# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ, ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**


---

## Διπλωματική Εργασία

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών


Καραγκούνη Ιωάννη-Μάριου του Κωνσταντίνου

Αριθμός Μητρώου: 1046816


Θέμα

# «Διαστασιολόγηση μονάδας εγγυημένης ισχύος από φωτοβολταϊκά με αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα»

Επιβλέπων

Παναγής Βοβός

**Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:**

**1046816/2022**

Πάτρα, 13/09/2022

# ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα

**«Διαστασιολόγηση μονάδας εγγυημένης ισχύος από φωτοβολταϊκά με αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα»**

Του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Καραγκούνη Ιωάννη-Μάριου του Κωνσταντίνου

Αριθμός Μητρώου: 1046816

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

13/09/2022

| | |
|---|---|
| Ο Επιβλέπων | Ο Διευθυντής του Τομέα |
| Παναγής Βοβός | Επαμεινώνδας Μητρονίκας |
| Επίκουρος καθηγητής | Αναπληρωτής καθηγητής |

**Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας: 1046816/2022**

**Θέμα: «Διαστασιολόγηση μονάδας εγγυημένης ισχύος από φωτοβολταϊκά με αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα»**

| | |
|---|---|
| Φοιτητής: | Επιβλέπων: |
| Καραγκούνης Ιωάννης-Μάριος | Παναγής Βοβός |

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται κατά πόσο είναι εφικτή και οικονομική η αυτονομία ενός συστήματος φωτοβολταϊκών που έχει ως αποθηκευτική μονάδα ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage ή CAES). Δεδομένη θεωρείται η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών και η εγγυημένη ισχύς που πρέπει να εξασφαλίζει το σύστημα.

Στο πλαίσιο της εργασίας, εξετάζονται τρία διαφορετικά μοντέλα υλοποίησης του αυτόνομου συστήματος, ως προς την τεχνολογία αποθήκευσης που χρησιμοποιείται: α) αποθήκευση με χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου, β) αποθήκευση με χρήση μονάδας CAES, αδιαβατικού τύπου ή A-CAES και γ) αποθήκευση με μονάδα CAES αδιαβατικού τύπου και ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής ενέργειας για θέρμανση χώρων το χειμώνα (Renewable Energy System Combined Power and Heat ή RESCHP).

Στο τέλος της διπλωματικής εργασίας εξάγονται δύο σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτο συμπέρασμα είναι ότι την καλύτερη ενεργειακή απόδοση παρέχει το σύστημα RESCHP, με θεωρητικό βαθμό απόδοσης 97%, ακολουθούμενο από τους συσσωρευτές με βαθμό απόδοσης 80% και τέλος το A-CAES με βαθμό απόδοσης 55%. Το δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι το κόστος ανά kWh, για το σύστημα που γίνεται χρήση CAES και το μοντέλο που γίνεται χρήση συσσωρευτών, έχουν κόστος 0,046 €/kWh και 0,076 €/kWh, με δύο πολύ σημαντικές διαφορές: α) το σύστημα CAES, μπορεί με μικρή αύξηση αρχικού κόστους, να αποκτήσει αυτονομία μεγαλύτερη από αυτή που απαιτεί το σύστημα, ρίχνοντας έτσι το κόστος σε €/kWh και β) το σύστημα CAES έχει ελάχιστη διάρκεια ζωής 40 χρόνια, ενώ οι συσσωρευτές μέγιστη διάρκεια ζωής 10 χρόνια, με αποτέλεσμα σε βάθος 40 χρόνων, το μοντέλο CAES να γίνεται πολύ πιο οικονομικό.

Στην διπλωματική εργασία εξετάζεται επίσης κατά πόσο είναι εφικτή η υλοποίηση του κάθε συστήματος, λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες του μήνα όπου τα φωτοβολταϊκά παράγουν την μικρότερη ενέργεια, καθώς εκείνο το μήνα το σύστημα θα βρεθεί στη δυσχερέστερη θέση. Αφού βρεθεί ο μήνας αυτός, για μία τυπική του ημέρα, σύμφωνα με το λογισμικό PVGIS, εξετάζεται η ικανότητα των φωτοβολταϊκών να καλύψουν τις απαιτήσεις του συστήματος. Ένα επιπλέον βήμα που θα μπορούσε να εξεταστεί, είναι η χρήση ενός αλγορίθμου μηχανικής μάθησης, ώστε να ρυθμίζεται κατάλληλα η παροχή αέρα στις τουρμπίνες των συστημάτων A-CAES και RESCHP. Οι τουρμπίνες έχουν επιλεχθεί, ώστε να παράγουν περισσότερη ισχύ από αυτή που απαιτεί το σύστημα. Επιπλέον, καθώς η παραγόμενη ισχύς και η παροχή αέρα έχουν γραμμική σχέση, μειώνοντας την παροχή αέρα, ελαττώνεται η ισχύς στο επίπεδο που απαιτεί το σύστημα και παράλληλα, η δεξαμενή αδειάζει με αργότερο ρυθμό.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορούν να οδηγήσουν σε νέες μελέτες, οι οποίες θα αποδείξουν ότι η ενεργειακή αυτονομία συστημάτων ενέργειας που έχουν ως πηγή κάποια ΑΠΕ, μπορεί να εξασφαλιστεί για αποθήκευση μεγάλης κλίμακας με τη χρήση μονάδων CAES, καθώς με τον κατάλληλο σχεδιασμό, μπορούν να αποδειχτούν πιο οικονομικά και να είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με τους συσσωρευτές. Αυτό θα οδηγήσει στην ομαλή διείσδυση των ΑΠΕ στην ενεργειακή «πίτα», και κατ' επέκταση θα οδηγήσει σε λύση του ενεργειακού ζητήματος χρησιμοποιώντας πράσινες μορφές ενέργειας.

Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και γίνεται αναφορά στις ήπιες μορφές ενέργειας και στις διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης. Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξηγείται η αρχή λειτουργίας των διάφορων τύπων CAES και γίνεται αναφορά στις διάφορες δεξαμενές αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Στο τρίτο κεφάλαιο, εξηγείται η μεθοδολογία διαστασιολόγησης συσσωρευτών για αυτόνομο σύστημα σε νησί, συγκεκριμένης εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών και εγγυημένης ισχύος στο δίκτυο. Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται η μεθοδολογία διαστασιολόγησης μονάδας με χρήση A-CAES, ώστε ο αναγνώστης να εξοικειωθεί με τη συγκεκριμένη μονάδα αποθήκευσης. Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται ανάλυση της μεθοδολογίας διαστασιολόγησης για το σύστημα RESCHP, που είναι και το βασικό μοντέλο που εξετάζεται σε τούτη τη διπλωματική εργασία. Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται οικονομική σύγκριση των τριών συστημάτων αποθήκευσης που αναφέρονται στα κεφάλαια τρία έως πέντε, ώστε να καθοριστεί πιο είναι πιο οικονομικό. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα, τόσο για το τεχνικό κομμάτι της εργασίας όσο και για το προσωπικά οφέλη από την πορεία της εκπόνησής τους.

## Abstract

In this paper, the feasibility, and the affordability of an autonomous photovoltaic system, that uses a Compressed Energy Storage System or CAES, is explored. The peak power output of the photovoltaics and the guaranteed power the system must produce is granted.

In the current paper, three different models of the autonomous systems will be examined. Their difference lies in the storage system technology that will be used, which are: a) lithium-ion battery storage, b) adiabatic CAES or A-CAES system and c) Renewable Energy System Combined Heat & Power or RESCHP system.

At the end of the paper, two important conclusions arise. Firstly, with 97% theoretical efficiency the RESCHP is the most energy effective technology, followed by the lithium-ion battery storage technology, with an approximate 80% efficiency, and lastly, the A-CAES is the least energy effective system, with an approximate 55% efficiency. Secondly, the RESCHP system and the A-CAES system have a cost per kWh around 0,046 €/kWh and the lithium-ion battery system has a cost of 0,078 €/kWh, with two major differences: a) the RESCHP and A-CAES systems, can provide greater system autonomy than the one in this paper, with small extra cost and b) the RESCHP and the A-CAES systems have a lifespan of minimum 40 years, whereas the lithium-ion battery system has a lifespan of 10 years maximum, making it much more expensive.

In this paper, it is also examined, whether each system is feasible, by taking into account the weather conditions of the month, which the photovoltaics will produce the least amount of energy, since during that month, the system will be operating in the worst-case scenario. After the month with the least amount of energy production is found, for a typical day of that month, it is examined whether the photovoltaics can cover the system requirements. An extra step that could be done, is the design of a machine learning algorithm, which would help regulate the air flux in the turbines used in the systems A-CAES and RESCHP. The chosen turbines have a greater output power than the power the system requires. In addition, since the produced power and the air flux have a linear relation to each other, so by reducing the air flux, the output power can be reduced to the power levels the system requires, and at the same time the air tank is being emptied at a lower rate.

The results of this paper can be used in new studies, which will prove that the autonomy of energy systems, which use a renewable energy source, for large scale storage, can be provided by CAES units, since with the appropriate design they can be cheaper and more energy efficient than batteries. This will lead into a smooth renewable energy infiltration and by extend it will lead into the solution of the energy problem, by using green energy sources.

The first chapter is an introduction to renewable energy and various storage technologies. In the second chapter, the operating principle of the various CAES technologies is explained, and the there is also a reference to the various types of caves used to store compressed air. In the third chapter, the sizing methodology of the autonomous system on an island, that uses batteries, with given peak power for the photovoltaics and the guaranteed power the system must produce is analyzed. In the fourth chapter, the sizing methodology of the system that uses A-CAES is analyzed, in

order for the reader to get accustomed with this particular energy technology. In the fifth chapter, the sizing methodology for the RESCHP system, which is the primary subject of this paper, is analyzed. In the sixth chapter, there is a cost comparison between the systems analyzed in the chapter three to five, in order to determine which one is the cheapest. Finally, the seventh chapter is the conclusions of this paper, both about the technical part of the paper and personal benefits acquired during the time of writing.

Καραγκούνης Ιωάννης-Μάριος

© 2020 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Το σύνολο της εργασίας αποτελεί πρωτότυπο έργο, παραχθέν από τον Καραγκούνη Ιωάννη-Μάριο, φοιτητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών και δεν παραβιάζει δικαιώματα τρίτων καθ' οποιονδήποτε τρόπο. Αν η εργασία περιέχει υλικό το οποίο δεν έχει παραχθεί από την ίδια, αυτό είναι ευδιάκριτο και αναφέρεται ρητώς εντός του κειμένου της εργασίας ως προϊόν εργασίας τρίτου, σημειώνοντας με παρομοίως σαφή τρόπο τα στοιχεία ταυτοποίησης του, ενώ παράλληλα βεβαιώνει πως στην περίπτωση χρήσης αυτούσιων γραφικών αναπαραστάσεων, εικόνων, γραφημάτων κλπ, έχει λάβει τη χωρίς περιορισμούς άδεια του κατόχου των πνευματικών δικαιωμάτων για την συμπερίληψη και επακόλουθη δημοσίευση αυτού.

# ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΑ

***Κεφάλαιο 1***

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ


1.1 Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα…….....13

1.2 Κατηγορίες ήπιων μορφών ενέργειας……..…….……13
1.2.1 Οι ΑΠΕ σε παγκόσμια κλίμακα…….....17
1.2.2 Οι ΑΠΕ στην Ελλάδα……...18
1.2.3 Σύγκριση ΑΠΕ στην Ελλάδα……...…….……19
1.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΑΠΕ…….…..…19
1.3 Αποθήκευση ενέργειας…….……20
1.3.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μικρής κλίμακας……20
1.3.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας…….……21
1.4 Η ιδιάζουσα περίπτωση των νησιών…….22

1.5 Συμπέρασμα…….23


***Κεφάλαιο 2***

## ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ


2.1 Εισαγωγή …….25
2.2 Διαβατικές μονάδες CAES……..…….26
2.3 Αδιαβατικές μονάδες CAES...……...……..27
2.4 Ισόθερμες μονάδες CAES……27
2.5 Κοιλότητες για την αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα…….....28
2.5.1 Σπήλαια αλάτων…..……..28
2.5.2 Σπήλαια σκληρών πετρωμάτων……..29
2.5.3 Σπήλαια πορωδών πετρωμάτων…..……..……..29
2.6 Συμπέρασμα…….29


***Κεφάλαιο 3***

## ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ, ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ


3.1 Εισαγωγή……..31
3.2 Γεωγραφικοί παράμετροι και μετεωρολογικά δεδομένα……..31
3.3 Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος σε σύστημα συσσωρευτών….32
3.4 Υπολογισμός της χωρητικότητας του συσσωρευτή……..32
3.5 Εφαρμογή…….33
3.6 Συμπέρασμα…….37

*Κεφάλαιο 4*

## ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΟΥ CAES ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ


4.1 Εισαγωγή……39
4.2 Διάγραμμα ροής ισχύος A-CAES……39
4.3 Διαστασιολόγηση αδιαβατικής μονάδας αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα……..40
4.4 Εφαρμογή……42
4.5 Συμπέρασμα……46


*Κεφάλαιο 5*

## ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ CAES ΝΕΑΣ ΓΕΝΝΙΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ


5.1 Εισαγωγή……..47
5.2 Περιγραφή του συστήματος RESCHP……47
5.3 Μεθοδολογία διαστασιολόγησης RESCHP για την εξασφάλιση αυτονομίας σε νησί……...49
5.3.1 Κλιματικά δεδομένα και παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκών……49
5.3.2 Διαστασιολόγηση της δεξαμενής, των συμπιεστών και της τουρμπίνας……..50
5.3.3 Υπολογισμός ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης……51
5.3.4 Θερμικά μεγέθη και τελικός βαθμός απόδοσης……52
5.4 Εφαρμογή……53
5.4.1 Δεδομένα……..53
5.4.2 Άντληση μετεωρολογικών δεδομένων και δεδομένων απόδοσης φωτοβολταϊκών στην εν λόγω περιοχή……53
5.4.3 Διαστασιολόγηση της δεξαμενής, των συμπιεστών και της τουρμπίνας……..55
5.4.4 Υπολογισμός ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης……56
5.4.5 Θερμικά μεγέθη και τελικός βαθμός απόδοσης……57
5.5 Συμπέρασμα……59


*Κεφάλαιο 6*

## ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ


6.1 Εισαγωγή……..61
6.2 Οικονομική ανάλυση συστήματος με χρήση συσσωρευτών……61
6.3 Οικονομική ανάλυση συστήματος αποθήκευσης A-CAES……..63
6.4 Οικονομική ανάλυση συστήματος αποθήκευσης RESCHP…….....65
6.5 Συμπέρασμα…….....66

*Κεφάλαιο 7*

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

7.1 Εισαγωγή……..69

7.2 Αποτελέσματα και συμπεράσματα……..70

7.3 Βελτιώσεις, επεκτάσεις και μελλοντικές χρήσεις……72

7.4 Προσωπικά συμπεράσματα……...73

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**……...75

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**……...77

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**……79

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**……...81

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα

Καθώς το βιοτικό επίπεδο του παγκόσμιου πληθυσμού ανεβαίνει, αυξάνονται και οι ενεργειακές ανάγκες. Μέχρι και σήμερα, η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών επιτυγχάνεται με την καύση ορυκτών καυσίμων. Η καύση των ορυκτών καυσίμων, έχει σαν προϊόν το $CO_2$, ένα αέριο το οποίο έχει την ικανότητα να αιχμαλωτίζει την υπέρυθρη ακτινοβολία, που φτάνει από τον Ήλιο, στην ατμόσφαιρα του πλανήτης. Η υπέρυθρη ακτινοβολία οδηγεί στην αύξηση της της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, και έτσι η μέση θερμοκρασία της Γης, με τους τωρινούς ρυθμούς αυξάνεται κατά 0,18 ˚C [1]. ετησίως. Η επιστημονική κοινότητα συγκλίνει, ότι αν αυτή η ραγδαία αύξηση θερμοκρασίας συνεχιστεί, τότε οι συνέπειες θα είναι καταστροφικές για τη ζωή στον πλανήτη. Συγκεκριμένα, οι πάγοι στους πόλους θα λιώσουν, με αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης της θάλασσας και την εξαφάνιση πολλών οικοσυστημάτων. Παράλληλα, θα εμφανίζονται ακραία καιρικά φαινόμενα με μεγάλη συχνότητα, σε περιοχές του πλανήτη που μέχρι τώρα δεν παρατηρούνταν. Τέλος, θα επηρεαστούν και οι καλλιέργειες, με αποτέλεσμα να επιδεινωθεί η φτώχεια και να υπάρχει λιμός. Το μέλλον δείχνει δυσοίωνο, ωστόσο υπάρχουν ελπίδες για την ανθρωπότητα να αποτρέψει αυτό το μέλλον. Αρκεί να μειωθεί η εκπομπή $CO_2$, ώστε να εξασθενίσει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, με ταυτόχρονη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πληθυσμού. Η λύση που προτείνεται είναι η αντικατάσταση της παραγωγής ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας, μορφές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον.

## 1.2 Κατηγορίες ήπιων μορφών ενέργειας

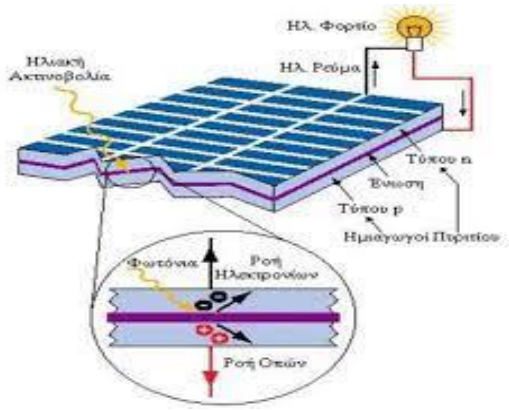
Ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ονομάζεται κάθε πηγή η οποία χαρακτηρίζεται από τα εξής:

- Προέρχεται από κάποια φυσική διεργασία (πχ άνεμος)
- Δεν χρειάζεται εξόρυξη ορυκτού καυσίμου για την παραγωγή ισχύος
- Κατά την διαδικασία παραγωγής ενέργειας, δεν απελευθερώνεται $CO_2$ στην ατμόσφαιρα
- Στο τέλος δεν παράγονται τοξικά απόβλητα (όπως με την πυρηνική ενέργεια)

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές φυσικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στον πλανήτη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας. Η ακτινοβολία του Ήλιου που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη, το αιολικό δυναμικό, κατά την μετακίνηση αέριων μαζών λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, η ροή του νερού από σημεία με υψηλότερη δυναμική ενέργεια σε σημεία με χαμηλότερη κτλ. Με την ανάπτυξη κατάλληλων τεχνολογιών όπως τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και ανεμογεννήτριες, η εκμετάλλευση των φυσικών διεργασιών έχει γίνει εφικτή και με μικρό κόστος.

