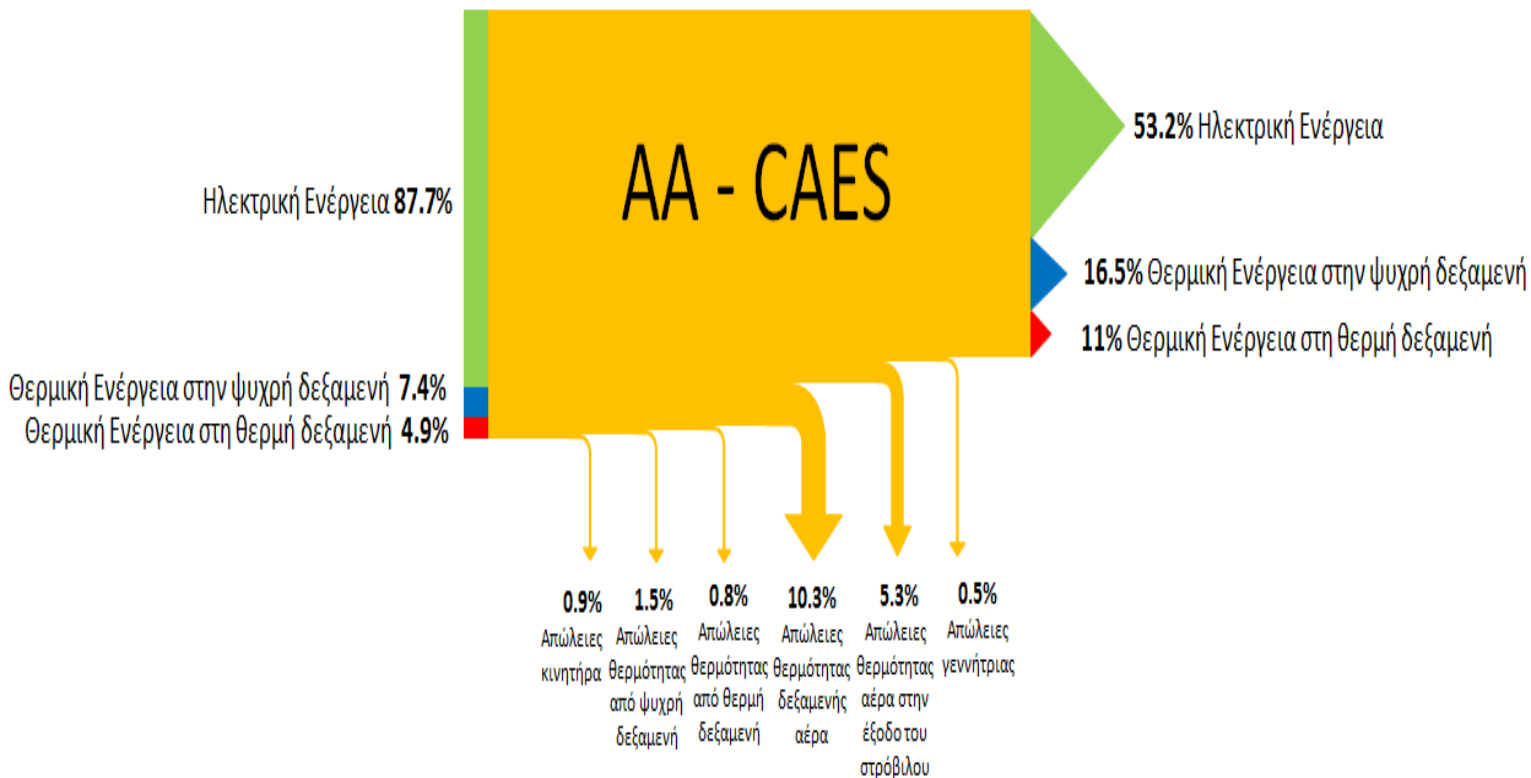
Οι τιμές της θερμικής ενέργειας του ελαίου στις δύο δεξαμενές στην αρχή και στο τέλος του κύκλου που προέκυψαν από την παραπάνω εξίσωση υπολογίστηκαν με βάση αναφοράς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως άλλωστε φαίνεται από την εξίσωση (53). Επομένως, οι τιμές που προέκυψαν ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν τη διαφορά της θερμικής ενέργειας που έχει το έλαιο από την αντίστοιχη που θα είχε εάν βρισκόταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι απώλειες ενέργειας του συστήματος είναι οι απώλειες των ηλεκτρικών μηχανών (κινητήρας και γεννήτρια), οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον από τη θερμή και την ψυχρή δεξαμενή, οι απώλειες θερμότητας από τον αέρα εντός της κοιλότητας προς τα τοιχώματα της, και οι απώλειες λόγω εξόδου του θερμού αέρα από τον τελευταίο στρόβιλο στην ατμόσφαιρα. Οι παραπάνω ενεργειακές ποσότητες υπολογισμένες για το σύνολο του κύκλου λειτουργίας, όπως και οι ροές εισόδου και εξόδου του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός της ενεργειακής απώλειας λόγω εξόδου του θερμού αέρα από τον τελευταίο στρόβιλο στην ατμόσφαιρα έγινε μέσω ισολογισμού ενέργειας στο σύστημα (Άθροισμα ενεργειών εισόδου = Άθροισμα ενεργειών εξόδου + Άθροισμα Απωλειών).

Ενέργεια	Σύμβολο	Τιμή	Τύπος
Καταναλισκόμενη ηλ. ενέργεια κινητήρα για συμπίεση	$E_{el,m}$	446,6 MWh	Είσοδος
Αρχική θερμική ενέργεια ελαίου θερμής δεξαμενής	$Q_{hot,start}$	25,19 MWh	Είσοδος
Αρχική θερμική ενέργεια ελαίου ψυχρής δεξαμενής	$Q_{cold,start}$	37,53 MWh	Είσοδος
Παραγόμενη ηλ. ενέργεια γεννήτριας στην εκτόνωση	$E_{el,g}$	271,2 MWh	Έξοδος
Τελική θερμική ενέργεια ελαίου θερμής δεξαμενής	$Q_{hot,final}$	55,95 MWh	Έξοδος
Τελική θερμική ενέργεια ελαίου ψυχρής δεξαμενής	$Q_{cold,final}$	84,29 MWh	Έξοδος
Απώλειες κινητήρα	$E_{loss,m}$	4,47 MWh	Απώλεια
Απώλειες γεννήτριας	$E_{loss,g}$	2,74 MWh	Απώλεια
Απώλεια θερμότητας από θερμή δεξαμενή	$Q_{loss,hot}$	3,98 MWh	Απώλεια
Απώλεια θερμότητας από ψυχρή δεξαμενή	$Q_{loss,cold}$	7,24 MWh	Απώλεια
Απώλεια θερμότητας από κοιλότητα αποθήκευσης αέρα	$Q_{loss,airstorage}$	52,33 MWh	Απώλεια
Απώλεια θερμότητας λόγω εξόδου θερμού αέρα στην ατμόσφαιρα	$Q_{loss,turbine}$	26,95 MWh	Απώλεια

Πίνακας 5.3 : Τιμές ενεργειακών ροών συστήματος AA-CAES

Το διάγραμμα Sankey του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2. Τα ποσά των ενεργειών εμφανίζονται ως ποσοστά επί τοις εκατό του συνόλου της ενέργειας εισόδου του συστήματος.



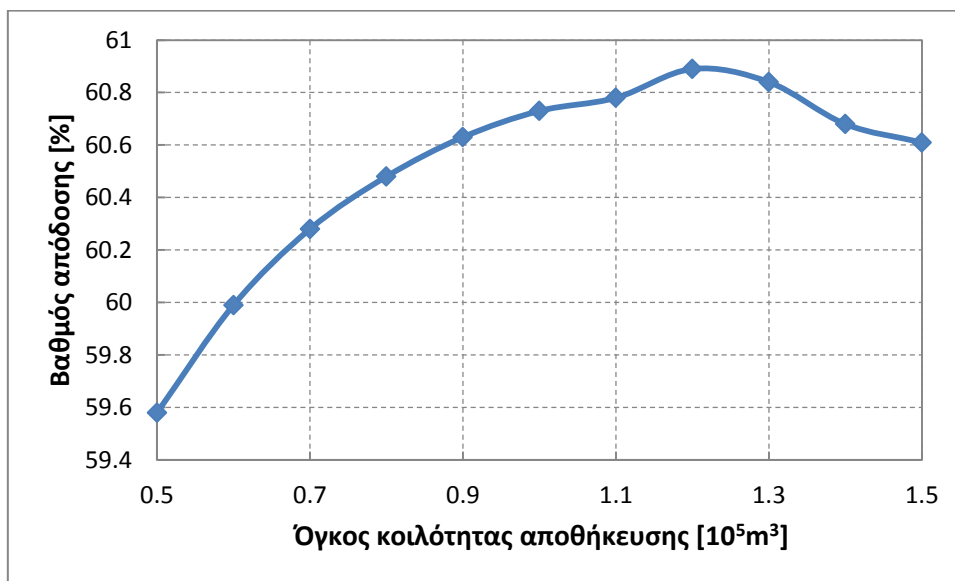
Εικόνα 5.2 : Διάγραμμα Sankey του συστήματος AA-CAES

5.7 Ανάλυση Ευαισθησίας

Οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος AA-CAES που επιλέχθηκαν δίνουν σαφώς μια εικόνα για τη λειτουργία και την απόδοση του συστήματος, αλλά πολλές φορές είναι δυνατόν να είναι διαφορετικές, ή να κυμαίνονται μεταξύ κάποιων ορίων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της ευαισθησίας του μοντέλου όσον αφορά την απόδοση του, όταν οι παράμετροι λειτουργίας του είναι διαφορετικές από τις προκαθορισμένες. Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης του συστήματος συναρτήσει διαφορετικών τιμών πέντε παραμέτρων λειτουργίας του: του όγκου της κοιλότητας αποθήκευσης αέρα, του χρόνου αναμονής μεταξύ τέλους συμπίεσης και αρχής εκτόνωσης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, και των τιμών της παροχής αέρα προς συμπίεση και εκτόνωση. Το σύστημα προσομοιώθηκε για κάθε διαφορετική τιμή κάθε παραμέτρου, και καταστρώθηκαν διαγράμματα στα οποία φαίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης συναρτήσει κάθε μεγέθους που μεταβαλλόταν.