- Ηλιακή ενέργεια: Ο Ήλιος είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας του ηλιακού συστήματος. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε κάθε σημείο στον πλανήτη ετησίως, εξαρτάται από τις γεωμετρικές συντεταγμένες του σημείου, καθώς και από το κλίμα του. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στο σημείο, γίνεται με τη χρήση των φωτοβολταϊκων πλαισίων. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, αποτελούνται από συστοιχίες ηλιακών κυττάρων, που είναι κατασκευασμένα, συνήθως, από πυρίτιο. Το πυρίτιο χρησιμοποιείται σε μία pn επαφή με πολύ στενή ζώνη απογύμνωσης με έντονα νοθευμένη n περιοχή. Επίσης, υπάρχει ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Τα φωτόνια προσπίπτουν στην n περιοχή και επειδή η περιοχή απογύμνωσης είναι πολύ στενή, τα περισσότερα απορροφώνται εκεί και στην p-περιοχή. Αυτό έχει ως συνέπεια την φωτογέννεση ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. Επίσης, υπάρχει ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο θα βοηθήσει στην ολίσθηση των οπών στην p-περιοχή και των ηλεκτρονίων στη n-περιοχή, με αποτέλεσμα να προκληθεί τάση ανοικτού κυκλώματος.

**Εικόνα 1.1:** Ηλιακό κύτταρο [2].




- Αιολική Ενέργεια: Η θερμοκρασία αλλάζει από περιοχή σε περιοχή στον πλανήτη. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας από την μία περιοχή έως την άλλη, έχει ως συνέπεια αέριες μάζες να έχουν διαφορετική θερμοκρασία στην εκάστοτε περιοχή. Επειδή οι θερμές αέριες μάζες είναι ελαφρύτερες, έχουν την τάση να κινούνται προς τα ανώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας, και τη θέση τους καταλαμβάνουν οι ψυχρότερες αέριες μάζες. Αυτή η διεργασία είναι αέναη, και είναι ευρέως γνωστή ως άνεμος. Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου γίνεται χιλιάδες χρόνια, από τους ανεμόμυλους και τα καράβια, έως και σήμερα με τις ανεμογεννήτριες. Υπάρχουν δύο ειδών ανεμογεννήτριες: κατακόρυφου άξονα και οριζόντιου άξονα στρέψης πτερυγίων. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα στρέψης. Είναι φιλικές στο περιβάλλον, δεν απαιτούν κανενός είδους καύσιμο, δεν εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου και είναι αποδοτικές. Ωστόσο, υπάρχει πρόβλημα στην τοποθέτησή τους καθώς είναι τεράστιες και απαιτούν πολύ ελεύθερο χώρο. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η τοποθέτησή τους σε ανοιχτή θάλασσα. Επίσης, είναι υπεύθυνες για τη θανάτωση πολλών πτηνών ετησίως, αν και υπάρχουν

μελέτες που αποδεικνύουν ότι βάφοντας το ένα πτερύγιο μαύρο, θα υπάρξει μείωση έως και 70% στους θανάτους πτηνών [3].

- Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας: Ο κύκλος του νερού καθορίζει ότι μεγάλες μάζες νερού εξατμίζονται, σχηματίζοντας σύννεφα, τα οποία αργότερα συμπυκνώνονται, και επιστρέφουν με τη μορφή υετού στην επιφάνεια του πλανήτη. Συχνά, ο νερό επιστρέφει σε μεγάλο υψόμετρο, είτε σε υγρή είτε σε στερεή μορφή. Με άλλα λόγια αποθηκεύεται δυναμική ενέργεια στο νερό. Στη συνέχεια, το νερό μπορεί να επιστρέψει προς το επίπεδο της θάλασσας, μετατρέποντας τη δυναμική ενέργεια σε κινητική. Αυτή την κινητική ενέργεια του νερού, εκμεταλλεύονται υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιώντας υδροστρόβιλους. Ανάλογα με την υψομετρική διαφορά και την παροχή νερού στον υδροστρόβιλο, υπάρχουν υδροστρόβιλοι που ανήκουν στις εξής κατηγορίες:
    - Στρόβιλος ελεύθερης δέσμης τύπου Pelton, για μεγάλες υψομετρικές διαφορές. H > 100 m
    - Στρόβιλος τύπου Francis για μεσαίες υψομετρικές διαφορές. H = 30 – 800 m
    - Στρόβιλος τύπου Kaplan για χαμηλότερες υψομετρικές διαφορές. H = 2 – 80 m [4].

  Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, χωρίζονται και αυτοί σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την ισχύ που παράγουν. Αυτές οι κατηγορίες είναι οι εξής:

    - Μεγάλης κλίμακας για παρεχόμενη ισχύ πάνω από 30 MW.
    - Μεσαίας κλίμακας για παρεχόμενη ισχύ 10 – 100 MW.
    - Μικρής κλίμακας για παρεχόμενη ισχύ έως και 100 kW.

  Οι μεγάλης και μεσαίας κλίμακας σταθμοί, δεν θεωρούνται ΑΠΕ, καθώς για την λειτουργία τους, απαιτείται ανέγερση φραγμάτων, τα οποία έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην πανίδα του τόπου εγκατάστασής τους. Αντιθέτως, οι μικρής κλίμακας σταθμοί θεωρούνται ΑΠΕ, καθώς δεν απαιτείται ανέγερση φράγματος [5].

- Βιομάζα: Η βιομάζα είναι καύσιμο ζωικής ή φυτικής προελεύσεως. Αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας καθώς είναι η ηλιακή ενέργεια που έχουν δεσμεύσει τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση, ενώ μέρος της δεσμεύουν και τα ζώα με την τροφή τους. Τα φυτικά απόβλητα αγροτικής ή δασικής δραστηριότητας καθώς και τα ζωικά απόβλητα, με κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επανάκτηση του ενεργειακού τους αποθέματος. Ενδεικτικά, βιομάζα αποτελούν τα ροκανίδια, τα pellets ξύλου και τα καυσόξυλα.
- Ενέργεια ωκεανών και θαλασσών: Η ενέργεια των ωκεανών χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Την ενέργεια που παράγεται κατά την άμπωτη και την παλίρροια ή αλλιώς παλιρροϊκή ενέργεια και την ενέργεια των υποθαλάσσιων ρευμάτων.

**Εικόνα 1.2:** Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενος την παλίρροια στην Αυστραλία [6].

**Εικόνα 1.3:** Υποθαλάσσιοι στρόβιλοι για την εκμετάλλευση των ρευμάτων [7].

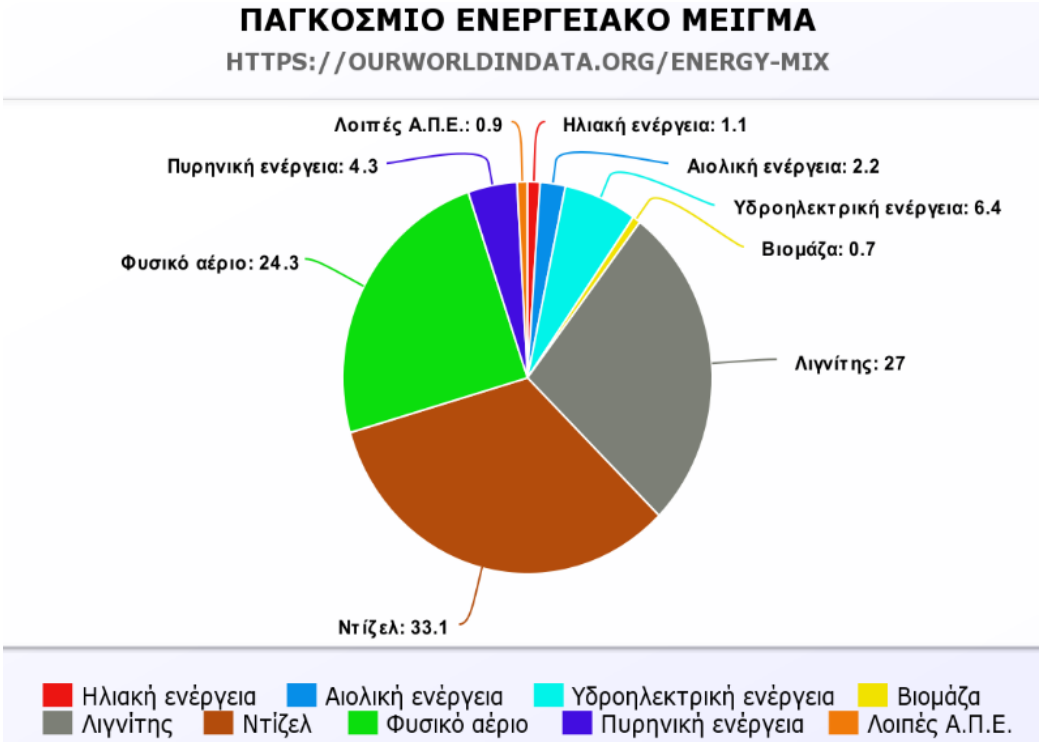
Η αξιοποίηση της ενέργειας των ωκεανών και των θαλασσών, ακόμα βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, ωστόσο αναμένεται να δώσει λύσεις στο ενεργειακό πρόβλημα πολλών περιοχών, καθώς είναι μία πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.

- Γεωθερμική ενέργεια: Η θερμοκρασία του πλανήτη στο εσωτερικό του είναι πολύ μεγαλύτερη αυτής της επιφάνειάς του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στο εσωτερικό του να υπάρχει αποθηκευμένη ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Η θερμότητα «βρίσκει» διαδρόμους σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας, συνήθως κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας, εξαρτώνται από το επίπεδο της θερμοκρασίας και χωρίζονται ως εξής:
- Υψηλής ενθαλπίας (>150˚C), για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μέσης ενθαλπίας (80 – 150˚C), για θέρμανση εσωτερικών χώρων, παραγωγή ηλεκτρισμού και για αγροτικές δραστηριότητες.

- Χαμηλής ενθαλπίας (25 - 80 ˚C) για ιχθυοκαλλιέργειες, θέρμανση και θερμοκήπια [5].
  Το μεγάλο μειονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας είναι ότι εξαρτάται από την τοποθεσία της περιοχής. Ωστόσο, στις περιοχές που είναι εφικτή η αξιοποίησή της, είναι εφικτή η ενεργειακή αυτονομία τους, καθώς η ανάπτυξη του τουρισμού, π.χ. για επίσκεψη σε θερμά λουτρά.

### 1.2.1 Οι ΑΠΕ σε παγκόσμια κλίμακα

Οι ΑΠΕ έχουν αρχίσει να διεισδύουν ραγδαία στο ενεργειακό μείγμα, στην προσπάθεια ελάττωσης εκπομπών $CO_2$ και λοιπών ρύπων. Τα τελευταία χρόνια, αναπτύσσονται συνεχώς τεχνολογίες, οι οποίες είναι αποδοτικότερες και φθηνότερες. Παράλληλα, οι κυβερνήσεις θεσμοθετούν ειδικά τέλη για τις μονάδες που εκπέμπουν $CO_2$, στην προσπάθεια να κάνουν τα ορυκτά καύσιμα λιγότερο οικονομικά συμφέροντα. Ωστόσο, η φύση των ΑΠΕ δυσχεραίνει το έργο των μηχανικών δικτύων ενέργειας, καθώς η παραγωγή ενέργειας είναι απρόβλεπτη, ανάλογα με τα καιρικά φαινόμενα. Έτσι, σε περιόδους υψηλής ζήτησης μπορεί να αποδίδουν λιγότερη ισχύ από αυτή που απαιτείται, ή σε περιόδους χαμηλής ζήτησης να αποδίδουν περισσότερη ισχύ. Αυτό οδηγεί σε προβλήματα ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα οι ΑΠΕ να μην μπορούν εξ' ολοκλήρου να εξασφαλίσουν την αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, για την ικανοποιητική κάλυψη του φορτίου, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ορυκτά καύσιμα. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται το ενεργειακό μείγμα του πλανήτη.




**Εικόνα 1.4**: Ενεργειακό μείγμα πλανήτη [8]

Όπως προκύπτει από την εικόνα, τα ορυκτά καύσιμα συμβάλλουν στο 84,4% της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Η συμβολή των υδροηλεκτρικών και των πυρηνικών μονάδων είναι υπολογίσιμη με 6,4% και 4,3% αντίστοιχα, ενώ οι ΑΠΕ συνεισφέρουν κατά 11,3% συνολικά (συνυπολογίζονται οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας). Οι Α.Π.Ε δείχνουν να έχουν ένα μικρό ποσοστό, ωστόσο, αυτό οφείλεται σε κοινωνικούς, πολιτικούς και οικονομικούς παράγοντες. Ενδεικτικά, αναπτυσσόμενες οικονομίες, όπως της Κίνας και της Ινδίας, αρνούνται να στραφούν στις Α.Π.Ε για την κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους του φορτίου, με το πρόσχημα ότι αυτή τη στιγμή αναπτύσσονται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως έκαναν τα δυτικά κράτη κατά τη βιομηχανική επανάσταση. Ωστόσο, η στροφή προς τις ΑΠΕ θα είναι μονόδρομος ακόμα και αυτές τις οικονομίες στο άμεσο μέλλον, λόγω του ραγδαία επιδεινούμενου προβλήματος του θερμοκηπίου.

### 1.2.2 Οι ΑΠΕ στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) οφείλει να στραφεί στις ΑΠΕ Ήδη, έχει κάνει πολλά βήματα προς την κατεύθυνση αυτή, εκμεταλλευόμενη, το αιολικό και το ηλιακό δυναμικό της. Τα τελευταία χρόνια, υπήρξαν πολιτικές παρεμβάσεις, όπως επιδοτήσεις για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στις οικίες, φορολόγηση των σταθμών παραγωγής ενέργειας, ανάλογα με το ποσό $CO_2$ που εκπέμπουν, ενώ παράλληλα περιορίστηκε η εξόρυξη λιγνίτη. Όλα αυτά συνέβαλλαν στην σταδιακή ένταξη των ΑΠΕ στην ενεργειακή «πίτα», σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό με βάση τις οδηγίες της Ε.Ε. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας για το 2020.

**Εικόνα 1.5:** Το ενεργειακό μείγμα παραγωγής της Ελλάδας το 2020 (Ορυκτά καύσιμα απροσδιόριστης προσέλευσης Α.Π.) [9]

Σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία, η χώρα καλύπτει το 38,14% της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ και το υπόλοιπο 61,86% από ορυκτά καύσιμα. Την πρωτιά στις ΑΠΕ καταγράφει η αιολική ενέργεια με ποσοστό 20,4%, ενώ ακολουθεί η ηλιακή ενέργεια με ποσοστό 9,7%.

### 1.2.3 Σύγκριση των ΑΠΕ στην Ελλάδα

Οι διάφορες τεχνολογίες ΑΠΕ έχουν τα αρνητικά και τα θετικά τους. Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας με τα στοιχεία για τις ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην Ελλάδα.

| **ΑΠΕ** | **Απόδοση** | **Διάρκεια ζωής** |
|---|---|---|
| Ηλιακή ενέργεια | 15 – 22% | 25 – 40 χρόνια |
| Αιολική ενέργεια | 30 – 45% | 20 χρόνια |
| Υδροηλεκτρική ενέργεια | 90% | 100 χρόνια |
| Βιομάζα | 45% | 20 – 30 χρόνια |

**Πίνακας 1.1:** Στοιχεία απόδοσης, διάρκειας ζωής και κόστους για τις διάφορες ΑΠΕ. [10-13].

Στην Ελλάδα, την μεγαλύτερη διείσδυση έχουν οι ανεμογεννήτριες, καθώς η ενεργειακή απόδοσή τους, σε συνδυασμό με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της Ελλάδας, επιτρέπουν την εγκατάσταση πολλών αιολικών πάρκων. Ακολουθούν τα φωτοβολταϊκα, καθώς η Ελλάδα είναι μια χώρα με πολύ μεγάλο ηλιακό δυναμικό λόγω της γεωγραφικής θέσης της. Έπειτα, ακολουθούν οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής, ωστόσο έχουν το μειονέκτημα, ότι είναι περιορισμένα τα σημεία που μπορούν να ανεγερθούν. Τέλος, η βιομάζα δεν έχει διεισδύσει αρκετά, λόγω του κόστους της σαν καύσιμο, καθώς απαιτείται ειδική επεξεργασία προτού χρησιμοποιηθεί.

### 1.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΑΠΕ

Η διείσδυση των ΑΠΕ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, δείχνει αναγκαία, ώστε να μειωθούν οι εκπομπές $CO_2$ και ταυτόχρονα να καλυφθεί η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνολικά τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι:

- Δεν απαιτείται εξόρυξη καυσίμου.
- Δεν υπάρχουν εκπομπές ρύπων και $CO_2$.
- Είναι αστείρευτες, καθώς προέρχονται από φυσικές διεργασίες.
- Μπορούν να εξασφαλίσουν την ενεργειακή αυτονομία μιας απομακρυσμένης περιοχής.
- Η κατασκευή και η συντήρηση του εξοπλισμού δεν είναι περίπλοκη.

Ωστόσο, διαβάζοντας τα παραπάνω, θα αναρωτηθεί κανείς γιατί οι ΑΠΕ δεν έχουν ήδη διεισδύσει περισσότερο στο ενεργειακό μείγμα παγκοσμίως. Αυτό συμβαίνει επειδή έχουν αρκετά μειονεκτήματα που ακόμη δεν έχουν ξεπεραστεί από την πρόοδο των τεχνολογιών ΑΠΕ Μερικά από αυτά είναι:

- Παρουσιάζουν μεταβλητότητα ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, το κλίμα, την εποχή του έτους ως προς την παραγόμενη ισχύ.

- Αυτή η μεταβλητότητα επηρεάζει την ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία συνεργάζονται με ΑΠΕ
- Έχουν μικρή απόδοση, επομένως για την κάλυψη μεγάλου φορτίου, απαιτείται μεγάλος χώρος για την εγκατάστασή τους (κυρίως για την ηλιακή και την αιολική ενέργεια).

Το τελευταίο είναι το πιο δύσκολο πρόβλημα ως προς την επίλυσή του. Τα πρώτα δύο, όμως, μπορούν να εξομαλυνθούν με τη χρήση κατάλληλων τεχνολογιών που θα βοηθάνε τα συστήματα ΑΠΕ να παρέχουν εγγυημένη ισχύ και να συμβάλλουν στην μεταβατική ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνολογίες αυτές είναι οι αποθήκες ενέργειας.

## 1.3 Αποθήκευση ενέργειας

Οι αποθήκες ενέργειες είναι τεχνολογίες που αποθηκεύουν την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή χημικής ή μηχανικής ενέργειας και χωρίζονται σε μικρής και μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας είναι απαραίτητες, ώστε εκτός από την εγγυημένη κάλυψη του φορτίου, υπό οποιεσδήποτε συνθήκες, το σύστημα να παρουσιάζει και μεταβατική ευστάθεια όταν μεταβάλλεται η παρεχόμενη ισχύς ή το φορτίο.

### 1.3.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μικρής κλίμακας

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία για αποθήκευση μικρής κλίμακας είναι οι συσσωρευτές, μηχανισμοί οι οποίοι στις περιόδους που οι ΑΠΕ αποδίδουν περισσότερη ενέργεια από αυτή που απαιτεί το δίκτυο, αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας, προς χρήση σε άλλη χρονική περίοδο, όπου οι ΑΠΕ δεν θα είναι σε θέση να καλύψουν τη ζήτηση. Οι συσσωρευτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, συσσωρευτές που αποθηκεύουν χημική ενέργεια και συσσωρευτές που αποθηκεύουν μηχανική. Οι συσσωρευτές που αποθηκεύουν χημική ενέργεια, κατά την αποφόρτιση ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου μετάλλου-αέρα, λαμβάνει χώρα μια αντίδραση αναγωγής στην κάθοδο του περιβάλλοντος αέρα ενώ η μεταλλική άνοδος οξειδώνεται. Οι πιο συνηθισμένες τεχνολογίες συσσωρευτών χημικής ενέργειας είναι:

- Συσσωρευτές ιόντων λιθίου, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την αντίδραση:
  $LiC_6 + CoO_2 \rightleftarrows C_6 + LiCoO_2$ [14].
- Συσσωρευτές μόλυβδου, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την αντίδραση:
  $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftarrows 2PbSO_4 + 2H_2O$ [15].
- Κυψέλες καυσίμου, όπως υδρογόνου, (fuel cells)
- Συσσωρευτές σιδήρου-αέρα, που ήρθαν τελευταία στο προσκήνιο, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την αντίδραση:
  $3Fe + 2O_2 \rightleftharpoons Fe_3O_4$[16].

Οι πιο συνηθισμένοι συσσωρευτές μηχανικής ενέργειας είναι οι σφόνδυλοι. Οι σφόνδυλοι θυμίζουν ηλεκτρικές μηχανές, με τη διαφορά ότι ο δρομέας τους βρίσκεται σε κενό αέρος, ώστε να μειώνονται οι απώλειες λόγω τριβής. Κατά την φόρτιση, λειτουργούν ως σαν ηλεκτρικοί κινητήρες, καθώς το μαγνητικό πεδίο του στάτη ασκεί δύναμη εξ' επαγωγής στο δρομέα και τον στρέφει. Κατά την αποφόρτιση, ο σφόνδυλος λειτουργεί σαν γεννήτρια με αντίστοιχο τρόπο.

Ένα πρόβλημα που προκύπτει με την αποθήκευση ενέργειας σε συσσωρευτές, είναι το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης, οι συσσωρευτές υποβάλλονται σε μη αντιστρεπτές μεταβολές. Το γεγονός αυτό συμβάλλει στην μείωση της διάρκειας ζωής του κάθε συσσωρευτή. Στον πίνακα 1 ακολουθούν ενδεικτικά κάποια στοιχεία για τους συσσωρευτές.

| Συσσωρευτής | Απόδοση | Διάρκεια ζωής | Κόστος |
|---|---|---|---|
| Lithium ion | 75-95% | 5-16 χρόνια | 300-600 $ / kWh |
| Lead acid | 75-90% | 5-16 χρόνια | 200-400$ / kWh |
| Fe-Air | 60% | ~ 30 χρόνια | - |
| Σφόνδυλοι | 80-90% | ~ 20 χρόνια | 150-250 $/kWh |

**Πίνακας 1.2:** Τυπικά στοιχεία για μερικούς συνηθισμένους συσσωρευτές [17 – 20]

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείτε ότι, παρά τη μεγάλη απόδοση, αυτές οι τεχνολογίες έχουν μικρή διάρκεια ζωής και μεγάλο κόστος ανά kWh, δηλαδή δεν θα ήταν ιδανικές επιλογές για αποθήκευση ενέργειας σε βιομηχανικές εφαρμογές.

### 1.3.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας

Για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας, επιστρατεύονται άλλες τεχνολογίες, καθώς οι συσσωρευτές μπορούν να παρέχουν ενέργεια για λίγες ώρες, ενώ οι τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας έως και μερικές ημέρες. Αυτό τις καθιστά αναγκαίες σε βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς μπορούν να εξασφαλίσουν την ενεργειακή αυτονομία μιας ολόκληρης βιομηχανίας. Μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης θεωρούνται οι παρακάτω τεχνολογίες:

- Συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage) ή CAES Κατά τις περιόδους περίσσειας ενέργειας, τροφοδοτούν ηλεκτρικούς συμπιεστές, οι οποίοι συμπιέζουν τον αέρα και επαναχρησιμοποιείται κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης. Σημειώνεται ότι οι ηλεκτρικοί συμπιεστές έχουν πολύ μικρή ηλεκτρική απόδοση, επομένως υπάρχουν απώλειες, υπό τη μορφή θερμότητας. Όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση, ο συμπιεσμένος αέρας προθερμαίνεται και οδηγείται στις τουρμπίνες αποσυμπίεσης, όπου η ενέργεια του συμπιεσμένου αέρα μετατρέπεται σε μηχανικό έργο. Υπάρχουν τριών ειδών μονάδες αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, διαβατικού, αδιαβατικού και ισόθερμου τύπου. Στα διαβατικά CAES, η θερμότητα κατά τη συμπίεση του αέρα χάνεται εξολοκλήρου, ενώ στο στάδιο της αποσυμπίεσης χρησιμοποιείται ορυκτό καύσιμο για τη προθέρμανση του αέρα. Στα αδιαβατικά CAES ένα ποσοστό της θερμότητας που χάθηκε κατά τη συμπίεση, ανακτάται με τη χρήση διαθερμικού λαδιού. Τέλος, στα ισόθερμα CAES, ο αέρας

υφίσταται ισόθερμη συμπίεση, γεγονός που κάνει τα ισόθερμα CAES, την πιο αποδοτική τεχνολογία.

- Αντλίες νερού που χρησιμοποιούνται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής. Οι σταθμοί αυτοί έχουν δύο δεξαμενές αποθήκευσης νερού σε υψομετρική διαφορά μεταξύ τους. Κατά τις περιόδους περίσσειας, ηλεκτρικές αντλίες οδηγούν νερό από τη χαμηλότερη υψομετρικά δεξαμενή στην υψηλότερη, ενώ στις περιόδους υψηλής ζήτησης, το νερό πέφτει από την υψηλότερη στην χαμηλότερη δεξαμενή μέσω υδροστροβίλων που είναι συνδεδεμένοι με ηλεκτρογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στον παρακάτω πίνακα, ακολουθούν μερικά στοιχεία για τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

| Τεχνολογία | Απόδοση | Διάρκεια ζωής | Κόστος |
|---|---|---|---|
| Διαβατικό CAES | 55 % | >30 χρόνια | 50-150 €/kWh |
| Αδιαβατικό CAES | 70% | >30 χρόνια | 120-200 €/kWh |
| Ισόθερμο CAES | 70-80% | >30 χρόνια | - |
| Αντλίες νερού | 70-85% | 30-60 χρόνια | 106 – 200 $/kWh |

**Πίνακας 1.3:** Τυπικά στοιχεία για ορισμένες τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης ενέργειας [21-25].

Παρά τη μικρή τους απόδοση, οι μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης τεχνολογίες έχουν μικρότερο κόστος ανά kWh και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για βιομηχανικές εφαρμογές. Προφανώς, όμως, έχουμε μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, ως απόλυτοι αριθμοί, λόγω του μεγάλου τους μεγέθους. Για αυτό το λόγο η εγκατάστασή τους σε συστήματα ΑΠΕ μικρού μεγέθους δεν είναι πρακτικά υλοποιήσιμη (π.χ. σε οικίες).

## 1.4 Η ιδιάζουσα περίπτωση των νησιών

Την πλειονότητα των ενεργειακών αναγκών της Ελλάδας, ακόμα την καλύπτουν το φυσικό αέριο, ο λιγνίτης, και επιπλέον στα νησιά το μαζούτ, καθώς για την ώρα η τεχνολογία είναι φθηνότερη και ήδη διαθέσιμη. Στα νησιά, λοιπόν, υπάρχει το ζήτημα ότι είναι ακριβή η διασύνδεση τους με το σύστημα ηλεκτροδότησης της ηπειρωτικής χώρας, καθώς αυτή θα πρέπει να γίνει με υποβρύχια καλώδια, μεγάλου μήκους. Αν και η τεχνολογία της υποβρύχιας καλωδίωσης έχει εξελιχθεί με την πάροδο των χρόνων, παραμένει κοστοβόρα. Η λύση της ανέγερσης λιγνιτικών, πετρελαϊκών ή μονάδων φυσικού αέριου, εμφανίζει επίσης προβλήματα οικονομικής φύσεως, καθώς εκτός απ' το κόστος κατασκευής, είναι κοστοβόρα και η μεταφορά των καυσίμων. Για αυτό τον τελευταίο λόγο, οι περισσότερες λιγνιτικές μονάδες κατασκευάζονται κοντά στα λιγνιτικά πεδία της ηπειρωτικής Ελλάδας, που είναι υπό εκμετάλλευση. Επιπλέον, έχει θεσμοθετηθεί αύξηση στα τέλη για εκπομπές $CO_2$ που παράγουν όλες οι μονάδες, ώστε να τους «επιτραπεί» η μόλυνση του περιβάλλοντος. Επομένως, τόσο η σύνδεση των νησιών με το δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας, όσο και η ενεργειακή ανεξαρτησία τους είναι δύσκολο εγχείρημα. Μια εφικτή λύση, είναι η υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ Τα περισσότερα νησιά έχουν υψηλό αιολικό δυναμικό, άρα μπορούν να αξιοποιηθούν οι ανεμογεννήτριες για την κάλυψη της ζήτησης. Επίσης, τα περισσότερα νησιά μπορούν

να στηριχθούν και στην ηλιακή ενέργεια, καθώς το κλίμα τους είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό για τη χρήση φωτοβολταϊκών.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί, ότι στα νησιά το φορτίο παρουσιάζει μεγάλες αυξομειώσεις από εποχή σε εποχή. Συγκεκριμένα, το καλοκαίρι, λόγω του τουρισμού και της ανάγκης για κλιματισμό, το φορτίο είναι πολύ μεγάλο, σε αντίθεση με το χειμώνα. Το γεγονός ότι το φορτίο παρουσιάζει αυτές τις αυξομειώσεις, σε συνδυασμό με την πιθανότητα οι ΑΠΕ να μην είναι σε θέση να το καλύψουν οποιαδήποτε χρονική στιγμή, οδηγεί στην ανάγκη για σχεδιασμό συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα.

## 1.5 Συμπέρασμα

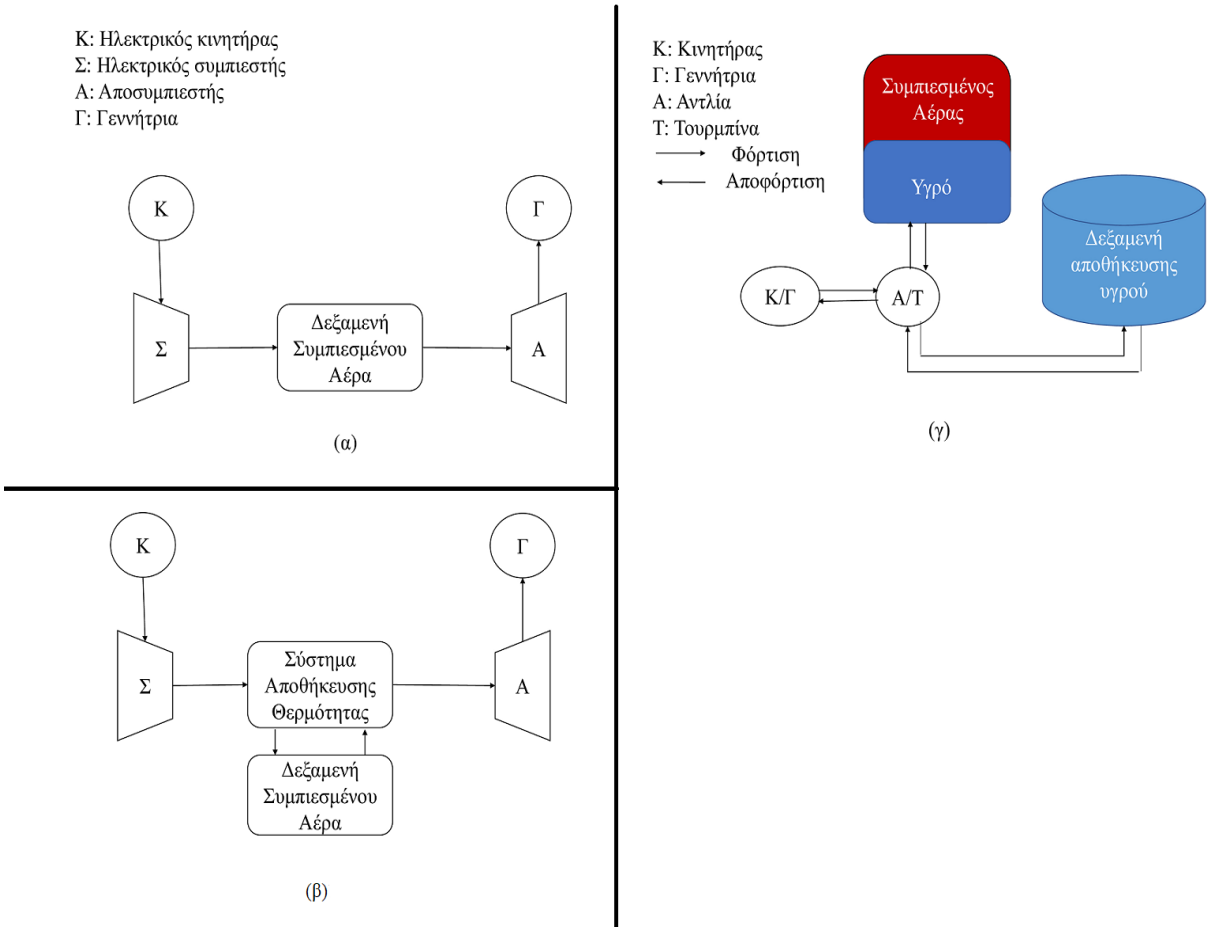
Τα ελληνικά νησιά έχουν σημαντικό ενεργειακό πρόβλημα, καθώς η σύνδεσή τους με το δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδα έχει δυσκολίες, ενώ η λύση της ανέγερσης σταθμών παραγωγής ενέργειας, που θα κάνουν χρήση ορυκτών καυσίμων είναι ασύμφορη οικονομικά. Σε συνδυασμό με τη στροφή της παγκόσμιας κοινότητας προς την εκμετάλλευση των ΑΠΕ, η λύση των ΑΠΕ είναι μονόδρομος για την ενεργειακή αυτονομία τους. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πρέπει να λυθεί το πρόβλημα της μεταβλητότητας των ΑΠΕ. Αυτό θα γίνει με τη χρήση κατάλληλης τεχνολογίας αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα εξερευνηθεί η χρήση συσσωρευτών και δύο διαφορετικών μοντέλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα ή CAES.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΤΗ ΜΟΡΦΗ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ

## 2.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα, είναι μια τεχνολογία που υπάρχει εδώ και 40 χρόνια. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage ή CAES) αποθηκεύουν ενέργεια υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα, συνήθως, σε υπόγειες κοιλότητες με πετρώματα αλάτων. Πρέπει, τα τοιχώματα των κοιλοτήτων να μην έχουν ρωγμές, καθώς έτσι θα υπάρχει διαρροή πεπιεσμένου αέρα και συνεπώς διαρροή ενέργειας. Αυτή τη στιγμή, σε λειτουργία βρίσκονται μόλις δύο μονάδες. Η μονάδα Huntorf στη Γερμανία με ονομαστική ισχύ 320 MW, που βρίσκεται σε λειτουργία από το 1978 και η μονάδα McIntosh στην Αλαμπάμα των ΗΠΑ με ονομαστική ισχύ 110 MW, που λειτουργεί από το 1991 [28]. Τα CAES χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους:

1. Διαβατικά CAES, όπως είναι οι δύο ήδη υπάρχοντες μονάδες
2. Αδιαβατικά CAES
3. Ισόθερμα CAES




**Εικόνα 2.1:** (α) διαβατικό CAES, (β) αδιαβατικό CAES και (γ) ισόθερμο CAES [29].

Κατά τη διαδικασία συμπίεσης του αέρα, αυξάνεται η θερμοκρασία του. Στα διαβατικά CAES, χρησιμοποιούνται εσωτερικά συστήματα ψύξης του αέρα, καθώς δεν μπορεί να αποθηκευτεί στη δεξαμενή υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι σε διαφορετική περίπτωση τα τοιχώματα της δεξαμενής θα καταπονηθούν με αποτέλεσμα να μειωθεί η διάρκεια ζωής της. Έτσι, ένα μέρος της ενέργειας απελευθερώνεται ως θερμότητα. Όμως, κατά το στάδιο της εκτόνωσης, επειδή η θερμοκρασία του αέρα ελαττώνεται, με αποτέλεσμα να παγώνει, πρέπει πριν εισέλθει στις τουρμπίνες, προθερμαθεί. Στα αδιαβατικά CAES, γίνεται χρήση μιας μονάδας αποθήκευσης της θερμότητας που εκλύεται κατά τη συμπίεση, η οποία χρησιμοποιείται κατά την εκτόνωση του αέρα για να μην πέσει υπερβολικά η θερμοκρασία του. Έτσι, ανεβαίνει ο συνολικός βαθμός απόδοσης σε σχέση με το διαβατικό CAES. Στα ισόθερμα CAES, οι μεταβολές γίνονται ελέγχοντας την καμπύλη πίεσης-όγκου. Δηλαδή, αν η πίεση του αέρα αυξάνεται, η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται συμπίεση σε πολλαπλά στάδια ή αποθήκευση της θερμότητας. Έτσι, χρησιμοποιούνται λιγότερα επιμέρους μηχανήματα, που οι επιμέρους συντελεστές απόδοσής τους, θα οδηγούσαν σε συνολικά μικρότερο βαθμό απόδοσης.