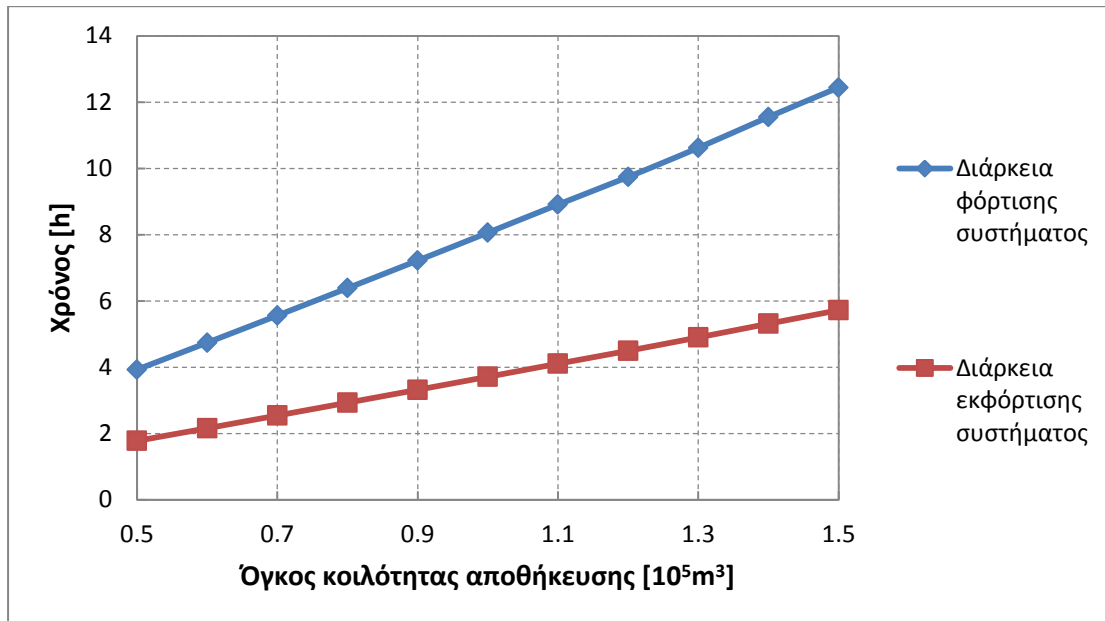
5.7.1 Όγκος κοιλότητας αποθήκευσης αέρα

Ο διαθέσιμος όγκος της κοιλότητας αποθήκευσης αέρα είναι ένα μέγεθος που προφανώς διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία του συστήματος και τη μορφολογία του εδάφους. Παρακάτω (Διάγραμμα 5.18) φαίνεται η επίδραση του όγκου της κοιλότητας αποθήκευσης αέρα στο βαθμό απόδοσης του συστήματος. Οι τιμές που εξετάστηκαν για τον όγκο της κοιλότητας κυμαίνονται από 50.000-150.000 m³ (η επιλεγμένη τιμή μέχρι τώρα ήταν 100.000 m³). Φαίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση του όγκου της κοιλότητας, φτάνοντας σε ένα μέγιστο (60,9%) για όγκο περίπου ίσο με 120.000 m³, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του όγκου φθίνει. Ο βαθμός απόδοσης για την αρχικά επιλεγμένη τιμή του όγκου πάντως (60,73%) είναι πολύ κοντά στον μέγιστο.

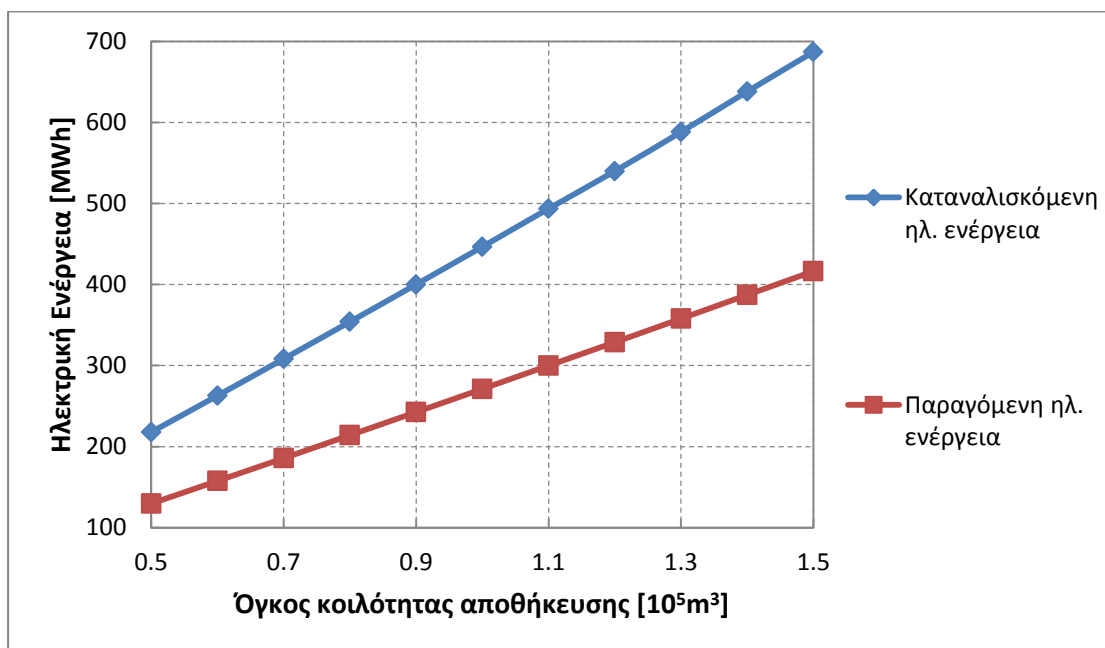


Διάγραμμα 5.18 : Βαθμός απόδοσης συστήματος συναρτήσει του όγκου της κοιλότητας αποθήκευσης αέρα

Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι η αλλαγή στον όγκο της κοιλότητας αποθήκευσης επηρεάζει και τους χρόνους φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος, όπως και την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος αποθήκευσης, τόσο μεγαλύτεροι είναι και οι χρόνοι φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς μεγαλύτερη ποσότητα μάζας αέρα χρειάζεται να εισαχθεί στην κοιλότητα για τη μεταβολή της πίεσης της από 70 σε 100 bar, όπως και τόσο μεγαλύτερες είναι οι ποσότητες της καταναλισκόμενης αλλά και παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παραπάνω μεταβολές παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 5.19 και 5.20 αντίστοιχα.



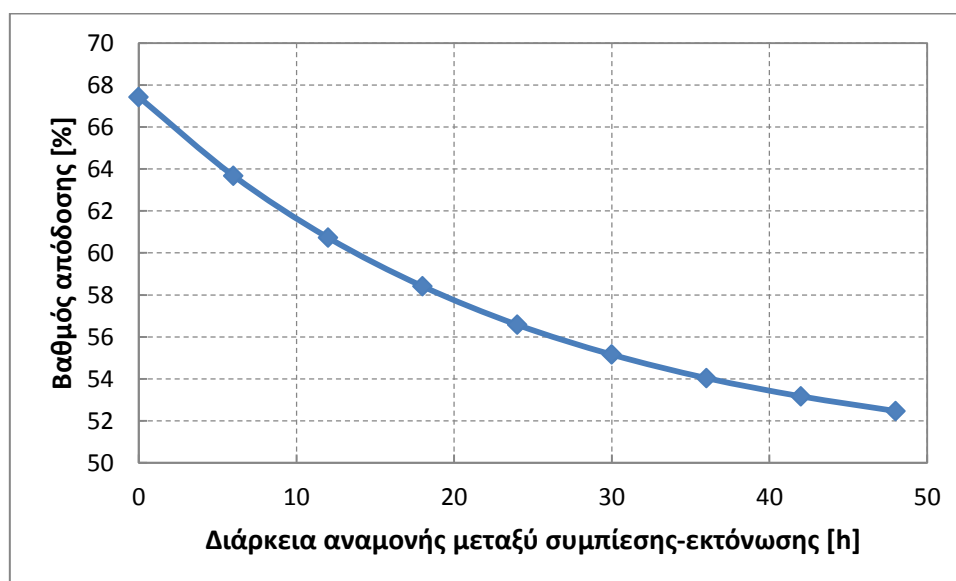
Διάγραμμα 5.19 : Διάρκεια φόρτισης και αποφόρτισης του συστήματος συναρτήσει του όγκου της κοιλότητας αποθήκευσης αέρα



Διάγραμμα 5.20 : Καταναλισκόμενη και παραγόμενη ενέργεια του συστήματος συναρτήσει του όγκου της κοιλότητας αποθήκευσης αέρα

5.7.2 Διάρκεια αναμονής συστήματος

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα μοντελοποιήθηκε ώστε ο κύκλος λειτουργίας του να διαρκεί περίπου 24 ώρες, προκειμένου να πραγματοποιείται ένας κύκλος κάθε ημέρα. Ο χρόνος αναμονής του συστήματος από τη στιγμή που τελειώνει η συμπίεση έως την αρχή της εκτόνωσης επιλέχθηκε να είναι 12 ώρες. Ο βαθμός απόδοσης που προέκυψε προφανώς δεν είναι ο μέγιστος δυνατός, καθώς κατά το διάστημα αναμονής το σύστημα χάνει ενέργεια λόγω απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον από τη θερμή και την ψυχρή δεξαμενή ελαίου, όσο και από τον αέρα της κοιλότητας προς τα τοιχώματά της. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος προκύπτει, όπως είναι λογικό, για μηδενικό χρόνο αναμονής μεταξύ συμπίεσης και εκτόνωσης. Στο Διάγραμμα 5.21 φαίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης για διαφορετικούς χρόνους αναμονής του συστήματος, από 0 έως 48 ώρες.

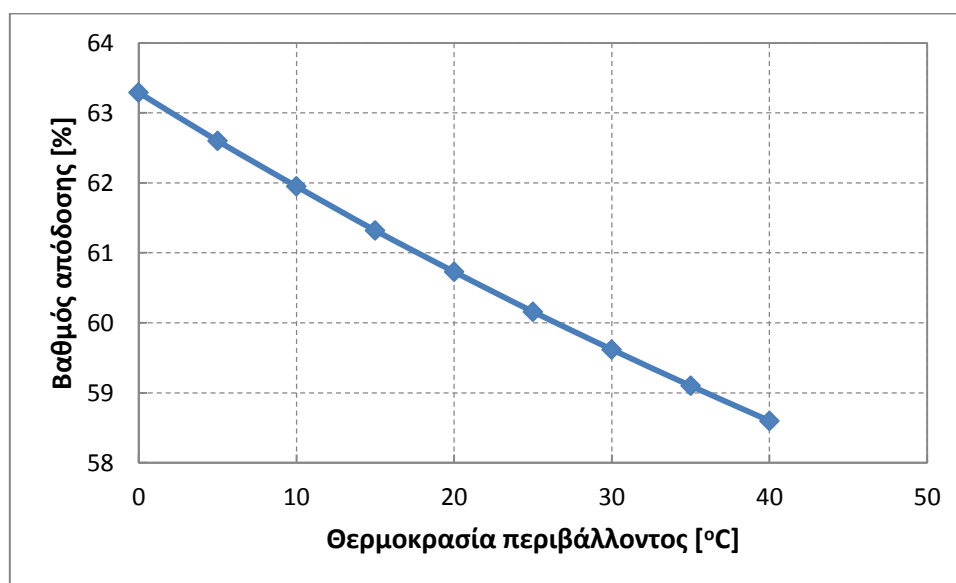


Διάγραμμα 5.21 : Βαθμός απόδοσης συστήματος συναρτήσει του χρόνου αναμονής μεταξύ τέλους συμπίεσης-αρχής εκτόνωσης

Παρατηρείται ότι ο χρόνος αναμονής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος, με τον βαθμό απόδοσης να κυμαίνεται από τον μέγιστο δυνατό (67,4%) για μηδενικό χρονικό διάστημα αναμονής, έως 52,5% για αναμονή ίση με 48 ώρες. Επίσης, ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται ο βαθμός απόδοσης φθίνει με την αύξηση των ωρών αναμονής. Αυτό συμβαίνει γιατί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δεξαμενών ελαίου και αέρα και του περιβάλλοντός τους μειώνεται με το χρόνο, οδηγώντας σε μικρότερες απώλειες θερμότητας. Τέλος, σημειώνεται ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη γεννήτρια μεταβάλλεται από 301 MWh για μηδενική αναμονή έως 234 MWh για 48 ώρες αναμονής.

5.7.3 Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Μια παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση σχεδόν κάθε ενεργειακού συστήματος, και εκ των πραγμάτων δεν διατηρείται σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η επίδραση της στο βαθμό απόδοσης του συστήματος φαίνεται στο Διάγραμμα 5.22. Φαίνεται ότι το σύστημα λειτουργεί αποδοτικότερα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, με βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται από 58,6% για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C έως 63,3% για 0°C.



Διάγραμμα 5.22 : Βαθμός απόδοσης συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος

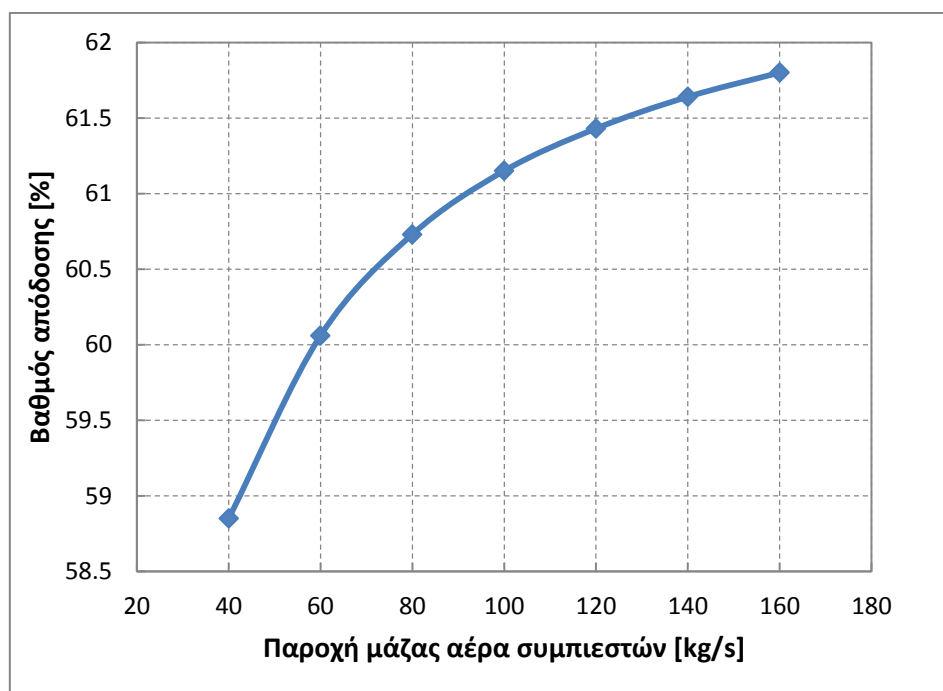
Εκτός από την επίδραση της στο βαθμό απόδοσης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει και τη θερμοκρασία που επικρατεί στις δεξαμενές ελαίου, αλλά και στην κοιλότητα αποθήκευσης αέρα, κατά τη διάρκεια του κύκλου. Με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η ελάχιστη και η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε κάθε μια από τις παραπάνω τρεις συνιστώσες του συστήματος αυξάνεται επίσης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το εύρος των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών (μέγιστη - ελάχιστη) στις δεξαμενές ελαίου και αέρα κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας του συστήματος, για τις εξής τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος: i) 0°C ii) 20°C iii) 40°C.

Θερμοκρασία Περιβάλλοντος [°C]	Θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής ελαίου [°C]		Θερμοκρασία θερμής δεξαμενής ελαίου [°C]		Θερμοκρασία κοιλότητας αποθήκευσης αέρα [°C]	
	Ελάχιστη	Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέγιστη
0	9	54	251	275	-3	36
20	25	68	266	275	14	54
40	40	82	275	294	31	72

Πίνακας 5.4 : Μέγιστες και ελάχιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες εντός των δεξαμενών ελαίου και αέρα για ορισμένες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

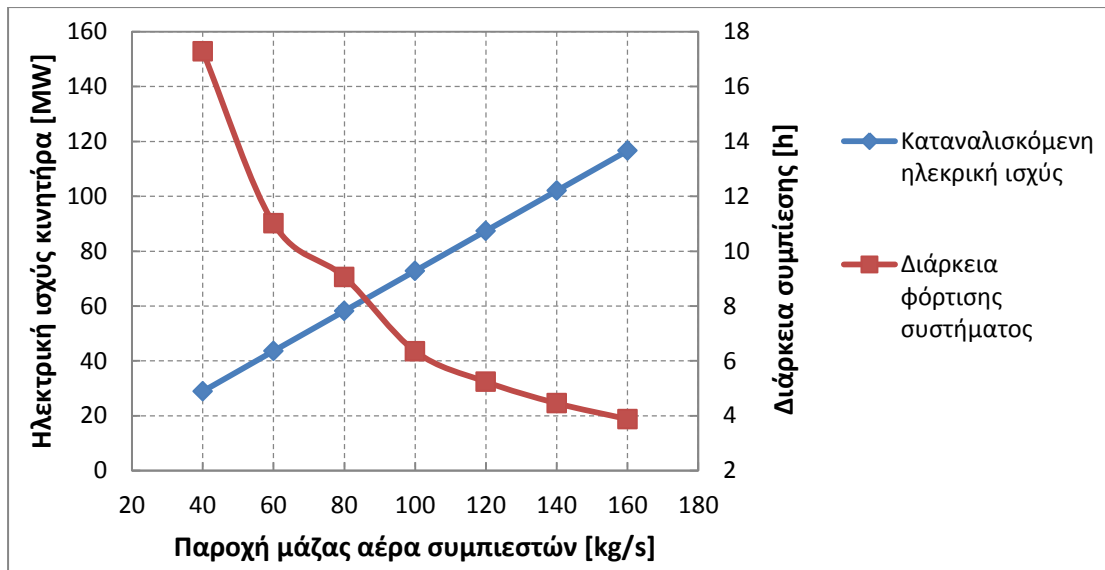
5.7.4 Παροχή μάζας αέρα συμπιεστών

Η μεταβολή της παροχή μάζας αέρα που αναρροφούν οι συμπιεστές επηρεάζει το βαθμό απόδοσης του συστήματος, το χρόνο φόρτισης, αλλά και την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ. Σημειώνεται ότι η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου όσον αφορά την παροχή αέρα γίνεται με την προϋπόθεση ότι ο βαθμός απόδοσης των συμπιεστών παραμένει σταθερός και ίσος με αυτόν που υποτέθηκε αρχικά για όλες τις διαφορετικές τιμές της παροχής, ή ότι υπάρχουν κατάλληλοι συμπιεστές για κάθε διαφορετική τιμή της παροχής που να ικανοποιούν την παραπάνω υπόθεση. Επομένως, τα παρακάτω αποτελέσματα ενδεχομένως να είναι περισσότερο χρήσιμα για την επιλογή των κατάλληλων συμπιεστών κατά την εγκατάσταση του συστήματος. Στο Διάγραμμα 5.23 παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος για διαφορετικές τιμές της παροχής αέρα προς συμπίεση. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της παροχής μάζας αέρα ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται, αλλά με διαρκώς μειούμενο ρυθμό. Το εύρος μεταβολής του είναι από 58,9% για παροχή αέρα συμπιεστών 40 kg/s έως 61,8% για παροχή 160 kg/s.



Διάγραμμα 5.23 : Βαθμός απόδοσης συστήματος συναρτήσει της παροχής μάζας αέρα των συμπιεστών

Το Διάγραμμα 5.24 δείχνει τη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται κατά τη συμπίεση όπως και το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωσή της, για διαφορετικές τιμές της παροχής μάζας αέρα των συμπιεστών. Παρατηρήθηκε ότι, όπως είναι λογικό, με την αύξηση της παροχής αέρα το σύστημα φορτίζεται ταχύτερα, αλλά ταυτόχρονα καταναλώνει περισσότερη ηλεκτρική ισχύ για να επιτευχθεί η συμπίεση.