## 2.2 Διαβατικές μονάδες CAES

Ένα τυπικό διαβατικό CAES αποτελείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα, έναν συμπιεστή που είναι συζευγμένος με τον κινητήρα, τη δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, την τουρμπίνα αποσυμπίεσης και τη γεννήτρια.

- **Κινητήρας**: Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι απαραίτητος, καθώς κατά τις περιόδους όπου υπάρχει περίσσεια ενέργειας, το πλεόνασμα χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του συμπιεστή, ο οποίος είναι συζευγμένος με τον κινητήρα.
- **Συμπιεστής**: Ο συμπιεστής, με τη βοήθεια του ηλεκτρικού κινητήρα, συμπιέζει τον αέρα, δηλαδή τον θέτει υπό υψηλή πίεση. Η συμπίεση γίνεται σε περισσότερα από ένα στάδια, ώστε ο αέρας να φτάνει σταδιακά στα επιθυμητά επίπεδα πίεσης. Τα διαβατικά CAES έχουν μια εσωτερική μέθοδο ψύξης, καθώς κατά τη συμπίεση του αέρα, αυξάνεται η θερμοκρασία του, γεγονός που μπορεί να βλάψει τα τοιχώματα των κοιλοτήτων.
- **Δεξαμενή αποθήκευσης**: Συνήθως είναι σπήλαια ή δεξαμενές, τα οποία είναι ερμητικά κλειστά, ώστε να μην υπάρχει διαρροή αέρα. Η αποθηκευτική τους ικανότητα, εξαρτάται απ' το μέγεθος τους και από την πίεση στην οποία βρίσκεται ο αέρας. Επίσης, απαιτούνται οι κατάλληλες σωληνώσεις.
- **Τουρμπίνα**: Όταν υπάρχει έλλειμα ενέργειας, ο συμπιεσμένος αέρας, προθερμαίνεται με τη βοήθεια αναφλεκτήρων και στη συνέχεια οδηγείται στις τουρμπίνες αποσυμπίεσης πολλαπλών σταδίων για να εκτονωθεί. Οι αναφλεκτήρες είναι μία μέθοδος αναθέρμανσης του αέρα. Στα διαβατικά CAES, γίνεται χρήση φυσικού αερίου, που αναφλέγεται κατά το στάδιο εκτόνωσης του συμπιεσμένου αέρα. Η αποσυμπίεση γίνεται σε πολλαπλά στάδια, και πριν την είσοδο του αέρα σε κάθε στάδιο, πρέπει να προθερμαθεί,

διαφορετικά κινδυνεύουν να κρυσταλλωθούν οι τουρμπίνες, καθώς η θερμοκρασία του αέρα πέφτει.

- **Γεννήτρια**: Η τουρμπίνα περιστρέφει τη γεννήτρια, οπού το μηχανικό έργο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ένας διαβατικός σταθμός CAES έχει χαμηλή απόδοση, καθώς η συμπίεση και η αποσυμπίεση γίνονται σε πολλά στάδια. Επίσης, απαιτείται ένα μέσο αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα, που συνήθως είναι ένας αναφλεκτήρας φυσικού αέριου. Έτσι, το σύστημα έχει δύο εισόδους ενέργειας: μία από την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και μία από το φυσικό αέριο. [30].

## 2.3 Αδιαβατικές μονάδες CAES

Ένας τρόπος για να αυξηθεί η απόδοση του CAES είναι η εκμετάλλευση της ανόδου της θερμοκρασίας του αέρα κατά τη συμπίεση, στο στάδιο της αποσυμπίεσης, όπου απαιτείται αύξηση της θερμοκρασίας του αποθηκευμένου συμπιεσμένου αέρα που τροφοδοτεί την τουρμπίνα. Αυτό επιτυγχάνεται με το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας που αποτελείται από:

- **Διαθερμικό λάδι**: αποθηκεύει τη θερμότητα που παράγεται στη μεριά των συμπιεστών.
- **Δεξαμενές αποθήκευσης λαδιού**: χρησιμοποιούνται δύο δεξαμενές. Μία δεξαμενή κρύου λαδιού, που απορροφά θερμότητα από τη μεριά των συμπιεστών και μία δεξαμενή ζεστού λαδιού, που αποθηκεύει το ζεστό λάδι και κατά τη διαδικασία της αποσυμπίεσης, προσφέρει θερμότητα στον πεπιεσμένο αέρα. Η μεταφορά θερμότητας από τον αέρα στο λάδι και από το λάδι στον αέρα, γίνεται με τη χρήση δύο εναλλακτών θερμότητας.
- **Εναλλάκτες θερμότητας**: Από τη μεριά των συμπιεστών, οι εναλλάκτες βοηθούν στην ελάττωση της θερμοκρασίας του πεπιεσμένου αέρα, ανταλλάζοντας θερμότητα με το λάδι. Οι εναλλάκτες από την μεριά των τουρμπινών, χρησιμοποιούν τη θερμότητα του λαδιού, για να θερμάνουν τον αποσυμπιεσμένο αέρα [31].

## 2.4 Ισόθερμες μονάδες CAES

Στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, οι σταθμοί CAES, απαιτούν πολλά εξαρτήματα και πολλά στάδια συμπίεσης και αποσυμπίεσης. Αυτό συμβάλλει στη μείωση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης, καθώς στην εξίσωση υπεισέρχονται πολλοί επιμέρους, συντελεστές απόδοσης. Το βασικό πρόβλημα και στις δύο προηγούμενες τεχνολογίες CAES, είναι η αύξηση θερμοκρασίας του αέρα κατά την συμπίεση, επομένως προκύπτει η ανάγκη για ελάττωση της θερμοκρασίας του για πρακτικούς λόγους, δηλαδή πρέπει να φύγει θερμότητα από το σύστημα. Ομοίως, κατά το στάδιο της αποσυμπίεσης, το σύστημα απαιτεί θερμότητα. Οι δύο αυτές διαδικασίες μειώνουν το συνολικό βαθμό απόδοσης.

Προκύπτει, λοιπόν, η ανάγκη απαλοιφής αυτών των διαδικασιών. Αυτό επιτυγχάνεται σε έναν τρίτο τύπο CAES, τον ισόθερμο. Στο συγκεκριμένο τύπο, δεν χρειάζεται η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα, καθώς εκμεταλλεύεται την καμπύλη P-V, από την γνωστή καταστατική εξίσωση των αερίων:

Καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων: $\mathbf{P \cdot V = n \cdot R \cdot T}$

όπου P: η πίεση στην οποία βρίσκεται το αέριο

V: ο όγκος που καταλαμβάνει το αέριο

n: ο αριθμός των moles του αερίου

R: η παγκόσμια σταθερά των αερίων με τιμή 8,314 $Jmol^{-1}K^{-1}$

T: η απόλυτη θερμοκρασία σε K

Παρατηρεί κανείς, ότι με την άνοδο της πίεσης, υπό σταθερό όγκο, αυξάνεται αναλόγως και η θερμοκρασία του αερίου. Στην εν λόγω περίπτωση όμως, αντί να παραμένει σταθερός ο όγκος του αερίου, ελαττώνεται, ώστε με αυτόν τρόπο η θερμοκρασία να παραμένει σταθερή, ενώ η πίεση του αερίου να αυξάνεται στις επιθυμητές τιμές.

## 2.5 Κοιλότητες για την αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα

Ο αέρας, αφού συμπιεστεί οδηγείται σε κατάλληλες δεξαμενές αποθήκευσης. Συνήθως, είναι υπόγειες κοιλότητες, με αεροστεγή τοιχώματα, προκειμένου να μην υπάρχει διαρροή αέρα. Αυτή τη στιγμή, υπάρχουν τρεις τύποι σπηλαίων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα:

1. Σπήλαια αλάτων
2. Σπήλαια με σκληρά πετρώματα
3. Σπήλαια με πορώδη πετρώματα

### 2.5.1 Σπήλαια αλάτων

Τα σπήλαια αλάτων, είναι κατάλληλα για απευθείας αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα, όπως δείχνουν εμπειρικά στοιχεία, καθώς τέτοιου είδους σπήλαια έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση υδρογονανθράκων υπό υψηλή πίεση, όπως υγραέριο και φυσικό αέριο. Αυτό είναι απόδειξη, ότι είναι κατάλληλοι χώροι για αποθήκευση αεριών στα επιθυμητά επίπεδα πίεσης ενός CAES. Τέτοιου τύπου κοιλότητες, μπορούν να κατασκευαστούν με την τεχνική διάλυσης-εξόρυξης, μια τεχνική απλή και φθηνή. Αρχικά, μέσω αντλιών, διοχετεύεται νερό ή κάποιο άλλο υγρό σε ένα κοίτασμα αλατιού. Το αλάτι διαλύεται στο υγρό και έτσι δημιουργείται μία κοιλότητα, κατάλληλη για αποθήκευση αέρα. Το αρχικό κεφάλαιο για μία τέτοια δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα κυμαίνεται 2-10€/kWh.

### 2.5.2 Σπήλαια σκληρών πετρωμάτων

Αποτελούν μία ακόμα επιλογή για υπόγεια δεξαμενή αέρα και για ένα σύστημα CAES. Όμως, το κόστος για μία νέα τέτοια κοιλότητα ανέρχεται στα 30€/kWh. Το βάθος μιας τέτοιας κοιλότητας για να είναι κατάλληλη για ένα σύστημα CAES πρέπει να βρίσκεται στο εύρος των 300 έως 1.500 m. Αν και τέτοιου είδους κοιλότητες είναι κατάλληλες για μεγάλης κλίμακας CAES, προτιμώνται σπήλαια αλάτων, καθώς είναι μικρότερο το αρχικό κόστος. Ένας τρόπος ελαχιστοποίησης του κόστους είναι η χρησιμοποίηση ήδη υπαρχόντων κοιλοτήτων (πχ παλιά ορυχεία), ωστόσο αυτό περιορίζει τις επιλογές για την τοποθεσία του συστήματος CAES.

### 2.5.3 Σπήλαια πορωδών πετρωμάτων

Υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι και κοιλότητες πορωδών πετρωμάτων είναι υποψήφιες για αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι το μικρό αρχικό κεφάλαιο, καθώς υπάρχουν αναφορές ότι φτάνει 0,10-0,11€/kWh. Ωστόσο, λόγω των γεωφυσικών χαρακτηριστικών τους, έχουν σχετικά μικρών ρυθμών έγχυσης και απόσυρσης του συμπιεσμένου αέρα σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. [29][33].

## 2.6 Συμπέρασμα

Σε αυτή τη διπλωματική, σκοπός είναι να αποδειχθεί ότι η αποθήκευση ενέργειας υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα, είναι ανταγωνιστική των συμβατικών μπαταριών. Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθούν τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες, οπού για την υλοποίηση του συστήματος αποθήκευσης χρησιμοποιούνται μπαταρίες ιόντων λιθίου, αδιαβατικό CAES και σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνδυαζόμενης ισχύος και θερμικής ενέργειας (Renewable Energy System Combined Heat & Power ή RESCHP). Συγκεκριμένα, θα θεωρηθούν οι ίδιες υποθέσεις για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος (ηλιοφάνεια, ημέρες παροχής, συνεχόμενες ημέρες συννεφιάς κλπ.), και τις ίδιες παραδοχές (απόδοση, αυτοεκφόρτιση, κλπ.) ώστε να προσδιοριστεί το μέγεθος της μονάδας αποθήκευσης σε kWh, ως σαν να ήταν αποτελούμενη από συσσωρευτές. Σε επόμενο κεφάλαιο θα προσδιοριστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το μέγεθος του CAES λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις του αρχικού σχεδιασμού, αλλά προσαρμόζοντας τις παραδοχές στις δυνατότητες του CAES. Επιπλέον, η σχεδίαση του αρχικού συστήματος με συσσωρευτές ως μονάδα αποθήκευσης γίνεται και για διδακτικούς σκοπούς. Εκεί μπορεί να γίνει ευκολότερα ο έλεγχος της ορθότητας των αποτελεσμάτων και μπορεί να αποκτηθεί η απαραίτητη εμπειρία για την εφαρμογή των απαραίτητων προσαρμογών στους υπολογισμούς που απαιτείται μεταγενέστερα στο σύστημα CAES.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ, ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

## 3.1 Εισαγωγή

Στόχος της διπλωματικής είναι η μελέτη ενός συστήματος φωτοβολταϊκών, συνδεδεμένο στο δίκτυο, με ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένης και σταθερής ισχύος κάθε χρονική στιγμή, όλο το χρόνο. Ένα τέτοιο σύστημα, είναι ανέφικτο να καλύψει σταθερό φορτίο χωρίς τη χρήση μονάδας αποθήκευσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεταβαλλόμενη, δεν μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια των ηλιακών κυττάρων τις ημέρες συννεφιάς, αλλά και τις ώρες μετά τη δύση του ηλίου. Με δεδομένα την τοποθεσία, τη μέγιστη ισχύ των φωτοβολταϊκών και το μέγεθος του φορτίου που πρέπει να καλυφθεί, είναι εφικτό να υπολογιστεί η βέλτιστη χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης, ώστε το σύστημα να είναι αξιόπιστο και όσο πιο οικονομικό γίνεται. Ο καλύτερος τρόπος να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία του συστήματος είναι η μελέτη να γίνει υπό τις δυσμενέστερες δυνατές συνθήκες λειτουργίας. Επειδή υπάρχει συσσωρευμένη γνώση και εμπειρία σε συστήματα εγγυημένης ισχύος με χρήση συσσωρευτών ως μονάδες αποθήκευσης, η διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage, ή απλά CAES) θα βασιστεί στην ίδια προσέγγιση.

## 3.2 Γεωγραφικοί παράμετροι και μετεωρολογικά δεδομένα

Η πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού εξαρτάται άμεσα απ' την τοποθεσία. Ανάλογα με την τοποθεσία, προσαρμόζεται η κλίση του φωτοβολταϊκού, ώστε η εκμετάλλευση ενέργειας να είναι βέλτιστη κατά τη διάρκεια ενός έτους. Επίσης, το κλίμα αλλάζει από περιοχή σε περιοχή, έτσι οι τιμές της πυκνότητας ενέργειας ακτινοβολίας, αλλά και οι συνεχόμενες ημέρες συννεφιάς, διαφέρουν ανάλογα την τοποθεσία.
Έστω, ότι δίνονται οι συντεταγμένες της τοποθεσίας όπου θα εγκατασταθεί ένα σύστημα φωτοβολταϊκών με εγκατεστημένη ισχύ $\mathbf{P_{peak}}$, για την κάλυψη ενός φορτίου $\mathbf{P_{laod}}$. Πρώτον, εξετάζονται τα μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα της εν λόγω περιοχής. Ο μήνας με την ελάχιστη μέση μηνιαία πυκνότητα καθορίζει τις προδιαγραφές των μονάδων του συστήματος, καθώς αν μπορεί το σύστημα να ανταποκριθεί στις χείριστες συνθήκες λειτουργίας, θα μπορέσει να ανταποκριθεί σε όλη τη διάρκεια του έτους. Στη συνέχεια, συλλέγονται δεδομένα για τη μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας **I** για μία τυπική μέρα, του μήνα που επελέγη για τη μελέτη. Με αυτό ως δεδομένο, είναι εύκολος ο υπολογισμός της πυκνότητας ενέργειας της ακτινοβολίας που θα φτάσει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πάνελ κατ' αυτόν τον τρόπο:

$$\mathbf{H = \Sigma I_i} \qquad (3.1)$$

όπου $I_i$ η μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας την i ώρα.

## 3.3 Υπολογισμός της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος σε σύστημα συσσωρευτών

Το επόμενο βήμα είναι η εξασφάλιση της ελάχιστης ισχύος, ώστε το σύστημα να αποτελεί σύστημα εγγυημένης ισχύος. Για να υπολογιστεί, λοιπόν η ελάχιστη ισχύς που πρέπει να είναι σε θέση να αποδώσει το σύστημα, πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι επιμέρους συντελεστές απόδοσης κάθε τμήματος του συστήματος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ονομασίες των παραμέτρων που αντιστοιχούν στους επιμέρους συντελεστές απόδοσης των επιμέρους τμημάτων:

| | |
|---|---|
| Συσσωρευτής | $\eta_{batt}$ |
| Μετατροπέας dc/dc | $\eta_{dc/dc}$ |
| Αντιστροφέας dc/ac | $\eta_{ac/dc}$ |
| Καλωδίωση | $\eta_{wiring}$ |

**Πίνακας 3.1:** Επιμέρους συντελεστές απόδοσης του υπό μελέτη συστήματος

Λαμβάνοντας υπόψιν τους συντελεστές απόδοσης, η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbf{P_{min} = P_{load}} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{P_{min,corr} = P_{min} / (\eta_{batt} \cdot \eta_{dc/dc} \cdot \eta_{ac/dc} \cdot \eta_{wiring})} \quad (3.3)$$

Οι συνεχόμενες ημέρες συννεφιάς, εξαρτώνται από τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής. Μπορούν να υπολογιστούν αφαιρώντας από τις συνολικές ώρες του επιλεγμένου μήνα, τις ώρες νύχτας και τις ώρες ηλιοφάνειας. Ύστερα, μπορεί να εξαχθεί προσεγγιστικό συμπέρασμα για τις συνεχόμενες ημέρες συννεφιάς.