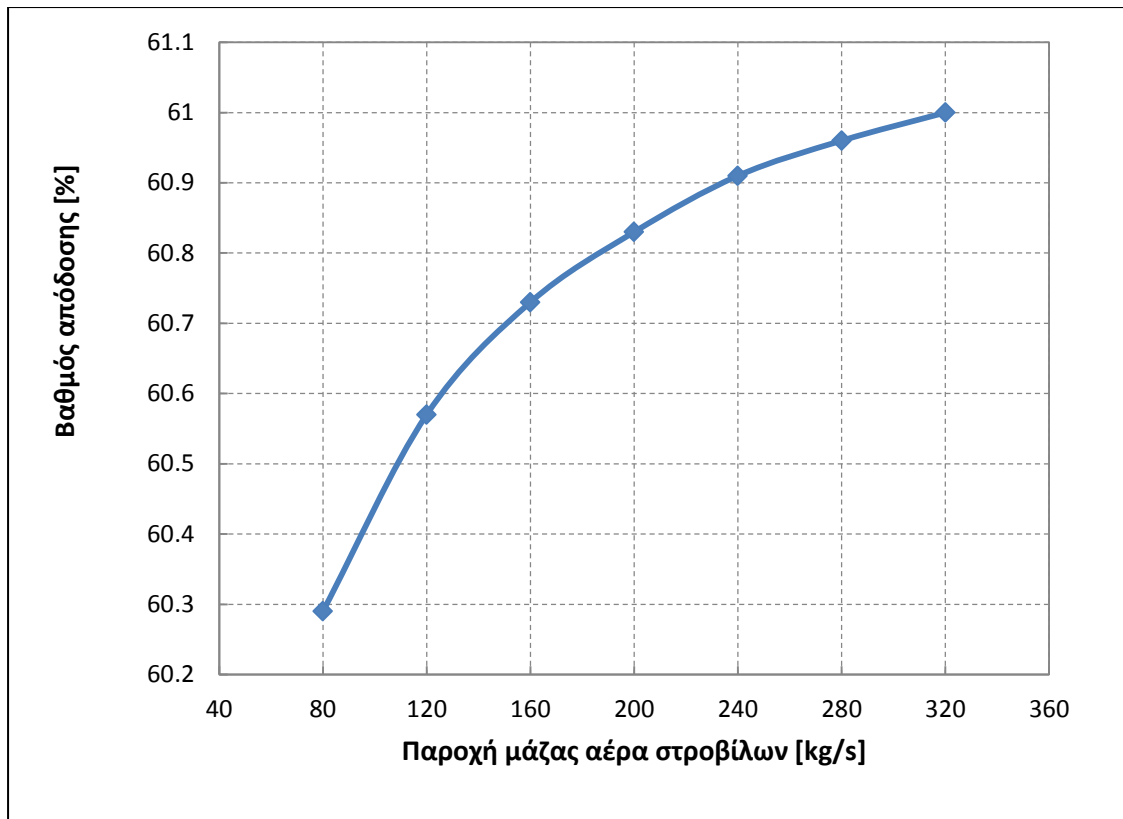


Διάγραμμα 5.24 : Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς και διάρκεια φόρτισης συστήματος συναρτήσει της παροχής μάζας αέρα των συμπιεστών

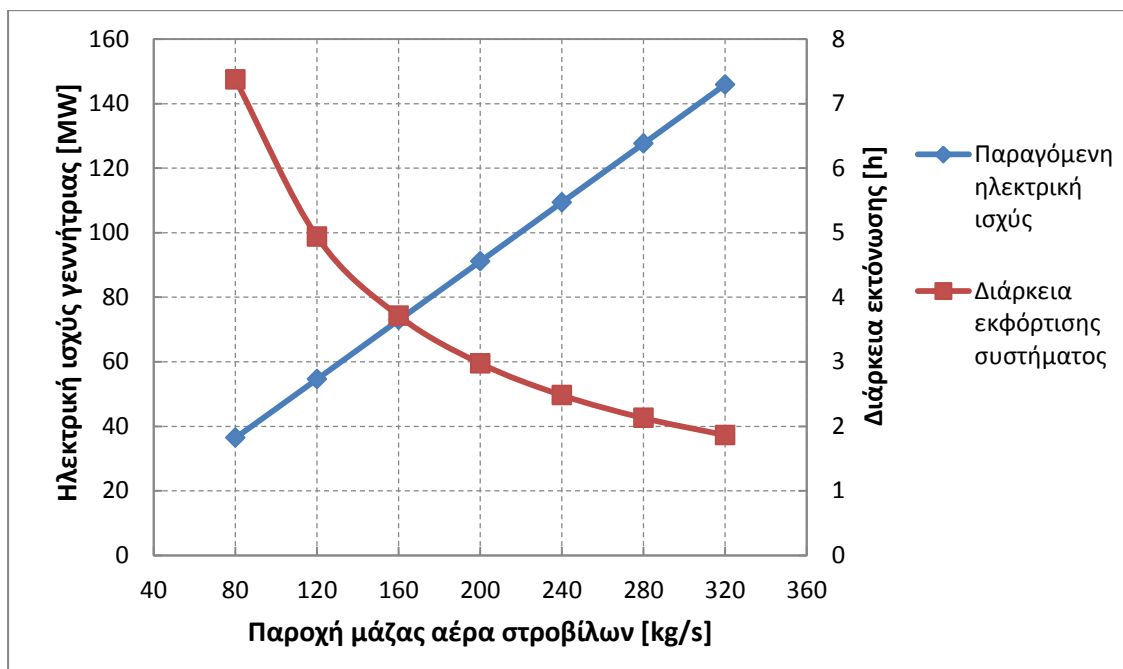
5.7.5 Παροχή μάζας αέρα στροβίλων

Αντίστοιχα με τη συμπίεση, έτσι και κατά την εκτόνωση, διαφορετικές τιμές για την παροχή αέρα των στροβίλων επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης, την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ και το χρόνο εκφόρτισης του συστήματος. Η υπόθεση περί σταθερού βαθμού απόδοσης των στροβίλων στις αλλαγές της παροχής μάζας αέρα ισχύει και στην παρούσα υποενοότητα, όπως και για την παροχή αέρα των συμπιεστών προηγουμένως. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου όσον αφορά τα τρία παραπάνω μεγέθη για εύρος παροχών αέρα προς εκτόνωση από 80 kg/s έως 320 kg/s παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 5.25 και 5.26. Φαίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης επηρεάζεται λιγότερο από την παροχή αέρα των στροβίλων, σε σχέση με την παροχή των συμπιεστών, καθώς μεταβάλλεται λιγότερο από μία μονάδα (από 60,3% έως 61%) στο εξεταζόμενο εύρος παροχών αέρα των στροβίλων. Το εξεταζόμενο εύρος αυτό (80-320 kg/s) είναι βέβαια διαφορετικό από το αντίστοιχο που μελετήθηκε για την παροχή αέρα των συμπιεστών (40-160 kg/s), αλλά επιλέχθηκε με κριτήριο να διατηρείται σταθερός ο λόγος της παροχής αέρα προς συμπίεση προς την παροχή αέρα προς εκτόνωση, και ίσος με 0,5.

Επίσης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.26, η ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις ανάγκες σε ηλεκτρική ισχύ, αλλάζοντας την τιμή της παροχής μάζας αέρα των στροβίλων. Έτσι, μπορεί να επιλεγθεί είτε να παράγει το σύστημα μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ αλλά για μικρό χρονικό διάστημα, είτε να αποφορτίζεται αργά καλύπτοντας μικρότερες ανάγκες ηλεκτρικής ισχύος.



Διάγραμμα 5.25 : Βαθμός απόδοσης συστήματος συναρτήσει της παροχής μάζας αέρα των στροβίλων



Διάγραμμα 5.26 : Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς και διάρκεια εκφόρτισης συστήματος συναρτήσει της παροχής μάζας αέρα των στροβίλων

5.8 Επέκταση μοντέλου με καύση

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξετάστηκε η επέκταση του μοντέλου με την προσθήκη θαλάμων καύσης φυσικού αερίου πριν τον δεύτερο και τον τρίτο στρόβιλο, ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί σε αυξημένες απαιτήσεις ηλεκτροπαραγωγής, όταν υπάρχει η αντίστοιχη ανάγκη. Οι θάλαμοι καύσης επιλέχθηκε να τοποθετηθούν μετά από τους εναλλάκτες των συγκεκριμένων σταδίων εκτόνωσης, έτσι ώστε να συνεχίζει να αξιοποιείται η αποθηκευμένη θερμότητα της συμπίεσης, μέσω της προθέρμανσης του αέρα από το έλαιο της θερμής δεξαμενής πριν την καύση του στους θαλάμους.

Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση του θαλάμου καύσης πριν το δεύτερο στρόβιλο στη λειτουργία του συστήματος. Στην ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου έγινε σαφές ότι ο περιορισμός που τίθεται σχετικά με την ύπαρξη του συγκεκριμένου θαλάμου είναι ότι η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το δεύτερο στρόβιλο θα πρέπει να είναι επαρκώς χαμηλότερη της θερμοκρασίας της θερμής δεξαμενής, καθώς διαφορετικά ο εναλλάκτης που ακολουθεί και προθερμαίνει ξανά τον αέρα μέσω της θερμότητας του ελαίου δε θα έχει καλή απόδοση. Από την άλλη, ο εναλλάκτης δε θα ήταν συμφέρον να τεθεί εκτός λειτουργίας, διότι ένα μεγάλο κλάσμα της αποθηκευμένης θερμότητας από τη συμπίεση θα έμενε ανεκμετάλλευτο. Η θερμοκρασία του ελαίου της θερμής δεξαμενής κατά την εκτόνωση είναι περίπου 275°C, επομένως απαιτείται ο αέρας στην έξοδο του δεύτερου στρόβιλου να έχει αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία, τυπικά κάτω από 200°C.