## 3.4 Υπολογισμός της χωρητικότητας του συσσωρευτή

Το τελευταίο βήμα για τη διαστασιολόγηση του συσσωρευτή, είναι ο υπολογισμός της χωρητικότητάς του. Αρχικά, πρέπει να υπολογιστεί η ενέργεια που απαιτεί το φορτίο **E**.

$$\mathbf{E = P_{load} \cdot 24h} \quad (3.4)$$

Όμως, επειδή λαμβάνονται υπόψιν και οι απώλειες από τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος, υπολογίζεται η διορθωμένη ενέργεια που απαιτείται:

$$\mathbf{E_{corr} = E / \eta_{total}} \quad (3.5)$$

όπου $\mathbf{\eta_{total}}$ είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος.

Η χωρητικότητα του συσσωρευτή σε Ah, υπολογίζεται από τον επόμενο τύπο:

$$\mathbf{C_N = N \cdot E_{corr} / V_{dc}} \quad (3.6)$$

όπου N: οι ημέρες συνεχομένης συννεφιάς συν μία έξτρα μέρα

$V_{dc}$: η dc τάση του συσσωρευτή

Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψιν και το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή. Έτσι, η τελική τιμή της χωρητικότητας του συσσωρευτή, προκύπτει απ' τον τύπο:

$$\mathbf{C = C_N / DOD} \quad (3.7)$$

Το βάθος εκφόρτισης εξαρτάται από τον τύπο συσσωρευτή που θα επιλεγεί. Συνήθως, για τέτοιου είδους εφαρμογές χρησιμοποιούνται συσσωρευτές ιόντων λιθίου, καθώς έχουν μεγάλη ενεργειακή απόδοση[34].

## 3.5 Εφαρμογή

Έστω, ότι η συγκεκριμένη ανάλυση γίνεται για ένα σύστημα φωτοβολταϊκών, εγκατεστημένο στην πόλη της Ρόδου, με γεωγραφικές συντεταγμένες (**36.429865, 28.208066**). Το σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, οπού πρέπει να παρέχει συνεχώς τουλάχιστον **50 kW**, δηλαδή να παρέχει εγγυημένη ισχύ **50 kW**. Για το σύστημα χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά εγκατεστημένης ισχύος **300 kWp**. Προσεγγιστικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι η εγγυημένη ισχύς ισοδυναμεί με αυτόνομο σύστημα που πρέπει να καλύπτει φορτίο 50 kW. Η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{P\ [Wp] = A\ [m^2] \cdot G\ [W/m^2] \cdot \eta_R} \quad (3.8)$$

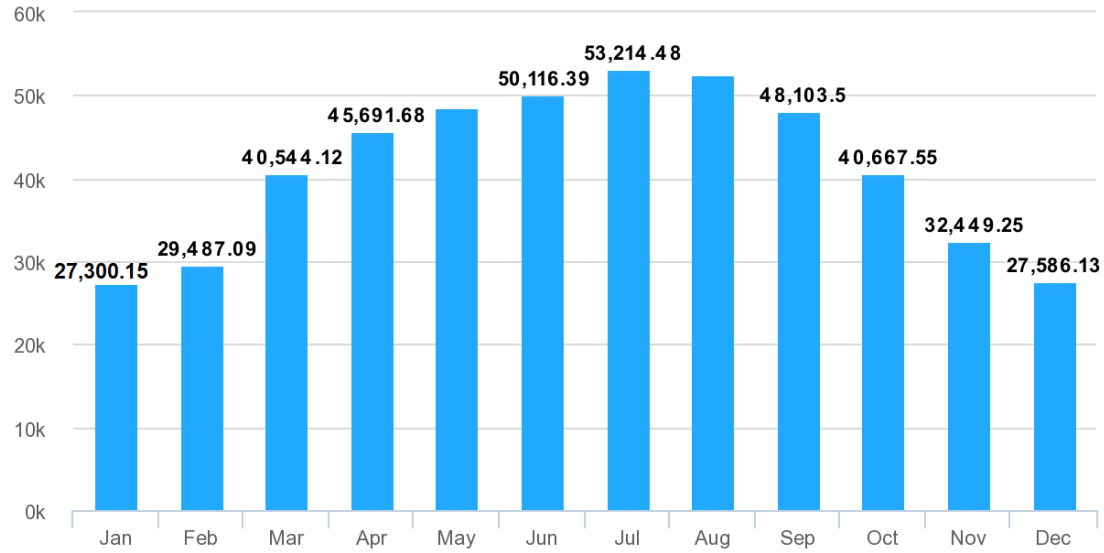
όπου:

- P η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών
- G = 1000 W/m$^2$ είναι η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος
- $\eta_R$ το ποσοστό ωφέλιμης ηλιακής ακτινοβολίας του 1 G(τυπική τιμή 0,75) [35].

Λύνοντας ως προς την επιφάνεια A την παραπάνω σχέση, για την δοθείσα εγκατεστημένη ισχύ και για μια απόδοση $\eta_R$ 0,75:

$$\mathbf{A = \frac{P}{1000\left[\frac{W}{m2}\right]\cdot\eta} = \frac{300\ kWp}{1000\left[\frac{W}{m2}\right]\cdot 0{,}75} = 400\ m^2}$$

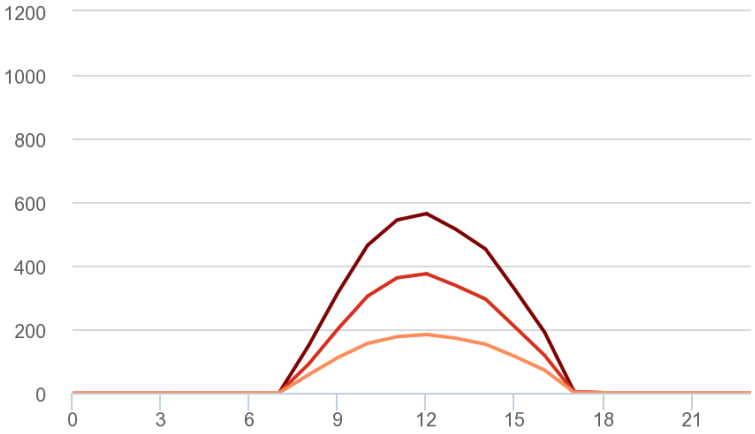
Η μελέτη θα γίνει για το χειρότερο υποθετικό σενάριο που πρέπει να μπορεί να αντιμετωπίσει το σύστημα, με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα θα εξαχθούν από το λογισμικό PVGIS και από την EMY. Πρώτο βήμα είναι η αναζήτηση του μήνα του έτους με τη μικρότερη πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας στη συγκεκριμένη περιοχή. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας των **300 kWp** φωτοβολταϊκών, στην περιοχή της Ρόδου.




**Εικόνα 3.1**: Μηνιαία παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκών εγκατεστημένης ισχύος 300 kWp, στην τοποθεσία της Ρόδου για ένα τυπικό έτος [36].

Από την Εικόνα 3.1, προκύπτει ότι ο μήνας με τη μικρότερη παραγωγή ενέργειας, είναι ο Ιανουάριος, με 27.300,15 kWh.

Στη συνέχεια, για μία τυπική ημέρα του Ιανουαρίου υπολογίζεται η μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος, με τη βοήθεια του PVGIS.




**Εικόνα 3.2:** Μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας στην τοποθεσία της Ρόδου [36].

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθούν αναλυτικά οι τιμές της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας, καθώς και η ισχύς που αποδίδουν τα φωτοβολταϊκά.

| **Ώρα** | **Πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας** | **Ισχύς που αποδίδουν τα φωτοβολταϊκά επιφάνειας 400 $m^2$** |
|---|---|---|
| 08:00 | 148,22 $W/m^2$ | 59,288 kW |
| 09:00 | 315,74 $W/m^2$ | 126,296 kW |
| 10:00 | 464,04 $W/m^2$ | 185,616 kW |
| 11:00 | 543,67 $W/m^2$ | 217,468 kW |
| 12:00 | 563,51 $W/m^2$ | 225,404 kW |
| 13:00 | 513,89 $W/m^2$ | 205,556 kW |
| 14:00 | 452 $W/m^2$ | 180,8 kW |
| 15:00 | 323,85 $W/m^2$ | 129,54 kW |
| 16:00 | 190,72 $W/m^2$ | 76,288 kW |
| 17:00 | 3,52 $W/m^2$ | 1,408 kW |

**Πίνακας 3.2:** Μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας και μέση παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών 300 kWp, για μία τυπική ημέρα του Ιανουαρίου, στην τοποθεσία της Ρόδου [36].

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ισχύος που πρέπει να μας εξασφαλίσει το σύστημα για να είναι αυτόνομο. Για να γίνει αυτό απαιτείται ο αριθμός συνεχόμενων ημέρων συννεφιάς στην τοποθεσία της Ρόδου. Βάσει των ελεύθερων στοιχείων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ), για την περιοχή της Ρόδου, το χρονικό διάστημα από το 2000 έως το 2004, το μήνα Ιανουάριο, ο μέγιστος αριθμός συνεχόμενων ημερών συννεφιάς ανέρχεται σε 2. Τα στοιχεία της ΕΜΥ υπολογίζουν τη συννεφιά ανά τρίωρο, με μονάδα μέτρησης τα okta. Τα okta είναι το κλάσμα με παρονομαστή το 8, όπου τα σύννεφα καλύπτουν τον ουρανό. Για παράδειγμα, 7 okta συνολική συννεφιά, σημαίνει ότι ο ουρανός καλύπτεται κατά 7/8 από σύννεφα[37]. Για να θεωρηθεί ότι μία ημέρα είναι πλήρως συννεφιασμένη, πρέπει για τον μήνα Ιανουάριο, κατά τον οποίο ο ηλιακός δίσκος είναι ορατός 9 ώρες, και τα τρία τρίωρα [38]. Επίσης, το PVGIS, υπολογίζει ότι η βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών για την μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 31˚ και αζιμούθια γωνία 2˚. Η απόκλιση από το ιδανικό αζιμούθιο (0º), οφείλεται στις σκιάσεις ορεινών όγκων στον ορίζοντα της περιοχής, ενώ η κλίση προσεγγίζει το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, όπως αναμενόταν.

Στη συνέχεια, πρέπει να γίνει έλεγχος, αν τα φωτοβολταϊκά μπορούν να καλύψουν το φορτίο. Για να γίνει αυτός ο έλεγχος, πρέπει να καθοριστούν οι συντελεστές απόδοσης των επιμέρους συσκευών. Όπως προαναφέρθηκε, απαιτούνται ένας dc/ac αντιστροφέας, ένας dc/dc μετατροπέας, κατάλληλα καλώδια και ο συσσωρευτής. Οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για εφαρμογές με φωτοβολταϊκά είναι συσσωρευτές ιόντων λιθίου.

Στο εμπόριο οι συσσωρευτές διατίθενται, ώστε να δουλεύουν σε τάση λειτουργίας πολλαπλάσια των 12 V. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, θα επιλεχθεί συσσωρευτής 48 V, γιατί έτσι θα μειωθεί η απαιτούμενη πυκνότητα ενέργειας της μονάδας αποθήκευσης, ενώ παράλληλα το ρεύμα θα έχει μικρότερη τιμή, άρα θα χρειαστούν αγωγοί μικρότερης διατομής. Άρα, ο dc/dc converter πρέπει να έχει τάση λειτουργίας 48 V. Η τάση εξόδου του dc/ac inverter, είναι επιθυμητό να είναι στο επίπεδο της τάσης του δικτύου, δηλαδή 230 V. Οι παρακάτω αποδόσεις είναι συνηθισμένες για τις συσκευές που κυκλοφορούν στο εμπόριο.

| | |
|---|---|
| Φορτίο | 50 kW |
| Καταναλισκόμενη ενέργεια φορτίου | 1200 kWh |
| Μέση ημερήσια παραγωγή ενέργειας (Ιανουάριος) | 1407 kWh |
| Τάση λειτουργίας του dc/dc ($V_{dc}$) | 48 V |
| Τάση εξόδου του dc/ac ($V_{ac}$) | 230 V |
| Απόδοση καλωδίωσης ($\eta_w$) | 98% |
| Απόδοση μονάδας αποθήκευσης ($\eta_{batt}$) | 97% |
| Απόδοση του dc/ac inverter | 91% |
| Απόδοση του dc/dc converter | 88% |

**Πίνακας 3.3:** Οι τιμές που επελέγησαν για κάθε επιμέρους τμήμα του συστήματος

Η ελάχιστη ισχύς που πρέπει να καλύπτει το σύστημα, ανά πάσα στιγμή με βάση τη σχέση (3.2) είναι:

$$\mathbf{P_{min} = 50\ kW}$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τους επιμέρους συντελεστές ισχύος, γίνεται διόρθωση αυτής της τιμής με τη βοήθεια της σχέσης (3.3):

$$\mathbf{P_{minCorr} = P_{min}/(\eta_{batt} \cdot \eta_w \cdot \eta_{dc/dc} \cdot \eta_{dc/ac}) = (50\ kW)/(0{,}97 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}88 \cdot 0{,}91) = 65{,}68\ kW}$$

Όπου NCD είναι ο αριθμός των συνεχόμενων ημερών συννεφιάς και FRD οι μέρες ηλιοφάνειας που απαιτούνται για πλήρη επαναφόρτιση. Καθώς η μέση ημερήσια παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών είναι 1407 kWh, 207 kWh περισσότερες από όσες χρειάζονται για να καλυφθεί το φορτίο. Άρα για πλήρη επαναφόρτιση συσσωρευτών με χωρητικότητα 5,91 MWh, απαιτούνται περίπου 28 ημέρες.

Τέλος, πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί για τη χωρητικότητα του συσσωρευτή. Σύμφωνα με τη σχέση (3.4), η κατανάλωση ενέργειας του φορτίου και των επιμέρους στοιχείων είναι, και διορθωμένη με το βαθμό απόδοσης σύμφωνα με την (3.5):

$$\mathbf{E = P_{load} \cdot 24h = 1.200\ kWh}$$

$$\mathbf{E_{corr} = E / \eta_{total} = \frac{1.200\ kWh}{0{,}91 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}88} = 1.576{,}37\ kWh}$$

Ο υπολογισμός της χωρητικότητας γίνεται από το πηλίκο του γινομένου των ημερών αυτονομίας του συστήματος (άρα 3 ημέρες) με ενέργεια που καταναλώνεται με την τάση $V_{dc}$, άρα η σχέση (3.7) δίνει:

$$\mathbf{C_N = 3\ days\ x\ 1.576{,}37\ kWh / 48\ V = 98{,}52\ kAh}$$

Επειδή επιλέγεται συσσωρευτής με βάθος εκφόρτισης 80%, τελικά από τη σχέση (3.7), η χωρητικότητα του συσσωρευτή θα πρέπει να είναι:

$$\mathbf{C = C_N/0.8 = 123{,}15\ kAh}$$

Καθώς χρησιμοποιούνται μπαταρίες ιόντων λιθίου, με προσεγγιστικό κόστος 200€/kWh (από το Κεφάλαιο 1), μπορεί να υπολογιστεί το κόστος του συστήματος. Απαιτείται αποθηκευτική ικανότητα 123,15 kAh ή 5.910 kWh. Άρα το κόστος είναι:

$$\mathbf{5.910\ [kWh] \cdot 200\ [€/kWh] = 1.182.000€}$$

## 3.6 Συμπέρασμα

Η υλοποίηση του αυτονόμου συστήματος με τη χρήση συσσωρευτών, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, έγινε για διδακτικούς σκοπούς, καθώς υπάρχει συσσωρευμένη γνώση και εμπειρία στο σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι πρακτικά φαίνεται ασύμφορη, καθώς απαιτούνται συσσωρευτές με χωρητικότητα 123,15 kAh ή 5,91 MWh. Ένα τέτοιο σύστημα δείχνει οικονομικά ασύμφορο, καθώς με τις ενδεικτικές τιμές που αναφέρθηκαν στο εισαγωγικό κεφάλαιο, οι συσσωρευτές θα κόστιζαν το ποσό των 1.182.000€. Στα επόμενα κεφάλαια θα εξεταστούν οι περιπτώσεις κάλυψης των αποθηκευτικών αναγκών ενέργειας του συστήματος εγγυημένης ισχύος με διαφορετικές τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage ή CAES), ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι οικονομικότερες τεχνολογίες.

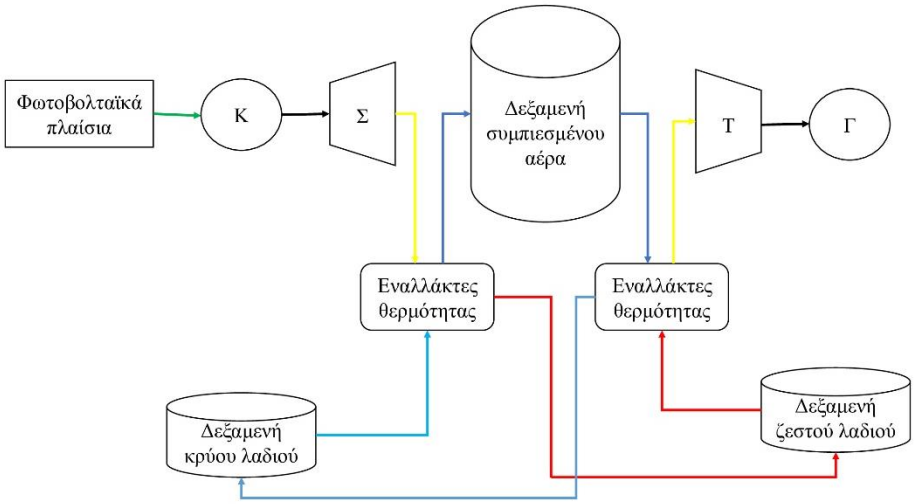
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΗΣΗ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΟΥ CAES ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

## 4.1 Εισαγωγή

Όταν το δίκτυο απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας, από ένα σύστημα φωτοβολταϊκών, οι συσσωρευτές είναι δύσκολο να εξασφαλίσουν την αυτονομία του συστήματος, ενώ το κόστος του θα ήταν ασύμφορο με βάση τους πίνακες από το πρώτο κεφάλαιο. Επομένως, πρέπει να βρεθεί λύση για την αυτονομία σε μεγάλης κλίμακας συστήματα. Η λύση που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, είναι αυτή του αδιαβατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργεια συμπιεσμένου αέρα (Adiabatic Compressed Air Energy Storage ή A - CAES).

## 4.2 Διάγραμμα ροής ισχύος A - CAES

Το συγκεκριμένο σύστημα A - CAES αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά, έναν αντιστροφέα dc/ac, ένα σύγχρονο κινητήρα, συμπιεστές, τουρμπίνες, σύγχρονη γεννήτρια και το φορτίο. Επίσης, απαιτούνται μία δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα, εναλλάκτες θερμότητες και δύο δεξαμενές αποθήκευσης λαδιού. Το διάγραμμα ροής ισχύος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:




**Εικόνα 4.1:** Διάγραμμα ροής A - CAES. Κ: σύγχρονος κινητήρας, Γ: σύγχρονη γεννήτρια, Σ: συμπιεστές, Τ: τουρμπίνες αποσυμπίεσης[31].

Η περίσσεια ισχύος των φωτοβολταϊκών, διοχετεύεται στο σύγχρονο κινητήρα. Όμως, ο σύγχρονος κινητήρας, λειτουργεί με εναλλασσόμενη τάση, ενώ η τάση από τα φωτοβολταϊκά είναι dc. Έτσι, είναι αναγκαία η παρεμβολή ενός dc/ac inverter. Ο άξονας του σύγχρονου κινητήρα, συνδέεται με τους συμπιεστές. Χρησιμοποιούνται, συνήθως πάνω από ένας, και το πλήθος τους εξαρτάται από τη διαθέσιμη περίσσεια

ενέργειας, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ και της εγγυημένης ισχύος που πρέπει συνεχώς να παρέχεται στο δίκτυο.. Οι εναλλάκτες θερμότητας, χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν την θερμότητα του συμπιεσμένου αέρα σε διαθερμικό λάδι. Στη συνέχεια, το θερμό λάδι αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή, ενώ ο συμπιεσμένος αέρα σε μία άλλη κατάλληλη δεξαμενή. Κατά τη διάρκεια της αποσυμπίεσης, ο συμπιεσμένος αέρας θερμαίνεται με τη χρήση εναλλακτών, κάνοντας χρήση του θερμού λαδιού. Ο συμπιεσμένος αέρας οδηγείται στα πτερύγια των τουρμπινών, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με μία σύγχρονη γεννήτρια. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ηλεκτρική απόδοση κατά το στάδιο της συμπίεσης και της αποσυμπίεσης είναι μικρή, αλλά με τη χρήση του ζεστού λαδιού ή του ατμού, αντί για την καύση κάποιου ορυκτό καυσίμου, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της κάθε διαδικασίας. Ο νέος βαθμός απόδοσης ονομάζεται πολυτροπικός, καθώς συνυπολογίζει τόσο την ηλεκτρική, όσο και τη θερμική απόδοση [31].

## 4.3 Διαστασιολόγηση αδιαβατικής μονάδας αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα

Το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να καλύψει σε κάθε ενδεχόμενο το φορτίο $\mathbf{P_{load}}$. Οι υπολογισμοί γίνονται για την χειρότερη περίπτωση, όπου οι απαιτήσεις του συστήματος θα είναι μεγαλύτερες.

Αρχικά, θα πρέπει να είναι διαθέσιμα τα κλιματικά δεδομένα, δηλαδή οι συνεχόμενες ημέρες συννεφιάς και η μέση ωριαία ακτινοβολία για μια τυπική ημέρα, ενός τυπικού μήνα του έτους.

Έπειτα, πρέπει να γίνουν υπολογισμοί για την τιμή της χωρητικότητας του συστήματος σε kWh. Η απαραίτητη χωρητικότητα του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbf{C_N = (days\ of\ autonomy) \cdot P_{load} \cdot 24\ h} \quad (4.1)$$

Εφόσον γνωρίζει κανείς τη χωρητικότητα σε kWh, μπορεί να υπολογίσει την χωρητικότητα της δεξαμενής σε όγκο με τον εξής τρόπο:

$$\mathbf{P \cdot V^{\gamma} = \sigma\tau\alpha\theta.}$$

Επειδή γίνεται χρήση ατμοσφαιρικού αέρα που αποτελείται κυρίως από διατομικά αέρια η σταθερά θα ισούται $\gamma = \frac{7}{5}$. Η ενέργεια που εκλύεται κατά την αποσυμπίεση είναι:

$$\mathbf{W} = \int_{Va}^{Vb} \boldsymbol{P dV} \quad (4.2)$$

όμως, $\mathbf{P \cdot V^{\gamma} = \sigma\tau\alpha\theta. = P_a \cdot V_a^{\gamma}}$, οπότε $\mathbf{P = P_a \cdot (\frac{Va}{V})^{\gamma}}$ (4.3)

Από τις σχέσεις (2) και (3): $\mathbf{W} = \int_{Va}^{Vb} \mathbf{K} \cdot \boldsymbol{V^{-\gamma}\, dV}$ (4.4)

όπου $\mathbf{K = P \cdot V^{\gamma} = P_a \cdot V_a^{\gamma} = P_b \cdot V_b^{\gamma}}$ (4.5)

Λύνοντας το ολοκλήρωμα της (4), προκύπτει:

$$\mathbf{W} = \frac{\boldsymbol{Pb}\cdot\mathbf{Vb}-\mathbf{Pa}\cdot\mathbf{Va}}{\boldsymbol{\gamma}-\mathbf{1}} \tag{4.6}$$

Όμως, από τη σχέση (5), προκύπτει ότι $\mathbf{V_a} = \sqrt[\gamma]{\frac{\mathbf{Pb}}{\boldsymbol{Pa}}} \cdot \mathbf{V_b}$ (4.7)

Από τις σχέσεις (5) και (6), οδηγούμαστε στη σχέση:

$$\mathbf{V_b} = \frac{\boldsymbol{W}\cdot(\boldsymbol{\gamma}-\mathbf{1})}{\boldsymbol{Pb}-\boldsymbol{Pa}\cdot\sqrt[\gamma]{\boldsymbol{Pb}/\boldsymbol{Pa}}} \tag{4.8}$$

Επιπλέον, είναι σημαντικός ο σχεδιασμός του συστήματος ψύξης. Για να γίνει αυτό, πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί για τη θερμοκρασία στην οποία πρέπει να αποθηκευτεί ο αέρας, άρα και κατ' επέκταση για τη θερμότητα που πρέπει να απορροφήσει το διαθερμικό λάδι [39].

Η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να αποθηκευτεί ο αέρας, για να έχουμε αδιαβατική μεταβολή είναι:

$$\frac{\boldsymbol{Pb}\cdot\mathbf{Vb}}{\boldsymbol{\theta b}} = \frac{\boldsymbol{Pa}\cdot\mathbf{Va}}{\boldsymbol{\theta a}} \iff \boldsymbol{\theta}_\mathbf{b} = \frac{\boldsymbol{Pb}\cdot\mathbf{Vb}}{\boldsymbol{Pa}\cdot\boldsymbol{Va}}\cdot\boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{a}} \tag{4.9}$$

Η θερμότητα που θα έχει ο αέρας και θα είναι η θερμότητα που θα πρέπει να απορροφήσει το λάδι, θα είναι:

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{air}} = \dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{air}}\cdot\mathbf{c}_{\mathbf{p,air}}\cdot\boldsymbol{\Delta\theta}_{\mathbf{air}} \tag{4.10}$$

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{oil}} = \dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{oil}}\cdot\mathbf{c}_{\mathbf{p,oil}}\cdot\boldsymbol{\Delta\theta}_{\mathbf{oil}} \tag{4.11}$$

Θεωρώντας, ότι στους εναλλάκτες η μεταφορά θερμότητας από το λάδι στο νερό γίνεται χωρίς απώλειες θα ισχύει

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{air}} = \dot{\mathbf{Q}}_{\mathbf{oil}} \tag{4.12}$$

Άρα από τις σχέσεις (4.11) και (4.12) μπορεί να υπολογιστεί η παροχή λαδιού στους εναλλάκτες.

Στη συνέχεια, πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή συμπιεστών. Επειδή, συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας, πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή στο μέγεθος τους, ώστε το σύστημα να μπορεί να τροφοδοτεί το φορτίο και ταυτόχρονα να λειτουργεί τουλάχιστον ένας συμπιεστής, σε περίπτωση όπου υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας. Έστω ότι χρησιμοποιούνται **k** συμπιεστές, με ονομαστική ισχύ $\mathbf{P_c}$ και παροχή αέρα $\dot{\mathbf{m}}$. Σημειώνεται ότι ο αέρας υπό υψηλή πίεση καταλαμβάνει λιγότερο χώρο, σε σχέση με όταν βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Αυτό λαμβάνεται υπόψιν με έναν συντελεστή $\mathbf{l}$ **[lt/m$^3$]**. Επομένως, η ηλεκτρική κατανάλωση των συμπιεστών, μέχρι να γεμίσει η δεξαμενή θα είναι:

$$\mathbf{t_{compression}} = \frac{\boldsymbol{Vb}\cdot\mathbf{1000}\,[\frac{\boldsymbol{lt}}{\boldsymbol{m3}}]}{\boldsymbol{k}\cdot(\dot{\mathbf{m}}/\boldsymbol{\rho})\cdot\boldsymbol{l}\cdot\mathbf{3600}\,\boldsymbol{s}}\ \mathbf{[h]} \tag{4.13}$$

- ρ η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες
- k ο αριθμός συμπιεστών
- ṁ η παροχή ατμοσφαιρικού αέρα ενός συμπιεστή
- l ο όγκος σε lt, που καταλαμβάνει ο αέρας υπό την πίεση στη δεξαμενή
- $V_b$ ο γεωμετρικός όγκος της δεξαμενής

Αντίστοιχα, ο χρόνος λειτουργίας των τουρμπινών, μέχρι να αδειάσει η δεξαμενή θα είναι:

$$\mathbf{t_{expansion}} = \frac{\boldsymbol{Vb\prime \cdot 1000\ [\frac{lt}{m3}]}}{(\dot{\mathbf{m}}\ /\boldsymbol{\rho}) \cdot \boldsymbol{l} \cdot \mathbf{3600}\ \boldsymbol{s}}\ \mathbf{[h]} \qquad (4.14)$$

όπου:

- $V_b'$ ο όγκος που θα είναι διαθέσιμος, μικρότερος από τον $V_b$
- ṁ η παροχή αέρα της τουρμπίνας
- ρ η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες
- l ο όγκος σε lt, που καταλαμβάνει ο αέρας υπό την πίεση στη δεξαμενή

Τελικά, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης από τον τύπο:

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{\boldsymbol{Κατανάλωση\ συμπιεστών}}{\boldsymbol{Παραγωγή\ ενέργειας\ τουρμπινών}} \qquad (4.15)$$

όπου η κατανάλωση των συμπιεστών θα είναι $\mathbf{k \cdot P_{compressor} \cdot t_{compression}}$ και η παραγωγή ενέργειας των τουρμπινών είναι $\mathbf{P_{turbines} \cdot t_{expansion}}$[40].

## 4.4 Εφαρμογή

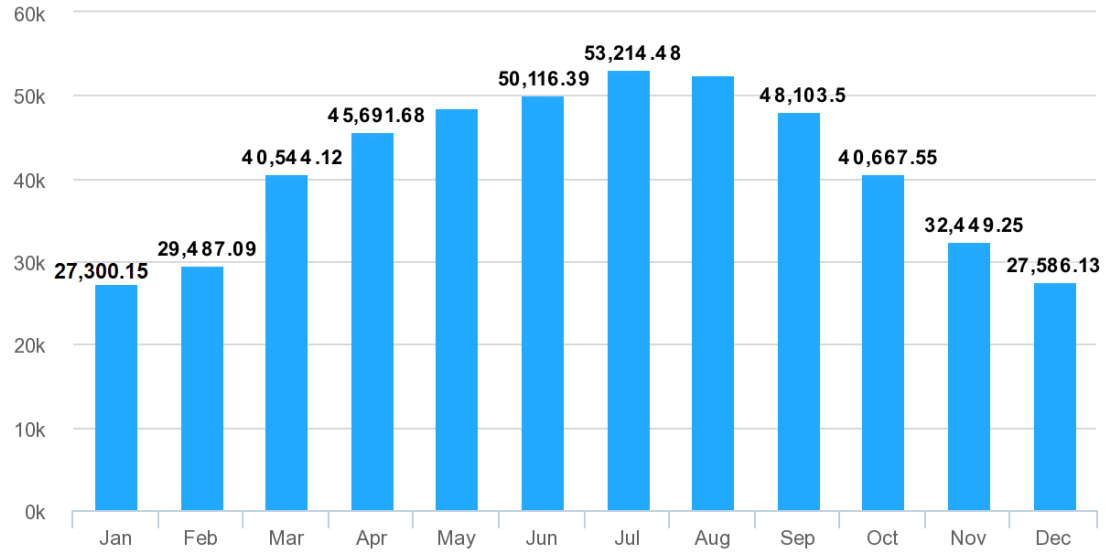
Έστω το σύστημα που περιγράφεται αναλυτικά την παράγραφο 3.5. Σε αυτήν την περίπτωση, όμως, θα γίνει χρήση μίας μονάδας αδιαβατικού C.A.E.S. αντί της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Επειδή, είναι διαθέσιμα φωτοβολταϊκά εγκατεστημένης ισχύος **300 kWp** και απαιτείται να λειτουργεί τουλάχιστον ένας συμπιεστής ώστε παράλληλα το σύστημα να αποθηκεύει ενέργεια, θα επιστρατευτούν τρεις κατά παραγγελία συμπιεστές με ονομαστικά χαρακτηριστικά **75 kW**, με παροχή αέρα **309 $Nm^3/h$** ή **0,103 kg/s**. Οι συμπιεστές θα συμπιέζουν τον ατμοσφαιρικό αέρα σε τρία στάδια, και η θερμοκρασία εξόδου του αέρα θα είναι **270 ˚C**. Ο αέρας θα αποθηκεύεται σε ειδικά διαμορφωμένη δεξαμενή υπό πίεση **200 bar**. Σημειώνεται ότι στα 200 bar, 1 $m^3$ αέρα, καταλαμβάνει 5 lt. Το διαθερμικό λάδι έχει $\mathbf{c_p}$ **= 2,08 kJ/kg˚C** και αρχικά θα βρίσκεται σε θερμοκρασία **13 ˚C**. Στη συνέχεια, μετά την απαγωγή της θερμότητας κατά τη συμπίεση του αέρα, αποθηκεύεται σε θερμικά μονωμένη δεξαμενή στους **240 ˚C**.

Επίσης, για την κάλυψη του φορτίου, θα χρησιμοποιηθούν τουρμπίνες με ρυθμιζόμενη ισχύ εξόδου. Η ονομαστική ισχύς, όπως προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα, είναι **89,44 kW**, με απώλειες **14,591 kW**. Η εκτόνωση του αέρα θα γίνεται σε έξι στάδια, όπου σε κάθε στάδιο η παροχή αέρα θα είναι **540 $Nm^3/h$** ή **0,18 kg/s**, ενώ ο αέρας θα εισέρχεται στην τουρμπίνα με θερμοκρασία **220 ˚C**. Για την τουρμπίνα δίνονται τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά για το κάθε στάδιό της:

| Στάδιο | Πίεση (bar) | Θερμοκρασία (˚C) | P (kW) | $P_{losses}$(kW) | Απόδοση |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 200 – 110 | 220 – 177,8 | 11,96 | 2,086 | 0,86 |
| 2 | 110 – 80 | 177,8 – 132,05 | 6,01 | 1,047 | 0,86 |
| 3 | 80 – 34 | 132,05 – 77,3 | 13,67 | 2,381 | 0,86 |
| 4 | 34 – 11 | 220 – 121,8 | 21,14 | 2,686 | 0,86 |
| 5 | 11 – 6 | 121,8 – 64,1 | 11,04 | 1,925 | 0,86 |
| 6 | 6 – 1 | 220 – 70,6 | 25,62 | 4,466 | 0,86 |

**Πίνακας 4.1:** Τεχνικά χαρακτηριστικά της τουρμπίνας

Πρώτο βήμα για τη διαστασιολόγηση του συστήματος, είναι ο καθορισμός της αυτονομίας. Αρχικά, πρέπει να βρεθεί ο μήνας, που τα φωτοβολταϊκά θα αποδώσουν τη μικρότερη ενέργεια. Αυτό θα γίνει με τη βοήθεια του λογισμικού Photovoltaic Geographical Information System ή απλά PVGIS.




**Εικόνα 4.2:** Μηνιαία παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκών εγκατεστημένης ισχύος 300 kWp, στην τοποθεσία της Ρόδου για ένα τυπικό έτος [36].