Πραγματοποιήθηκε μια αρχική προσομοίωση για ορισμένες τιμές παροχής καυσίμου στον θάλαμο καύσης πριν το δεύτερο στρόβιλο, και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα για τη θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το δεύτερο στρόβιλο:

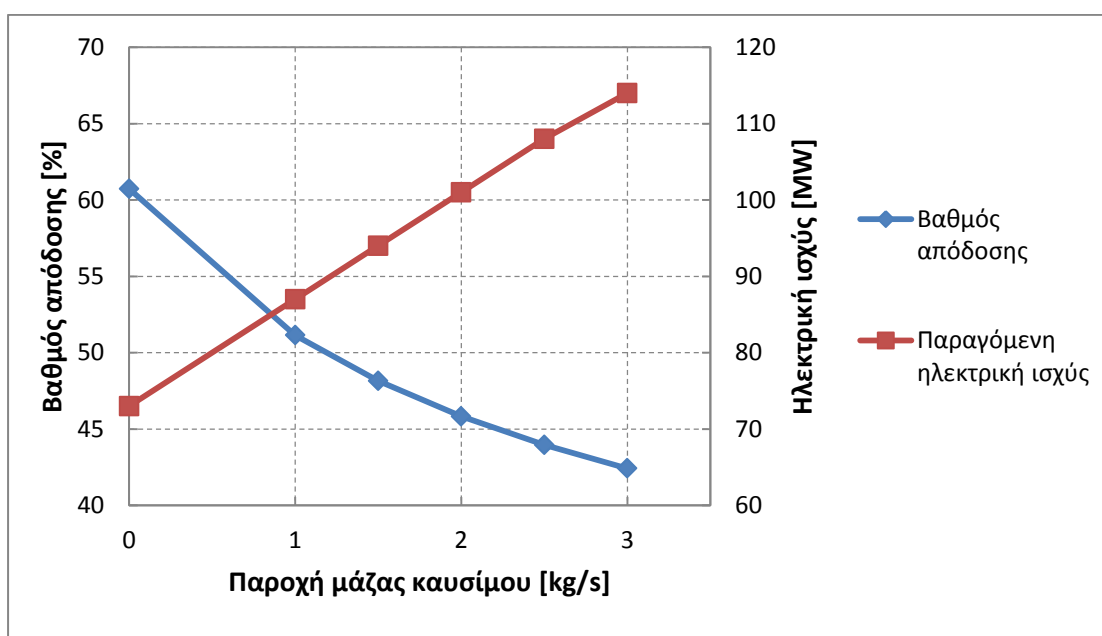
Παροχή καυσίμου στο θάλαμο καύσης πριν το δεύτερο στρόβιλο [kg/s]	Θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του δεύτερου στρόβιλου [°C]
0	87
0,25	139
0,50	191
0,75	242
1	294

Πίνακας 5.5 : Θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του δεύτερου στρόβιλου συναρτήσει της παροχής καυσίμου στο θάλαμο καύσης πριν το δεύτερο στρόβιλο

Γίνεται σαφές από τον Πίνακα 5.5, ότι για να επιτευχθεί θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το δεύτερο στρόβιλο επαρκώς χαμηλότερη της θερμοκρασίας του θερμού ελαίου ώστε να λειτουργεί αποδοτικά ο τελευταίος εναλλάκτης, η παροχή καυσίμου στον εξεταζόμενο θάλαμο καύσης πρέπει να είναι ιδιαίτερα μικρή (για θερμοκρασία εξόδου κάτω από 200°C για παράδειγμα, η παροχή πρέπει να είναι μικρότερη από 0,55 kg/s). Αν ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι η παροχή αέρα στους στρόβιλους είναι 160 kg/s, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το μίγμα αέρα-καυσίμου είναι τόσο φτωχό σε καύσιμο, που η καύση υπό τέτοιες συνθήκες είναι ανέφικτη. Επομένως το ενδεχόμενο τοποθέτησης θαλάμου καύσης πριν το δεύτερο στρόβιλο απορρίπτεται.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η τοποθέτηση θαλάμου καύσης πριν από τον τελευταίο στρόβιλο, όπου δεν υπάρχει κανένας θερμοκρασιακός περιορισμός, καθώς

το καυσαέριο στη συνέχεια θα εξέρχεται στην ατμόσφαιρα. Επομένως, και οι τρεις εναλλάκτες θα λειτουργούν αποδοτικά, αποδίδοντας την αποθηκευμένη θερμότητα της συμπίεσης στον αέρα χωρίς προβλήματα, διότι προηγούνται του θαλάμου καύσης. Έτσι, δεν υπάρχουν περιορισμοί για την παροχή μάζας καυσίμου που καίγεται στον συγκεκριμένο θάλαμο καύσης. Οι τιμές της παροχής καυσίμου που εξετάστηκαν είναι από 1 έως 3 kg/s. Στο Διάγραμμα 5.27 παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της παροχής καυσίμου. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίστηκε από την εξίσωση (1), καθώς για το διάστημα που πραγματοποιείται καύση το σύστημα μεταπίπτει από AA-CAES σε συμβατικό CAES. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, ο βαθμός απόδοσης μειώνεται, παρόλο που η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αυξάνεται, με την αύξηση της παροχής καυσίμου, καθώς αυξάνεται και ο παρονομαστής της εξίσωσης (1). Παρόλα αυτά, μέσω της καύσης, υπάρχει η δυνατότητα σημαντικής αύξησης της παραγόμενης ισχύος από τη γεννήτρια, καθώς από 73 MW ισχύος που παράγονται χωρίς να λειτουργεί ο θάλαμος καύσης, το σύστημα μπορεί να φτάσει τα 114 MW ηλεκτροπαραγωγής, για παροχή καυσίμου ίση με 3 kg/s.



Διάγραμμα 5.27 : Βαθμός απόδοσης και παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συστήματος συναρτήσει της παροχής καυσίμου σε θάλαμο καύσης πριν τον τελευταίο στρόβιλο (LPT2)

Παροχή καυσίμου στο θάλαμο καύσης πριν τον τελευταίο στρόβιλο [kg/s]	Θερμοκρασία εξόδου αέρα στην ατμόσφαιρα [°C]	Συνολική ποσότητα καιόμενου καυσίμου κατά την εκτόνωση [tn]
0	88	0
1	295	13,36
1,5	397	20,04
2	499	26,72
2,5	600	33,40
3	700	40,08

Πίνακας 5.6 : Θερμοκρασία εξόδου αέρα στην ατμόσφαιρα και συνολική μάζα καιόμενου καυσίμου συναρτήσει της παροχής καυσίμου

Τέλος, στον Πίνακα 5.6 φαίνονται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον τελευταίο στρόβιλο στην ατμόσφαιρα και η συνολική μάζα φυσικού αερίου που καίγεται κατά την εκτόνωση, συναρτήσει της παροχής καυσίμου. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία εξόδου του αέρα στην ατμόσφαιρα αυξάνεται σημαντικά, καθώς μεταβάλλεται από 88°C στην περίπτωση χωρίς καύση μέχρι 700°C για παροχή καυσίμου 3 kg/s.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

6.1 Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η κατασκευή ενός μοντέλου δυναμικής προσομοίωσης της λειτουργίας ενός αδιαβατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES), η μελέτη της απόδοσης και της συμπεριφοράς του καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του, και ο καθορισμός των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοσή του. Οι συνιστώσες του μοντελοποιημένου συστήματος είναι μια διάταξη συμπίεσης τεσσάρων συμπιεστών και τριών εναλλακτών για την αποθήκευση της θερμότητας του αέρα, μια διάταξη εκτόνωσης που αποτελείται από τρεις στροβίλους και τρεις εναλλάκτες προθέρμανσης του αέρα, μια κοιλότητα αποθήκευσης αέρα και δύο δεξαμενές αποθήκευσης του μέσου μεταφοράς θερμότητας (βιομηχανικό έλαιο), μία θερμή και μία ψυχρή.

Το σύστημα μοντελοποιήθηκε ώστε ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας του να διαρκεί περίπου 24 ώρες (ένας κύκλος λειτουργίας ανά ημέρα), και μεταξύ του τέλους της συμπίεσης και της αρχής της εκτόνωσης να υπάρχει ένα διάστημα αναμονής 12 ωρών. Η διάρκεια της συμπίεσης προέκυψε 8,06 ώρες, χρόνος κατάλληλος ώστε το σύστημα να φορτίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας χρησιμοποιώντας φθηνή ηλεκτρική ισχύ, και εκφορτίζεται σε διάστημα 3,71 ωρών, σε περιόδους υψηλής ζήτησης ισχύος. Η μέση τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος κατά την εκτόνωση είναι 73 MW, ενώ κατά τη συμπίεση καταναλώνεται κατά μέσο όρο ισχύς 55 MW. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος προέκυψε 60,73% και είναι πολύ κοντά στις αναφερόμενες τιμές της βιβλιογραφίας για συστήματα AA-CAES [53, 54, 55, 56]. Σημειώνεται βέβαια ότι ο βαθμός απόδοσης μπορεί να φτάσει το 67,4% εάν η εκτόνωση αρχίσει κατευθείαν μετά την ολοκλήρωση της συμπίεσης.

Οι απώλειες ενέργειας του συστήματος οφείλονται κυρίως στις απώλειες θερμότητας από τον αποθηκευμένο αέρα στην κοιλότητα προς τα τοιχώματά της, καθώς μέσω των απωλειών αυτών χάνεται το 10,3% του συνόλου της εισερχόμενης ενέργειας στο σύστημα, και στις απώλειες λόγω εξόδου του θερμού αέρα από τους στροβίλους στο περιβάλλον, που αποτελούν το 5,3% της εισερχόμενης ενέργειας. Οι υπόλοιπες απώλειες του συστήματος, δηλαδή οι απώλειες γεννήτριας, κινητήρα, και οι απώλειες θερμότητας από τις δύο δεξαμενές ελαίου προς στο περιβάλλον αποτελούν αθροιστικά λιγότερο από το 4% της συνολικής εισερχόμενης ενέργειας στο σύστημα.

Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας καθορίστηκε ποια από τα εξεταζόμενα μεγέθη έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στο βαθμό απόδοσης του συστήματος AA-CAES. Παρατηρήθηκε ότι από τις πέντε εξεταζόμενες παραμέτρους τη μεγαλύτερη επιρροή ασκεί ο χρόνος αναμονής του συστήματος μεταξύ τέλους συμπίεσης και αρχής εκτόνωσης, καθώς ο βαθμός απόδοσης αν ο χρόνος αυτός είναι μηδενικός είναι κατά 15 ποσοστιαίες μονάδες υψηλότερος από τον αντίστοιχο αν το χρονικό διάστημα αυτό είναι 48 ώρες (67,4% έναντι 52,5%). Η θερμοκρασία περιβάλλοντος παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στο βαθμό απόδοσης, καθώς παρατηρήθηκε ότι η απόδοση αυξάνεται κατά 5 ποσοστιαίες μονάδες αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 0°C, σε σύγκριση με τους 40°C. Μικρότερη αλλά όχι αμελητέα επίδραση στο βαθμό απόδοσης έχουν και οι υπόλοιπες τρεις παράμετροι που εξετάστηκαν, οι οποίες, κατά

φθίνουσα σειρά επιρροής, είναι: η παροχή αέρα των συμπιεστών, ο όγκος της κοιλότητας αποθήκευσης αέρα και η παροχή αέρα των στρόβιλων.