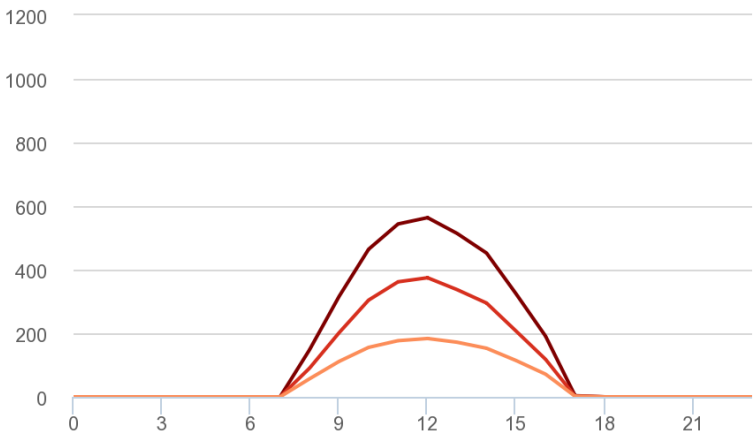
Από την εικόνα 4.2, προκύπτει ότι ο μήνας με τη μικρότερη παραγωγή ενέργειας, είναι ο μήνας Ιανουάριος, με 27.300,15 kWh . Επίσης, σύμφωνα με το PVGIS, η βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών είναι 31º, ενώ η βέλτιστη αζιμούθια γωνία είναι 2º.

Επιπλέον, από το σύστημα PVGIS, βρίσκονται τα δεδομένα για την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας, καθώς και η παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών, αφού υπολογιστεί πρώτα η επιφάνεια τους σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{P\ [Wp] = A[m^2] \cdot 1000\ [W/m^2] \cdot \eta_R}$$

- P η εγκατεστημένη ισχύς
- 1000 $W/m^2$ η μέγιστη τιμή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης
- $\eta_R$ ο βαθμός απόδοσης, τυπική τιμή 0,75

Λύνοντας, ως προς την επιφάνεια, για 300 kWp και βαθμό απόδοσης 0,75, υπολογίζεται $\mathbf{A = 400\ m^2}$.




**Εικόνα 4.3:** Μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας στην τοποθεσία της Ρόδου [36].

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθούν αναλυτικά οι τιμές της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας, καθώς και η ισχύς που αποδίδουν τα φωτοβολταϊκά.

| **Ώρα** | **Πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας** | **Ισχύς που αποδίδουν τα φωτοβολταϊκά επιφάνειας 400 $m^2$** |
|---|---|---|
| 08:00 | 148,22 $W/m^2$ | 59,288 kW |
| 09:00 | 315,74 $W/m^2$ | 126,296 kW |
| 10:00 | 464,04 $W/m^2$ | 185,616 kW |
| 11:00 | 543,67 $W/m^2$ | 217,468 kW |
| 12:00 | 563,51 $W/m^2$ | 225,404 kW |
| 13:00 | 513,89 $W/m^2$ | 205,556 kW |
| 14:00 | 452 $W/m^2$ | 180,8 kW |
| 15:00 | 323,85 $W/m^2$ | 129,54 kW |
| 16:00 | 190,72 $W/m^2$ | 76,288 kW |
| 17:00 | 3,52 $W/m^2$ | 1,408 kW |

**Πίνακας 4.2:** Μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας και μέση παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών 300 kWp, για μία τυπική ημέρα του Ιανουαρίου, στην τοποθεσία της Ρόδου [36].

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, το σύστημα μπορεί να καλύψει την εγγυημένη ισχύ που απαιτείται και να τροφοδοτήσει, ανάλογα την ώρα της ημέρας, έναν ή δύο ηλεκτρικούς συμπιεστές.

Έπειτα, από τα ελεύθερα δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ), συλλέγονται δεδομένα για τις συνεχόμενες ημέρες πλήρους συννεφιάς. Η συννεφιά δίνεται ανά τρεις ώρες και μετριέται σε okta, μία μονάδα μέτρησης που ορίζεται ως εξής: ένα στιγμιότυπο του ουρανό για το υπό μελέτη χρονικό διάστημα, χωρίζεται σε οκτώ τμήματα και ανάλογα πόσα όγδοα είναι καλυμμένα με πλήρη συννεφιά, τόσα okta συννεφιάς έχει εκείνο το χρονικό διάστημα [37]. Επιλέγεται να οριστεί μια ημέρα του Ιανουαρίου ότι έχει πλήρη συννεφιά, αν και για τα τρία τρίωρα που είναι ορατός ο ηλιακός δίσκος, η συννεφιά είναι τουλάχιστον 7 okta. Σύμφωνα με τα ελεύθερα δεδομένα της ΕΜΥ [38], στη Ρόδο, το μήνα Ιανουάριο, οι συνεχόμενες ημέρες πλήρους συννεφιάς είναι 2. Άρα, για να είναι η λειτουργία του συστήματος εξασφαλισμένη με κάποιο περιθώριο ασφαλείας, ζητείται αυτονομία 3 ημερών. Έτσι, η χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης θα είναι με βάση την σχέση (4.1):

$$\mathbf{C_N = (3\ ημέρες\ αυτονομίας) \cdot P_{load} \cdot 24\ h = 3{,}6\ MWh}$$

Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί ο όγκος του αέρα που πρέπει να αποθηκευτεί στη δεξαμενή, ώστε να καλυφθεί το φορτίο. Με χρήση της σχέσης (4.8) υπολογίζεται:

$$\mathbf{V_b} = \frac{W\cdot(\gamma-1)}{Pb-Pa\cdot\sqrt[\gamma]{Pb/Pa}} = \frac{3{,}6\ MWh\cdot(7/5-1)}{20000000-100000\cdot\sqrt[7/5]{\frac{20000000}{100000}}} = \mathbf{332{,}34\ m^3}$$

Επειδή η πίεση στη δεξαμενή δεν πρέπει να πέσει κάτω από τα 30-40 bar, καθώς θα έθετε σε μεγάλη καταπόνηση τα μέταλλα, θα επιλεχθεί λίγο μεγαλύτερη δεξαμενή, στα $\mathbf{350\ m^3}$.

Για τον σχεδιασμό της θερμικής μονάδας αποθήκευσης, χρησιμοποιείται ο τύπος: $\mathbf{P_a \cdot V_a^{\gamma} = P_b \cdot V_b^{\gamma}}$. Εφόσον, η αρχική πίεση του αέρα είναι η ατμοσφαιρική, ο όγκος του πριν την συμπίεση είναι $\mathbf{V_a = 14.628\ m^3}$. Επίσης, η αρχική θερμοκρασία του αέρα είναι **14 ˚C**, άρα με βάση τη σχέση (4.9), υπολογίζεται η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να αποθηκευτεί ο αέρας στην δεξαμενή:

$$\mathbf{\theta_b} = \frac{Pb\cdot \mathbf{Vb}}{Pa\cdot Va}\cdot \mathbf{\theta_a} = \frac{\mathbf{20\cdot\ 332{,}34}}{\mathbf{0{,}1\cdot\ 14.628}}\cdot \mathbf{14\ ^{\circ}C = 64\ ^{\circ}C}$$

Όμως, στην έξοδο των συμπιεστών, ο αέρας έχει θερμοκρασία **270 ˚C**. Άρα με τη χρήση του διαθερμικού λαδιού, θα ελαττωθεί η θερμοκρασία του στους **64 ˚C**. Θεωρώντας εναλλάκτες, οι οποίοι δεν έχουν απώλειες θερμότητας, άρα $\mathbf{\dot{Q}_{air} = \dot{Q}_{oil}}$, με βάση τις εξισώσεις (4.10), (4.11) και (4.12), λαμβάνοντας υπόψιν ότι το διαθερμικό λάδι θα αποθηκευτεί στους **240 ˚C**, υπολογίζεται η θερμότητα του αέρα, η θερμότητα που αποθηκεύεται στο διαθερμικό λάδι και η ροή μάζας του λαδιού:

$$\mathbf{\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air}\cdot c_{p,air}\cdot \Delta\theta_{air} = (0{,}103\ kg/s)\ (0{,}2\ kcal/kg^{\circ}C)\ (4{,}18\ kJ/kcal)\ (270-64)\ ^{\circ}C}$$

$$= \mathbf{17{,}73\ kW}$$

$$\mathbf{\dot{Q}_{oil} = \dot{m}_{oil}\cdot c_{p,oil}\cdot \Delta\theta_{oil} <=> \dot{m}_{oil} = \frac{Qoil}{cpoil\cdot\Delta\theta oil} = \frac{17.73}{2{,}08\cdot(240-14)} = 0{,}038\ kg/s}$$

Τέλος, πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί για την απόδοση της μονάδας αποθήκευσης. Αυτή ορίζεται ως το πηλίκο της κατανάλωσης των συμπιεστών κατά το γέμισμα της δεξαμενής, προς την παραγωγή ενέργειας των τουρμπινών όταν βρίσκονται σε λειτουργία. Με βάση τους τύπους (4.12), (4.13) υπολογίζονται οι χρόνοι φόρτισης και εκφόρτισης της μονάδας αποθήκευσης:

$$\mathbf{t_{compression}} = \frac{Vb\cdot 1000\ [\frac{lt}{m3}]}{n\cdot(\dot{m}/\rho)\cdot l\cdot 3600\ s} = \frac{350\ \cdot 1000\ [\frac{lt}{m3}]}{3\cdot 5\ [\frac{lt}{m3}]\cdot 309\ [\frac{Nm3}{h}]} = \mathbf{75{,}51\ h}$$

Άρα η κατανάλωση των συμπιεστών θα είναι: $\mathbf{3\cdot 75\ kW\cdot 75{,}51\ h = 16{,}99\ MWh}$

$$\mathbf{t_{expansion}} = \frac{Vb\prime\cdot 1000\ [\frac{lt}{m3}]}{(\dot{m}/\rho)\cdot l\cdot 3600\ s} = \frac{332{,}34\ m3\cdot 1000\ [\frac{lt}{m3}]}{5\ [lt/m3]\cdot 540\ [\frac{Nm3}{h}]} = \mathbf{123{,}1\ h}$$

Άρα η κατανάλωση των τουρμπινών θα είναι: $\mathbf{(89{,}44\ kW - 14{,}591\ kW)\cdot 123{,}1\ h = 9{,}21\ MWh}$.

Τελικά η απόδοση της μονάδας αποθήκευσης θα είναι:

$$\boldsymbol{\eta_{caes} = \frac{9{,}21\ MWh}{16{,}99\ MWh} \cdot 100\% = 54{,}23\%}$$

Τέλος, πρέπει να υπολογιστεί πόσο διαθερμικό λάδι θα χρειαστεί για την ψύξη και την θέρμανση του αέρα. Η αναλογία λαδιού / αέρα στους εναλλάκτες είναι:

$$\boldsymbol{\frac{0{,}038\ kg/s}{0{,}103\frac{kg}{s}/1{,}2\ \mathrm{kg/m3}} = 0{,}442}$$

Άρα συνολική παροχή λαδιού θα είναι:

$$\boldsymbol{0{,}442\frac{kg\ (oil)}{m3\ (air)} \cdot 3\ \text{συμπιεστές} \cdot 3\ \text{στάδια} \cdot \text{συμπίεσης} \cdot 1{,}2\ \mathrm{kg/m^3} \cdot 309\ \mathrm{Nm^3/h} = 1.477\ \mathrm{kg_{(oil)}/h}}$$

Οι συμπιεστές λειτουργούν για 75,71 h, άρα απαιτούνται **111.857 kg** (διαθερμικού λαδιού).

## 4.5 Συμπέρασμα

Η αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα με τη χρήση A – CAES είναι εφικτή θεωρητικά, ωστόσο ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης ενός συστήματος που κάνει χρήση συσσωρευτών (πχ ιόντων λιθίου), με αποτέλεσμα να μην μπορεί να το ανταγωνιστεί σε απόδοση. Ωστόσο, στο επόμενο κεφάλαιο θα αποδειχθεί, ότι το μοντέλο του A – CAES αυτού του κεφαλαίου, μπορεί να αναβαθμιστεί, ώστε να έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, συγκρίσιμο ή και μεγαλύτερο από άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ CAES ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

## 5.1 Εισαγωγή

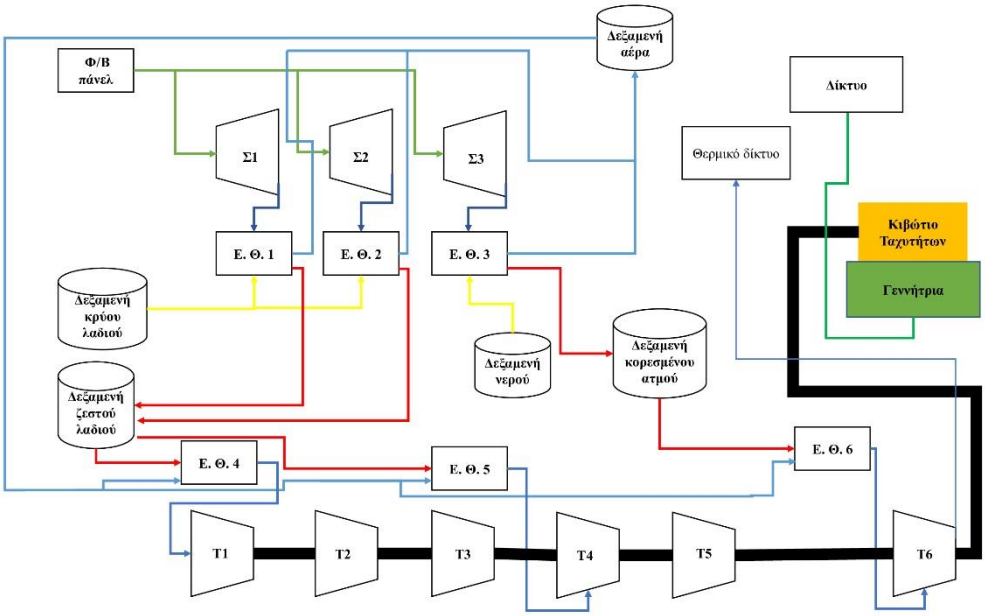
Με βαθμό απόδοσης περίπου 60%, και αρκετά υψηλό αρχικό κόστος, οι αδιαβατικοί σταθμοί αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage ή CAES), αν και μοιάζουν μία καλή λύση για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση, είναι οικονομικά ασύμφοροι. Επομένως, πρέπει το σύστημα να βελτιωθεί, ώστε να ανέβει ο βαθμός απόδοσης, άρα να μειωθεί το κόστος ανά kWh. Επειδή οι ηλεκτρικοί συμπιεστές, σε μεγάλες τιμές πίεσης ειδικότερα, έχουν πολύ μικρό συντελεστή ηλεκτρικής απόδοσης (ενδεικτικά 20-22%)[41], παρατηρούνται πολλές απώλειες σε θερμότητα. Επομένως, για την αύξηση του βαθμού απόδοσης, στα αδιαβατικά CAES, έγινε χρήση διαθερμικού λαδιού για την απαγωγή της θερμότητας από τους συμπιεστές και τη χρησιμοποίησή της στην διατήρησης της θερμοκρασίας του αέρα κατά την αποσυμπίεση σε υψηλά επίπεδα. Αυτό και άλλες καινοτομίες, όπως η προσθήκη υπέρβαρου ατμού στο τελευταίο στάδιο της τουρμπίνας αποσυμπίεσης, αύξησε αισθητά το βαθμό απόδοσης ολόκληρης της μονάδας, όπως φάνηκε στις προηγούμενες ενότητες. Σε τούτο το κεφάλαιο, θα μελετηθεί ο συνδυασμός της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά με ταυτόχρονη θερμική εκμετάλλευση (Renewable Energy Sources Combined Heat and Power ή RESCHP). Αυτή η λύση μπορεί να αυξήσει το βαθμό απόδοσης και να ελαττώσει το κόστος της μονάδας ανά kWh. Οι τεχνικές λεπτομέρειες δόθηκαν από τον Δρ.-Μηχανικό κ. Πήττα, ο οποίος έχει σχεδιάσει και πατεντάρει το σύστημα αυτό.

## 5.2 Περιγραφή του συστήματος RESCHP

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνάται η διαστασιολόγηση ενός RESCHP συστήματος μεγάλης κλίμακας, το οποίο θα μπορούσε να προσδώσει ενεργειακή αυτονομία σε ένα ελληνικό νησί μετρίου μεγέθους. Το σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά με εγκατεστημένη ισχύ 300 kWp και σύστημα CAES 110 kW και 3,6 MWh. Επίσης, γίνεται υπόθεση ότι είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο, ώστε να παρέχει εγγυημένη ισχύ 50 kW. Στις περιόδους περίσσειας ενέργειας, δηλαδή όταν η παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι μεγαλύτερη της ζητούμενης εγγυημένης ισχύος, η περίσσεια χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικούς κινητήρες, συζευγμένους με ηλεκτρικούς συμπιεστές. Οι ηλεκτρικοί συμπιεστές αυξάνουν την πίεση του ατμοσφαιρικό αέρα, στα 200 bar. Η συμπίεση είναι ισόθερμη, ώστε αρκετή από τη θερμότητα του αέρα να αποθηκεύεται σε ψυκτικό μέσο, συγκεκριμένα διαθερμικό λάδι και νερό σε χωριστά κυκλώματα, ώστε να χρησιμοποιηθεί αργότερα. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η πολυτροπική απόδοση των συμπιεστών, δηλαδή η ηλεκτρική και η θερμική απόδοση μαζί. Στη συνέχεια, το θερμό διαθερμικό λάδι και το νερό σε μορφή θερμού ατμού, αποθηκεύονται σε θερμικά μονωμένες δεξαμενές. Ο συμπιεσμένος αέρας θα αποθηκεύεται σε ειδική δεξαμενή κατασκευασμένη από ατσάλινους σωλήνες.

Η κατασκευή πρέπει να είναι αρκετά σθεναρή, ώστε να αντέχει την υψηλή πίεση του αέρα.