Επίσης, εξετάστηκε η προσθήκη θαλάμων καύσης φυσικού αερίου πριν το δεύτερο και τον τρίτο στρόβιλο, για την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής, όταν υπάρχει επιπλέον ανάγκη. Το ενδεχόμενο προσθήκης θαλάμου καύσης πριν το δεύτερο στρόβιλο απορρίφθηκε, καθώς για λογικές τιμές της παροχής καυσίμου η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το δεύτερο στρόβιλο είναι απαγορευτικά μεγάλη για την απόδοση της αποθηκευμένης θερμότητας του θερμού ελαίου στον αέρα από τον εναλλάκτη που ακολουθεί. Αντιθέτως, η προσθήκη θαλάμου καύσης πριν τον τρίτο στρόβιλο κρίνεται μια καλή λύση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης επιπλέον ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αυξάνεται κατά ποσοστό έως και περισσότερο του 50% της αρχικά παραγόμενης, για τις τιμές της παροχής καυσίμου που μελετήθηκαν.

Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται για τα συστήματα AA-CAES είναι ότι παρόλο που δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα κάποιο ολοκληρωμένο σύστημα βιομηχανικής κλίμακας, αποτελούν έναν πολλά υποσχόμενο τρόπο αποθήκευσης ενέργειας, και μάλιστα ανανεώσιμο, που είναι σίγουρο ότι θα απασχολήσει ιδιαίτερα τις ενεργειακές βιομηχανίες στο μέλλον. Τα AA-CAES παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης, χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και μεγαλύτερο σεβασμό στο περιβάλλον συγκριτικά με τα συμβατικά CAES, ενώ έχουν παρόμοια απόδοση και απαιτούν μικρότερες περιβαλλοντικές παρεμβάσεις κατά την κατασκευή τους σε σχέση με τους κύριους ανταγωνιστές τους στην μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης. Επομένως, θα ήταν σίγουρα ωφέλιμο οι εκτεταμένες έρευνες που διενεργούνται για τα συστήματα αυτά να γίνουν σύντομα πράξη, ώστε να γίνει ένα ακόμα βήμα για την επίλυση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος και τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Από την παρούσα εργασία προέκυψαν αρκετές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στα συστήματα AA-CAES. Καταρχάς, στο μοντελοποιημένο σύστημα υπάρχει βαλβίδα που στραγγαλίζει τον αέρα πριν την είσοδό του στη διάταξη εκτόνωσης, ώστε να εξασφαλιστεί σταθερή πίεση εισόδου στους στρόβιλους. Θα είχε ενδιαφέρον η εξέταση ενός μοντέλου AA-CAES, στο οποίο οι στρόβιλοι θα ήταν ικανοί να λειτουργούν με μεταβαλλόμενη πίεση εισόδου (πιθανώς αν έχουν ειδικά προσαρμοσμένη βαθμίδα εισόδου), ώστε να αποφευχθούν οι εξεργειακές απώλειες που προκαλεί η βαλβίδα στραγγαλισμού. Αυτό ενδεχομένως θα μπορούσε να γίνει ενσωματώνοντας στο μοντέλο τους χάρτες λειτουργίας των στρόβιλων, ώστε να ληφθεί υπόψη η διαφορετική απόδοσή τους καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες εισόδου του αέρα σε αυτούς.

Στη μείωση των εξεργειακών απωλειών του συστήματος θα συντελούσε και η μη ανάμιξη των ρευμάτων του ελαίου στην έξοδο των εναλλακτών συμπίεσης και εκτόνωσης. Επομένως θα ήταν ενδιαφέρουσα η μελέτη συστήματος στο οποίο να μην πραγματοποιούνταν ανάμιξη, αλλά να είχε τρεις θερμές και τρεις ψυχρές δεξαμενές ελαίου, σε κάθε μία από τις οποίες το έλαιο να αποθηκεύεται σε ξεχωριστή θερμοκρασία.

Επίσης, παρατηρείται ότι κατά την προσομοίωση ενός κύκλου λειτουργίας του συστήματος, η στάθμη της θερμής δεξαμενής ελαίου στο τέλος του κύκλου είναι στο 11%, ενώ στην αρχή του κύκλου ήταν στο 5%. Το φαινόμενο αυτό ίσως να δημιουργήσει προβλήματα μετά από διαδοχικούς κύκλους λειτουργίας, καθώς θα υπάρχει μια μικρή τάση συσσώρευσης ελαίου στη θερμή δεξαμενή σε κάθε κύκλο, με τον κίνδυνο σε κάποιο κύκλο λειτουργίας να μην αρκεί η ποσότητα του ελαίου της ψυχρής δεξαμενής για τις ανάγκες αποθήκευσης της θερμότητας του αέρα κατά τη συμπίεση. Συμπερασματικά, θα ήταν χρήσιμα τα αποτελέσματα μιας μελέτης προσομοίωσης πολλών διαδοχικών κύκλων λειτουργίας, η οποία θα επιχειρούσε να δώσει λύση σε αυτό το πρόβλημα. Αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί είτε μέσω ψύξης και μεταφοράς της περίσσειας του ελαίου από τη θερμή δεξαμενή στην ψυχρή μετά από κάθε κύκλο, είτε χρησιμοποιώντας τη θερμότητα της πλεονάζουσας ποσότητας του θερμού ελαίου εξυπηρετώντας κάποιες θερμικές ανάγκες, και αναπληρώνοντας σε κάθε κύκλο την απαιτούμενη ποσότητα ελαίου στην ψυχρή δεξαμενή.

Όσον αφορά το σύστημα καύσης που προστέθηκε πριν τον τελευταίο στρόβιλο, θα μπορούσε να εξεταστεί η ανάκτηση μέρους της θερμότητας του αέρα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στην έξοδό του στην ατμόσφαιρα, είτε για περαιτέρω προθέρμανση του αέρα στα προηγούμενα στάδια εκτόνωσης, είτε για εξυπηρέτηση άλλων αναγκών θερμότητας.

Όσον αφορά τις παραδοχές του μοντέλου, είναι φανερό ότι υπάρχουν πολλά περιθώρια για περαιτέρω έρευνα. Το σύστημα δεν λαμβάνει υπόψη τις απώλειες πίεσης στις διάφορες συνιστώσες του (εναλλάκτες θερμότητας, σωληνώσεις, κοιλότητα αποθήκευσης αέρα), αλλά ούτε τη μεταβατική λειτουργία των στροβιλομηχανών. Επίσης, ο αέρας θεωρήθηκε ιδανικό αέριο, και μάλιστα με σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα στο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας του συστήματος, όμως η πραγματικότητα είναι ότι δεν υπακούει πλήρως στην καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, ούτε έχει τελείως σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα. Από την ανάπτυξη ενός ακόμα πιο λεπτομερούς μοντέλου, που να λαμβάνει υπόψη κάποια από τα παραπάνω φαινόμενα, ίσως να εξαχθούν επιπλέον χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία των συστημάτων AA-CAES.

Γενικεύοντας τις προτάσεις για περαιτέρω μελέτη, ο συνδυασμός ενός συστήματος AA-CAES με ένα αιολικό πάρκο μεγάλης κλίμακας στην ίδια εγκατάσταση θεωρείται ότι θα αύξανε κατά πολύ τον συντελεστή εκμεταλλευσιμότητάς του πάρκου, αλλά και θα μείωνε το λειτουργικό κόστος του συστήματος AA-CAES, εξαλείφοντας την ανάγκη άντλησης ηλεκτρικής ισχύος από το δίκτυο για τη συμπίεση του αέρα. Επίσης, η μελέτη ενός συστήματος με υψηλότερη θερμοκρασία αποθήκευσης της θερμότητας (της τάξεως των 600°C), έστω και με δύο διαφορετικά μέσα αποθήκευσης θερμότητας, πιθανότατα να βελτιώνε ακόμα περισσότερο τον βαθμό απόδοσής του. Τέλος, μια λεπτομερής οικονομική ανάλυση ενός συστήματος AA-CAES, που εκτός από το κόστος εγκατάστασης και τα λειτουργικά κόστη, να λάμβανε υπόψη και την κυμαινόμενη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ως κριτήριο για τη λειτουργία του, θα παρείχε χρήσιμες πληροφορίες για την οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων AA-CAES.

Παράρτημα Α

Υπολογισμός της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων της υπόγειας κοιλότητας T_w

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας T_w σε κάθε χρονικό βήμα έγινε με βάση την ανάλυση που παρουσιάζεται στην [49]. Η μεταφορά θερμότητας από τον αέρα στα τοιχώματα της κυλινδρικής κοιλότητας περιγράφεται από την εξίσωση μη μόνιμης μεταφοράς θερμότητας με αγωγή σε ημιάπειρο σώμα, με την υπόθεση ομοιόμορφων ιδιοτήτων του αέρα εντός της κοιλότητας, δηλαδή θεωρείται ότι η θερμοκρασία του αέρα στην κοιλότητα είναι συνάρτηση μόνο του χρόνου και όχι του σημείου εντός της κοιλότητας, θεώρηση που συμφωνεί με την υπόθεση που έχει ήδη γίνει για τον αποθηκευόμενο αέρα. Για λόγους απλότητας, θεωρούμε την κοιλότητα ως έναν κύλινδρο απείρου μήκους, ώστε να προκύψει μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς θερμότητας. Η εξίσωση Fourier για σταθερό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, με απουσία πηγών θερμότητας εντός της κοιλότητας, και με χρήση κυλινδρικών συντεταγμένων, είναι:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_r \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (54)$$

Όπου r είναι η απόσταση από το εξωτερικό τοίχωμα της κοιλότητας έως ένα σημείο εντός του πετρώματος, και α_r η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα του πετρώματος άλατος (m^2/s), που ορίζεται ως:

$$\alpha_r = \frac{k_r}{\rho_{p,r} \cdot c_{p,r}} \quad (55)$$

Για ένα διακεκριμένο σύνολο σημείων $[x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_N]$ μιας συνάρτησης $f(x)$, το ανάπτυγμα Taylor της σε απόσταση Δx πριν και μετά από ένα σημείο της x_i είναι:

$$f(x_i + \Delta x) = f(x_i) + \Delta x \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x_i} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left. \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \right|_{x_i} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 f(x)}{\partial x^3} \right|_{x_i} + \dots \quad (56)$$

$$f(x_i - \Delta x) = f(x_i) - \Delta x \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x_i} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left. \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \right|_{x_i} - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 f(x)}{\partial x^3} \right|_{x_i} + \dots \quad (57)$$

Για λόγους απλότητας, συμβολίζουμε: $f(x_i + \Delta x) = f_{i+1}$, $f(x_i - \Delta x) = f_{i-1}$ και $f(x_i) = f_i$.

Αφαιρώντας την εξίσωση (57) από την (56) προκύπτει:

$$f_{i+1} - f_{i-1} = 2\Delta x \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x_i} + 2 \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 f(x)}{\partial x^3} \right|_{x_i} + \dots \quad (58)$$

Λύνοντας την τελευταία εξίσωση ως προς την πρώτη παράγωγο της $f(x)$ στο σημείο x_i γίνεται:

$$\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x_i} = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (59)$$

Όπου $O(\Delta x^2)$ είναι το σφάλμα περικοπής της σειράς Taylor. Η τελευταία εξίσωση είναι η διακριτοποίηση της πρώτης παραγώγου με κεντρική διαφορά, μιας συνάρτησης με συνεχή πρώτη παράγωγο.

Προσθέτοντας τις εξισώσεις (56) και (57) προκύπτει:

$$f_{i+1} + f_{i-1} = 2f_i + (\Delta x)^2 \left. \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \right|_{x_i} + \dots \quad (60)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς τη δεύτερη παράγωγο προκύπτει:

$$\left. \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \right|_{x_i} = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x^2) \quad (61)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η διακριτοποίηση της δεύτερης παραγώγου με κεντρική διαφορά, μιας συνάρτησης με συνεχή πρώτη παράγωγο.

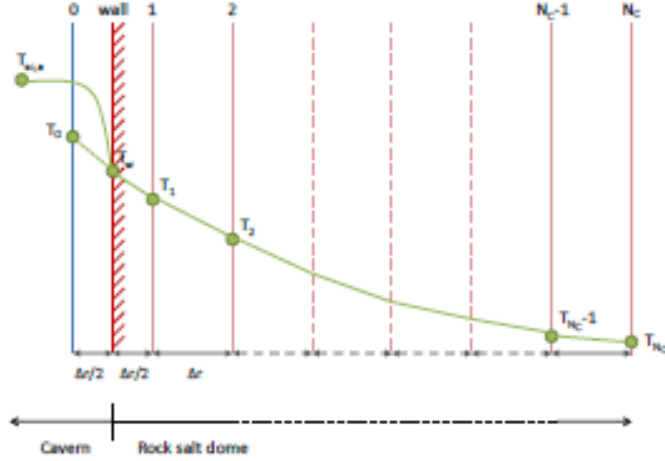
Η διακριτοποίηση της εξίσωσης (54) γίνεται μέσω των εξισώσεων (59) και (61), αμελώντας τα σφάλματα περικοπής:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{r_i} = \alpha_r \cdot \left[\frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r_i} \left(\frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta r} \right) \right] \quad (62)$$

Μέσω αλγεβρικών πράξεων, η τελευταία εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{r_i} = \widehat{\alpha}_r \cdot [T_{i+1}(g_i + 1) + T_{i-1}(1 - g_i) - 2T_i] \quad (63)$$

Όπου $\widehat{\alpha}_r = \alpha_r / (\Delta r)^2$ και $g_i = \Delta r / 2r_i$. Η εξίσωση (63) είναι διακριτοποιημένη στο σύνολο των σημείων $[r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_{N_c}]$, όπου N_c φυσικός αριθμός. Τα σημεία αυτά είναι σημεία εντός των τοιχωμάτων της κοιλότητας, ξεκινώντας από το σημείο 1 που βρίσκεται σε βάθος $\Delta r/2$ μέσα στο πέτρωμα και καταλήγοντας στο σημείο N_c το οποίο βρίσκεται στη μέγιστη απόσταση εντός του πετρώματος στην οποία μεταφέρεται η θερμότητα μέσω αγωγής. Η διακριτοποίηση του χώρου λύσης της εξίσωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα Α.1 : Διακριτοποίηση χώρου εντός των πετρωμάτων της κοιλότητας στον οποίο λύνεται η εξίσωση (63). Πηγή: [49]

Προκειμένου να εξεταστούν οι οριακές συνθήκες της εξίσωσης (63), η εξίσωση γράφεται παρακάτω για $i = 1$ και $i = N_C$:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{r_1} = \widehat{\alpha}_r \cdot [T_2(g_1 + 1) + T_0(1 - g_1) - 2T_1] \quad (64)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{r_{N_C}} = \widehat{\alpha}_r \cdot [T_{N_C+1}(g_{N_C} + 1) + T_{N_C-1}(1 - g_{N_C}) - 2T_{N_C}] \quad (65)$$

Όπου οι ποσότητες T_0 και T_{N_C} είναι οι θερμοκρασίες των οριακών συνθηκών, των οποίων ο υπολογισμός θα γίνει παρακάτω.

Η εξίσωση (63) μπορεί να γραφεί υπό μορφή πίνακα σε όλο το διακριτοποιημένο χώρο επίλυσής της ως εξής:

$$\frac{d\mathbf{T}}{dt} = \widehat{\alpha}_r [\mathbf{M} \cdot \mathbf{T} + \mathbf{P}] \quad (66)$$

Όπου \mathbf{T} και \mathbf{P} είναι πίνακες-στήλες με N_C στοιχεία και \mathbf{M} είναι ένας πίνακας διαστάσεων $[N_C \times N_C]$. Ο πίνακας-στήλη \mathbf{T} αντιπροσωπεύει τις τιμές της θερμοκρασίας του τοιχώματος της κοιλότητας καθ' όλο το μήκος του διακριτοποιημένου χώρου επίλυσης, για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T(r_1, t) \\ \dots \\ T(r_i, t) \\ \dots \\ T(r_{N_C}, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1(t) \\ \dots \\ T_i(t) \\ \dots \\ T_{N_C}(t) \end{bmatrix} \quad (67)$$

Ο πίνακας \mathbf{M} παριστάνει τους συντελεστές της κάθε θερμοκρασίας της εξίσωσης (63) και γράφεται ως εξής:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} -2 & g_1 + 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 - g_2 & -2 & g_2 + 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - g_3 & -2 & g_3 + 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -2 & g_{N_{c-2}} + 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 - g_{N_{c-1}} & -2 & g_{N_{c-1}} + 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 - g_{N_c} & -2 \end{pmatrix} \quad (68)$$

Όσον αφορά τον πίνακα \mathbf{P} , αντιπροσωπεύει τις οριακές συνθήκες του διακριτοποιημένου χώρου επίλυσης της εξίσωσης. Στην αριστερή πλευρά του τοιχώματος (βλ. Εικόνα Α.1 , σημείο 0) η θερμοκρασία είναι γνωστή και ίση με τη θερμοκρασία του αέρα στην κοιλότητα τη δεδομένη χρονική στιγμή. Στη δεξιά πλευρά του τοιχώματος (σημείο N_c), η θερμοκρασία του τοιχώματος είναι ίση με αυτή του περιβάλλοντος, καθώς έχουμε υποθέσει ότι εκεί σταματάει η θερμότητα να μεταδίδεται από τον αέρα στο πέτρωμα, όποια θερμοκρασία και αν έχει ο αέρας εντός της κοιλότητας, δηλαδή $T(r_{N_{c+1}}, t) = T_{amb} = 293 K$. Επομένως, ο πίνακας \mathbf{P} , διαστάσεων ($N_c \times 1$), έχει τη μορφή:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (69)$$

Όπου ο όρος θ_1 καθορίζει την οριακή συνθήκη στο όριο αέρα-τοιχώματος και ο θ_2 την οριακή συνθήκη στο τελικό βάθος του τοιχώματος. Δηλαδή οι όροι θ_1 και θ_2 αντιπροσωπεύουν τις θερμοκρασίες T_0 στην εξίσωση (64) και $T_{N_{c+1}}$ στην εξίσωση (65) αντίστοιχα, μαζί με τους συντελεστές τους.

Για την θερμοκρασία $T_{N_{c+1}}$ ισχύει $T_{N_{c+1}} = T_{amb} = 293 K$, επομένως από την εξίσωση (65) προκύπτει ότι $\theta_2 = T_{amb}(1 + g_{N_c})$.

Η οριακή συνθήκη μεταξύ του αέρα εντός της κοιλότητας και της αρχής του τοιχώματος (σημείο 0, Εικόνα Α.1) προκύπτει από την εφαρμογή της εξής σχέσης, που ισχύει για κάθε χρονική στιγμή t :

$$T_{c,t} \cdot Bi^+ = T_{0,t} \cdot \left(\frac{Bi^+}{2} + 1 \right) + T_{1,t} \cdot \left(\frac{Bi^+}{2} - 1 \right) \quad (70)$$

Όπου ο δείκτης t υποδηλώνει ότι οι θερμοκρασίες ισχύουν για την ίδια χρονική στιγμή t . Η θερμοκρασία $T_{c,t}$ είναι η θερμοκρασία του αέρα στην κοιλότητα τη χρονική στιγμή t , ενώ ο αριθμός Biot Bi^+ είναι ο λόγος της θερμικής αγωγιμότητας εντός του πετρώματος προς αυτήν στην επιφάνεια του (εξωτερικό τοίχωμα). Ο αριθμός Biot δίνεται από τη σχέση:

$$Bi^+ = \frac{U_{wall} \cdot \Delta r}{k_r} \quad (71)$$

Όπου U_{wall} ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον αέρα στα τοιχώματα της κοιλότητας, Δr ένα χαρακτηριστικό μήκος, εδώ η απόσταση από το ένα διακριτό σημείο του χώρου επίλυσης στο αμέσως επόμενο, και k_r η θερμική αγωγιμότητα του πετρώματος.

Λύνοντας την εξίσωση (70) ως προς $T_{c,t}$, έπειτα αφαιρώντας και από τα δύο μέλη το $T_{1,t}$, και τέλος λύνοντας ως προς $T_{0,t}$ προκύπτει:

$$T_{0,t} = \frac{T_{c,t}}{\left(\frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2}\right)} + T_{1,t} \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2}\right)}\right) \quad (72)$$

Αντικαθιστώντας την (72) στην (64), και ανακατατάσσοντας τους όρους κατάλληλα, προκύπτει:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{r_1} = \widehat{\alpha}_r \left[T_2(g_1 + 1) + T_c \frac{(1 - g_1)}{\left(\frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2}\right)} + T_1 \left(-2 + (1 - g_1) \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2}\right)}\right) \right) \right] \quad (73)$$

Παρατηρώντας τους συντελεστές της παραπάνω εξίσωσης βγαίνουν 2 συμπεράσματα για την οριακή συνθήκη στο σημείο 0, μεταξύ αέρα στην κοιλότητα και επιφάνειας τοιχώματος.

Αρχικά, ο όρος θ_1 του διανύσματος \mathbf{P} είναι ο δεύτερος όρος που αθροίζεται μέσα στην αγκύλη. Επομένως, το διάνυσμα \mathbf{P} είναι:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} T_c \frac{(1 - g_1)}{\left(\frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2}\right)} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ T_{amb}(1 + g_{Nc}) \end{bmatrix} \quad (74)$$

Το δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι ο συντελεστής της T_1 στην εξίσωση (73) είναι το νέο στοιχείο της πρώτης γραμμής και πρώτης στήλης του πίνακα \mathbf{M} , δηλαδή το $\mathbf{M}(1,1)$, αντικαθιστώντας το -2.

Πλέον έχουμε ορίσει τους πίνακες της εξίσωσης μετάδοσης θερμότητας, η οποία επιλύθηκε αριθμητικά, ενσωματωμένη στο μοντέλο, σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Ως αρχική συνθήκη στο πρώτο χρονικό βήμα επίλυσης εισήχθηκε ότι όλες οι θερμοκρασίες του πίνακα \mathbf{T} είναι ίσες με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} . Το μόνο πρόβλημα είναι ότι η λύση της εξίσωσης (66) είναι ένα θερμοκρασιακό προφίλ που αρχίζει από τη θερμοκρασία T_1 , ενώ η εξίσωση ενέργειας (23) απαιτεί για την εύρεση του ρυθμού απωλειών θερμότητας, \dot{Q} τη θερμοκρασία της επιφάνειας του τοιχώματος, T_w .

Η θερμοκρασία T_w υπολογίζεται ως ο αριθμητικός μέσος των θερμοκρασιών T_0 και T_1 (βλέπε Εικόνα Α.1), ως εξής:

$$T_w = \frac{T_1 + T_0}{2} \quad (75)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (72) στην εξίσωση (75) προκύπτει:

$$T_w = \frac{T_c}{2 \left(\frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2} \right)} + T_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \left(\frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2} \right)} \right) \quad (76)$$

Βιβλιογραφία

- [1] L. Nielsen and R. Leithner, "Dynamic Simulation of an Innovative Compressed Air Energy Storage Plant- Detailed Modelling of the Storage Cavern," *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, vol. IV, no. 8, 2009.
- [2] P. Weisz, "Phys. Today," vol. 47, no. 7, 2004.
- [3] I. Hadjipaschalis et al., "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 1513–1522, 2009.
- [4] J. Skea and S. Nishioka, "Policies and practices for a low-carbon society," in *Modelling long-term scenarios for low carbon societies*, Taylor & Francis, 2008, pp. 5-16.
- [5] Ι. Τάσσιου, *Ο ρόλος των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Α.Π.Ε. (Διπλωματική Εργασία)*, Αθήνα: Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., 2005.
- [6] R. Gupta et al., "Application of energy storage devices in power systems," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 289-297, 2011.
- [7] A. Oberhofer, "Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration," *Global Energy Network Institute*, July 2012.
- [8] X. Luo et al., "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied Energy*, pp. 511-536, 2015.
- [9] [Online]. Available: <http://energystoragesense.com/superconducting-magnetic-energy-storage-smes/>.
- [10] [Online]. Available: <http://www.electrologos.gr/news/399>.
- [11] [Online]. Available: <http://energystoragesense.com/supercapacitors/>.
- [12] [Online]. Available: <http://www.olatapsaxno.gr/going-out/car-economy/168-mpataries-aftokinitou>.
- [13] Δ. Παπαντώνης, *Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*, Αθήνα: Συμείων, 2008.
- [14] N. Hartmann et al., "Simulation and analysis of different adiabatic Compressed Air Energy Storage plant configurations," *Applied Energy*, pp. 541-548, 2012.
- [15] [Online]. Available: <http://www.clean-energy-water-tech.com/2012/12/which-is-best-storage-technology-for.html>.
- [16] B. J. Davidson et al., "Large-scale electrical energy storage," *Physycal Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education Reviews*, pp. 345-385, 1980.
- [17] H. Safaei et al., "Compressed air energy storage (CAES) with compressors distributed at heat loads," *Applied Energy*, pp. 165-179, 2013.
- [18] D. Robb, "Could CAES answer wind reliability concerns?," *Power*, 2010.
- [19] S. Succar and Williams, R., *Compressed air energy storage, theory, resources, and applications for wind power*, Princeton, NJ: Princeton Environmental Institute, 2008.
- [20] X. Luo and J. Wang, *Overview of Current Development on Compressed Air Energy Storage*, Coventry: University of Warwick, School of Engineering, 2013.
- [21] F. Pickard et al., "Can large-scale advanced-adiabatic compressed air energy storage be justified economically in an age of sustainable energy?," *JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY*, p. 2, 1 2009.
- [22] S. Samir, *Large energy storage systems handbook*, J. G. Levine, Ed., CRC Press, 2011, pp. 112-152.
- [23] *Compressed air energy storage state-of-science*, Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 2009.
- [24] K. Badyda and J. Milewski, "Thermodynamic analysis of compressed air energy storage working conditions," *Archium Energetyki*, vol. XLII, no. 1, pp. 53-68, 2012.
- [25] K. Allen, "CAES: the underground portion," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-104, pp. 809-812, 1985.
- [26] B. Mehta, "CAES geology," *EPRI Journal*, pp. 38-41, 1992.

- [27] Ν. Τζουγανάτος, *Σύγκριση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα και υδρογόνο*, Αθήνα: Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010.
- [28] Κ. Ερασμία, *Αξιολόγηση ένταξης Συστήματος Αποθήκευσης Συμπιεσμένου Αέρα (CAES) σε Μη Διασυνδεδεμένα Νησιωτικά Δίκτυα (Μεταπτυχιακή Εργασία)*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας", 2014.
- [29] EPRI-DOE, *Handbook of energy storage for transmission and distribution applications*, Palo Alto, CA, Washington DC: EPRI, Department of Energy (DOE), 2003.
- [30] J. McDowall, "High power batteries for utilities - the world's most powerful battery and other developments," in *The Proceedings of IEEE Power engineering society general meeting*, 2004.
- [31] M. Budt et al., "Modelling a Low-temperature Compressed Air Energy Storage with Modelica," in *Proceedings of the 9th International Modelica Conference*, Munich, Germany, 2012.
- [32] [Online]. Available: http://www.electronicproducts.com/Power_Products/Power_Management/Forget_batteries_5_techologies_to_watch_for_large_scale_energy_storage_applications.aspx.
- [33] S. Linden, "Review of CAES systems development and current innovation that could bring commercialization to fruition," in *The Proceedings of Electrical Energy Storage Applications & Technology Conference*, San Francisco, 2007.
- [34] [Online]. Available: <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>.
- [35] [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1099-4300/16/6/3103/htm>.
- [36] [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004644>.
- [37] S. Garvey and A. Pimm, "Integrated, Market-fit and Affordable Grid-scale Energy Storage (IMAGES) project meeting scales," Sept. 2013.
- [38] H. Chen et al., "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2009.
- [39] B. Castellani et al., "Experimental investigation on the effect of phase change materials on compressed air expansion in CAES plants," in *15th CIRIAF National Congress-Environmental Footprint and Sustainable Development*, Perugia, April 2015.
- [40] "How the Iowa Stored Energy Park Will Work," [Online]. Available: <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/iowa-stored-energy-park1.htm>.
- [41] V. de Biasi, "Fundamental analyses to optimize adiabatic CAES plant efficiencies," *Gas Turbine World*, vol. 39, no. 5, September-October 2009.
- [42] C. Bullough et al., "Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Integration of Wind Energy," in *Proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC*, London, UK, 2004.
- [43] E. Barbour, "Energy Storage Sense," [Online]. Available: <http://energystoragesense.com/fuelless-caes/>. [Accessed 29 5 2017].
- [44] P. Del Turco et al., *Turbomachinery Solutions for Advanced Adiabatic Compressed Energy Storage*, Firenze, Italy: GE Confidential and Proprietary Information.
- [45] A. Gil et al., "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 14, pp. 31-55, 2010.
- [46] S. Zunft, "Adiabatic CAES: The ADELE-ING project," in *SCCER Heat & Electricity Storage Symposium*, Villigen, Switzerland, May 5, 2015.
- [47] K. Porter, "Watt-Logic," 27 June 2016. [Online]. Available: <http://watt-logic.com/2016/06/27/caes/3/>. [Accessed 26 5 2017].
- [48] RWE Power AG, *ADELE - Adiabatic compressed air energy storage for electricity supply*, January 2010.
- [49] F. S. Samaniego, *Modeling of an Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) Unit and an Optimal Model-based Operation Strategy for its Integration into Power Markets (Master Thesis)*, Zurich: Swiss Federal Institute (ETH) Zurich, 2010.
- [50] E. Barbour et al., "Adiabatic Compressed Air Energy Storage with packed bed thermal energy storage," *Applied Energy*, no. 155, pp. 804-815, 2015.

- [51] A. Sciacovelli et al., “Dynamic simulation of Adiabatic Compressed Air Energy Storage (A-CAES) plant with integrated thermal storage - Link between components performance and plant performance,” *Applied Energy*, no. 185, pp. 16-28, 2017.
- [52] S. Freund et al., “Commercial Concepts for Adiabatic Compressed Air Energy Storage,” in *7th International Renewable Energy Storage Conference*, 2012.
- [53] L. Szablowski et al., *Energy and exergy analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage system*, Warsaw, Poland: Instiute of Heat Engineering, Warsaw University of Technology, 2016.
- [54] E. Helsingen, *Adiabatic compressed air energy storage (Master Thesis)*, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU), June 2015.
- [55] D. Wolf and M. Budt, “LTA-CAES - A low-temperature approach to Adiabatic Compressed Air Energy Storage,” *Applied Energy*, no. 125, pp. 158-164, 2014.
- [56] X. Luo et al., “Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale Adiabatic Compressed Air Energy Storage systems with low-temperature thermal storage,” *Applied Energy*, no. 162, pp. 589-600, 2016.
- [57] L. Eppelbaum et al., “Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids,” in *Applied Geothermics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, p. 101.
- [58] F. Aerstin and G. Street, “Chapter 8 - Heat Transfer,” in *Applied Chemical Process Design*, Midland, Michigan (US), Springer US, 1978, pp. 121-127.