Στις περιόδους υψηλής ζήτησης, ο αποθηκευμένος συμπιεσμένος αέρας οδηγείται σε τουρμπίνα έξι σταδίων αποσυμπίεσης. Για να μην κρυσταλλώσουν και καταστραφούν τα πτερύγια από την χαμηλή θερμοκρασία του αέρα κατά την αποσυμπίεση, είναι αναγκαίο ο αέρας να προθερμαθεί, τρεις φορές: στο πρώτο, στο τέταρτο και έκτο στάδιο. Στο πρώτο και στο τέταρτο θα γίνει χρήση του θερμού λαδιού για την αναθέρμανσή του αέρα. Στο τελευταίο στάδιο θα γίνει εισαγωγή ατμού στο θάλαμο της τουρμπίνας, ο οποίος θα θερμάνει τον συμπιεσμένο αέρα και παράλληλα θα αυξήσει και τη παροχή μάζας, καθώς πλέον στο θάλαμο υπάρχει μείγμα αέρα και ατμού. Επίσης, επιβάλλεται κατά την εκφόρτιση, η δεξαμενή να μην αδειάζει εντελώς, καθώς πρέπει πάντοτε να έχει πίεση τουλάχιστον 30 με 40 bar, ώστε να μην καταπονούνται τα μεταλλικά μέρη της κατασκευής. Τέλος, στην έξοδο του έκτου σταδίου τα προϊόντα είναι θερμός αέρας και νερό, με θερμοκρασία περίπου 65-70 ºC. Τα προϊόντα αυτά, μπορούν να εισέλθουν στο θερμικό δίκτυο της περιοχής και να συμβάλλουν στη θέρμανση εσωτερικών χώρων, το χειμώνα, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη συνολική απόδοση του συστήματος. Παρακάτω, ακολουθεί το διάγραμμα του συστήματος, η λειτουργία του οποίου αναλύθηκε παραπάνω:




**Εικόνα 5.1:** Διάγραμμα ροής RESCHP (παράχωρηση Νικόλαου Πήττα)

| | | |
|---|---|---|
| → | Συμπιεσμένος αέρας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος | $T_{air} = T_{atm}$ |
| → | Συμπιεσμένος αέρας σε υψηλή θερμοκρασία | $T_{air} = 270$ ˚C |
| → | Κρύο λάδι και νερό | $T_{c,oil} = T_{atm}$, $T_{c,water} = T_{atm}$ |
| → | Ζεστό λάδι και κορεσμένος ατμός | $T_{h,oil} = T_{saturated,steam} = 240$ ˚C |
| → | Ισχύς από τα φωτοβολταϊκά | - |
| → | Παρεχόμενη ισχύς στο δίκτυο | - |
| $\Sigma_1 - \Sigma_3$ | Ηλεκτρικοί συμπιεστές | $P_{compressor} = 75$ kW |
| Ε.Θ.$_1$ – Ε.Θ.3 | Εναλλάκτες θερμότητας για την ψύξη του συμπιεσμένου αέρα | $T_{air,in} = 270$ ˚C, $T_{air,out} = T_{atm}$, $T_{c,oil}$ ή $T_{c,water} = T_{atm}$, $T_{h,oil} = T_{saturated,steam} = 240$ ˚C |
| Ε.Θ.4 – Ε.Θ.6 | Εναλλάκτες θερμότητας για την αναθέρμανση του αέρα | $T_{air,in} = T_{atm}$, $T_{air,out} = 220$ ˚C , $T_{h,oil} = T_{saturated,steam} = 240$ ˚C, $T_{c,oil} = T_{c,water} = T_{atm}$ |
| $T_1 - T_6$ | Τουρμπίνες | $P_{output} = 110{,}82$ kW |

## 5.3 Μεθοδολογία διαστασιολόγησης RESCHP για την εξασφάλιση αυτονομίας σε νησί

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την εγκατάσταση μιας μονάδας RESCHP σε νησί, ώστε φωτοβολταϊκά με συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύ, $\mathbf{P_{peak}}$, να είναι σε θέση να παρέχουν εγγυημένη ισχύ $\mathbf{P_{load}}$, στο δίκτυο. Θα αποδειχθεί ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει όλο το χρόνο, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη ισχύ σε 24ωρη βάση.

### 5.3.1 Κλιματικά δεδομένα και παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκών

Αρχικά, πρέπει να βρεθεί ο μήνας με τη μικρότερη μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Αυτός ο μήνας, είναι ο μήνας όπου το σύστημα θα λειτουργήσει στα όριά του, αφού το σύστημα πρέπει να συνεχίσει να παρέχει εγγυημένη ισχύ με το ελάχιστο ηλιακό δυναμικό. Αν το RESCHP, μπορεί να ανταποκριθεί στις συνθήκες του συγκεκριμένου μήνα, τότε λογικά θα μπορεί να ανταποκριθεί και το υπόλοιπο έτος. Αν μετά από προσομοίωση σε βάθος έτους, το σύστημα ικανοποιεί την απαίτηση εγγυημένης ισχύος, τότε θα έχει αποδειχθεί ότι η διαστασιολόγησή του είναι ικανοποιητική.

Τα δεδομένα για την πυκνότητα ηλιακής ενέργειας, θα ληφθούν από το λογισμικό Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [36].

Στη συνέχεια, για το συγκεκριμένο μήνα με τη μικρότερη μηνιαία παραγωγή ενέργειας, υπολογίζονται οι ημέρες αυτονομίας που απαιτούνται. Για την εξασφάλιση της αυτονομίας, πρέπει να υπάρχει γνώση των κλιματικών συνθηκών της περιοχής εγκατάστασης. Τα ελεύθερα δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) [38], παρέχουν τα κατάλληλα δεδομένα, ώστε να καθοριστούν οι συνεχόμενες ημέρες πλήρους συννεφιάς και κατ’ επέκταση, οι ημέρες αυτονομίας του συστήματος. Οι αριθμός ημερών αυτονομίας επιλέγεται ως ο αριθμός ημερών πλήρους συννεφιάς για αυτό το μήνα, συν μία ημέρα ακόμα.

Τέλος, για μία τυπική ημέρα του συγκεκριμένου μήνα, θα γίνει άντληση δεδομένων από το PVGIS, προκειμένου να βρεθεί η μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας, προκειμένου να υπολογιστεί η παραγωγή ενέργειας. Εάν η παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών, μπορεί να καλύψει το φορτίο και παράλληλα να τροφοδοτήσει τους ηλεκτρικούς συμπιεστές, δηλαδή να υπάρχει επαρκής περίσσεια ενέργειας, ώστε να μπορεί να καλύψει την εγγυημένη ισχύ και την ονομαστική ισχύ τουλάχιστον ενός ηλεκτρικού συμπιεστή, τότε το σύστημα θα είναι εφικτό.

### 5.3.2 Διαστασιολόγηση της δεξαμενής, των συμπιεστών και της τουρμπίνας

Πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός της χωρητικότητας της δεξαμενής. Η δεξαμενή πρέπει να χωρά αρκετό συμπιεσμένο αέρα για να καλύψει το φορτίο για τις ημέρες αυτονομίας, και να υπάρχει και απόθεμα, ώστε η πίεση της δεξαμενής να μην πέσει ποτέ κάτω από τα 30 με 40 bar, όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η ενέργεια που θα αποθηκευτεί είναι δεδομένη και ίση με $\mathbf{C_N}$. Επειδή η μεταβολή είναι ισόθερμη, κατά την αποθήκευση ενέργειας, ισχύει ο τύπος:

$$\mathbf{C_N} = \int \boldsymbol{P} \cdot \boldsymbol{dV} \tag{5.1}$$

Λύνοντας το ολοκλήρωμα υπό σταθερή θερμοκρασία, προκύπτει:

$$\mathbf{C_N} = \int_{V1}^{V2} \frac{nRT}{V}\, \boldsymbol{dV} = \mathbf{n \cdot R \cdot T} \int_{V1}^{V2} \frac{1}{V} \cdot \boldsymbol{dV} = \mathbf{P_2 \cdot V_2 \cdot \ln\left(\frac{P1}{P2}\right)}$$

Τελικά, επειδή η πίεση έξω από την δεξαμενή είναι σταθερή, προστίθεται ένας ακόμη όρος: $\mathbf{V_2 \cdot (P_2 - P_1)}$

Τελικά:

$$\mathbf{C_N = P_2 \cdot V_2 \cdot \ln\left(\frac{P1}{P2}\right) + V_2 \cdot (P_2 - P_1)} \tag{5.2}$$

όπου:

- $\mathbf{C_N}$: η ενέργεια που αποθηκεύεται στη δεξαμενή (MWh)
- $\mathbf{P_1}$: η ατμοσφαιρική πίεση (1 MPa)
- $\mathbf{P_2}$: η πίεση στη δεξαμενή (20 MPa)
- $\mathbf{V_1}$: ο όγκος του αέρα που θα συμπιεστεί ($m^3$)
- $\mathbf{V_2}$: ο όγκος της δεξαμενής ($m^3$)

Τελικά, λύνοντας ως προς $\mathbf{V_2}$:

$$\mathbf{V_2} = \frac{\boldsymbol{Cn}}{\boldsymbol{P2} \cdot \ln\left(\frac{\mathbf{P1}}{\mathbf{P2}}\right) + (\boldsymbol{P2} - \boldsymbol{P1})} \tag{5.3}$$

Επόμενο βήμα για τη διαστασιολόγηση της μονάδας, είναι η επιλογή των κατάλληλων φυγοκεντρικών ηλεκτρικών συμπιεστών, τριών σταδίων συμπίεσης. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον δύο, καθώς ο ένας πρέπει να ψύχεται με νερό, για την παραγωγή κορεσμένου ατμού. Επίσης, η συνολική ισχύς που καταναλώνουν οι συμπιεστές $\mathbf{P_c}$, δεν πρέπει να ξεπεράσει το όριο της εγκατεστημένης ισχύος $\mathbf{P_{peak}}$. Τέλος, η παροχή αέρα των συμπιεστών είναι $\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{air,c}}$.

Ακολούθως, πρέπει να γίνει επιλογή της κατάλληλης τουρμπίνας. Η τουρμπίνα θα αποσυμπιέζει τον αέρα σε έξι στάδια, όπου ειδικά στην είσοδο του πρώτου και του τέταρτου σταδίου ο αέρας να προθερμαίνεται από καυτό διαθερμικό λάδι, μέσω εναλλακτών θερμότητας. Στο έκτο στάδιο, ο αέρας θα προθερμαίνεται και πάλι με τη βοήθεια λαδιού, ωστόσο θα γίνεται έγχυση κορεσμένου ατμού θερμοκρασίας 220 ˚C. Το μείγμα κορεσμένου ατμού και αέρα προκαλεί μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος στο έκτο στάδιο αποσυμπίεσης. Η συνολική ισχύς που παράγεται από την έξοδο κάθε σταδίου είναι $\mathbf{P_t}$, ενώ οι απώλειες είναι $\mathbf{P_{loss}}$. Η ωφέλιμη ισχύς $\mathbf{P_t - P_{loss}}$, πρέπει να είναι επαρκώς μεγαλύτερη για την διασφάλιση της κανονικής λειτουργίας του συστήματος. Η παροχή αέρα στις τουρμπίνες $\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{air,t}}$ είναι ρυθμιζόμενη, με αποτέλεσμα να είναι εφικτός ο έλεγχος παραγωγής ισχύος.

### 5.3.3 Υπολογισμός ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης

Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος θα είναι το πηλίκο της ηλεκτρικής κατανάλωσης των συμπιεστών με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των τουρμπινών. Έτσι, πρέπει να γίνουν υπολογισμοί για την κατανάλωση των συμπιεστών και την παραγωγή ενέργειας της τουρμπίνας. Αλλά, για να γίνει αυτό πρέπει να υπολογιστεί ο χρόνος λειτουργίας των συμπιεστών και ο χρόνος λειτουργίας των τουρμπινών.

Ο χρόνος λειτουργίας των συμπιεστών ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{t_{compression}} = \frac{\mathbf{V \cdot 1000}\ (\frac{\mathbf{lt}}{\mathbf{m3}})}{\mathbf{5}\ (\frac{\mathbf{lt}}{\mathbf{m3}}) \cdot \mathbf{k} \cdot \dot{\mathbf{m}} / \boldsymbol{\rho}} \qquad (5.4)$$

όπου:

- **V** ο όγκος της δεξαμενής σε $m^3$
- **k** ο αριθμός των συμπιεστών που βρίσκονται σε λειτουργία
- $\dot{\mathbf{m}} = \dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{air,c}}$ η παροχή αέρα των συμπιεστών σε $Nm^3/h$
- **ρ** η πυκνότητα του αέρα

Σημειώνεται ότι ο αέρας 1 $m^3$ ατμοσφαιρικού αέρα στα 200 bar, καταλαμβάνει 5 λίτρα.

Αντίστοιχα για τις τουρμπίνες:

$$\mathbf{t_{expansion}} = \frac{\mathbf{V \cdot 1000}\ (\frac{\mathbf{lt}}{\mathbf{m3}})}{\mathbf{5}\ (\frac{\mathbf{lt}}{\mathbf{m3}}) \cdot \dot{m} / \boldsymbol{\rho}} \qquad (5.5)$$

- **V** ο όγκος της δεξαμενής σε $m^3$
- $\dot{\mathbf{m}} = \dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{air,t}}$ η παροχή αέρα στις τουρμπίνες σε $Nm^3/h$
- **ρ** η πυκνότητα του αέρα

Η κατανάλωση των συμπιεστών είναι:

$$\mathbf{E_c = P_c \cdot k \cdot t_{compression}} \qquad (5.6)$$

Και τέλος, η παραγωγή ενέργειας από τις τουρμπίνες είναι:

$$E_t = (P_t - P_{loss}) \cdot t_{expansion} \quad (5.7)$$

Τελικά, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι το πηλίκο:

$$\eta_{el} = \frac{Ec}{Et} \quad (5.8)$$

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, έχει υπολογιστεί θεωρητικά από το σχεδιαστή του συστήματος RESCHP ότι φτάνει το 85%.

### 5.3.4 Θερμικά μεγέθη και τελικός βαθμός απόδοσης

Για τον συνολικό βαθμό απόδοσης πρέπει να ληφθεί υπόψιν η θερμική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση εσωτερικών χώρων το χειμώνα, από τα προϊόντα στην έξοδο του έκτου σταδίου. Έστω $T_{out}$, η θερμοκρασία του ζεστού νερού και του αέρα στην έξοδο του έκτου σταδίου και έστω ότι το χειμώνα προτείνεται η θερμοκρασία των εσωτερικών χώρων να είναι 25 ºC. Έτσι, η ισχύς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση από το νερό και τον αέρα είναι:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air,t} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{out} - 25\ ºC) \quad (5.9)$$

$$\dot{Q}_{water} = \dot{m}_{water,t} \cdot c_{p,water} \cdot (T_{out} - 25\ ºC) \quad (5.10)$$

Άρα, τελικά η συνολική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση είναι

$$Q = (\dot{Q}_{water} + \dot{Q}_{air}) \cdot t_{expansion} \quad (5.11)$$

Επομένως, ο συνολικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{total} = \frac{Et+Q}{Ec} \quad (5.12)$$

Τελευταίο βήμα για το σχεδιασμό του συστήματος είναι ο υπολογισμός της ποσότητας λαδιού και νερού που θα χρησιμοποιηθούν για την ψύξη του αέρα. Έστω εναλλάκτες, που μπορούν να απορροφήσουν χωρίς απώλειες τη θερμότητα από το θερμό σώμα και να τη μεταφέρουν στο ψυχρό. Έστω ότι η θερμοκρασία του αέρα κατά τη συμπίεση φτάνει τους 270 ºC και το νερό αποθηκεύεται σε θερμοκρασία 240 ºC.

Αρχικά, υπολογίζεται η αναλογία αέρα και νερού με τον εξής τρόπο:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air,c} \cdot c_{p,air} \cdot (270\ ºC - T_{atm}) \quad (5.13)$$

$$\dot{Q}_{water} = \dot{m}_{water,a} \cdot c_{p,water} \cdot (240\ ºC - T_{atm}) \quad (5.14)$$

Επειδή, ολόκληρη η θερμότητα του αέρα, μεταφέρεται στο νερό, ισχύει:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{Q}_{water}$$

Άρα, διαιρώντας κατά μέλη υπολογίζεται η αναλογία ροής μάζας αέρα και νερού.

$$\dot{m}_{water,a} / \dot{m}_{air,c} = c_{p,air} \cdot (270\ ºC - T_{atm}) / c_{p,water} \cdot (240\ ºC - T_{atm}) \quad (5.15)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ωριαία παροχή νερού στους εναλλάκτες:

$$\dot{m}_{water} = (\dot{m}_{water,a} / \dot{m}_{air,c}) \cdot \rho_{air} \cdot (\text{compression stages}) \cdot k \cdot \dot{m}_{air,c} \quad (5.16)$$

Η συνολική μάζα νερού που απαιτείται για την ψύξη του αέρα είναι:

$$\mathbf{m_{water} = \dot{m}_{water} \cdot t_{compression}} \quad (5.17)$$

Για την αναλογία νερού και διαθερμικού λαδιού:

$$\mathbf{\dot{m}_{oil} / \dot{m}_{air} = (\dot{m}_{water,a} / \dot{m}_{air,c}) \cdot c_{p,oil}} \quad (5.18)$$

Άρα η ωριαία παροχή διαθερμικού λαδιού είναι:

$$\mathbf{\dot{m}_{oil} = (\dot{m}_{oil} / \dot{m}_{air}) \cdot \rho_{air} \cdot (compression\ stages) \cdot k \cdot \dot{m}_{air,c}} \quad (5.19)$$

Και τελικά, η συνολική μάζα λαδιού που απαιτείται είναι:

$$\mathbf{m_{oil} = \dot{m}_{oil} \cdot t_{compression}} \quad (5.20)$$

## 5.4 Εφαρμογή

Σε αυτή την παράγραφο ακολουθεί η εφαρμογή του RESCHP συστήματος, για το σύστημα της Ρόδου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως παράδειγμα και στα κεφάλαια 3 και 4.

### 5.4.1 Δεδομένα

Έστω ότι ζητείται σχεδιασμός αυτόνομου συστήματος φωτοβολταϊκών με εγκατεστημένη ισχύ $\mathbf{P_{peak} = 300\ kWp}$, στην τοποθεσία της Ρόδου, με συντεταγμένες **36,429865** και **28,208066**. Ζητείται εγγυημένη ισχύς από το δίκτυο $\mathbf{P_{load} = 50\ kW}$.

Η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών δίνεται από τον τύπο

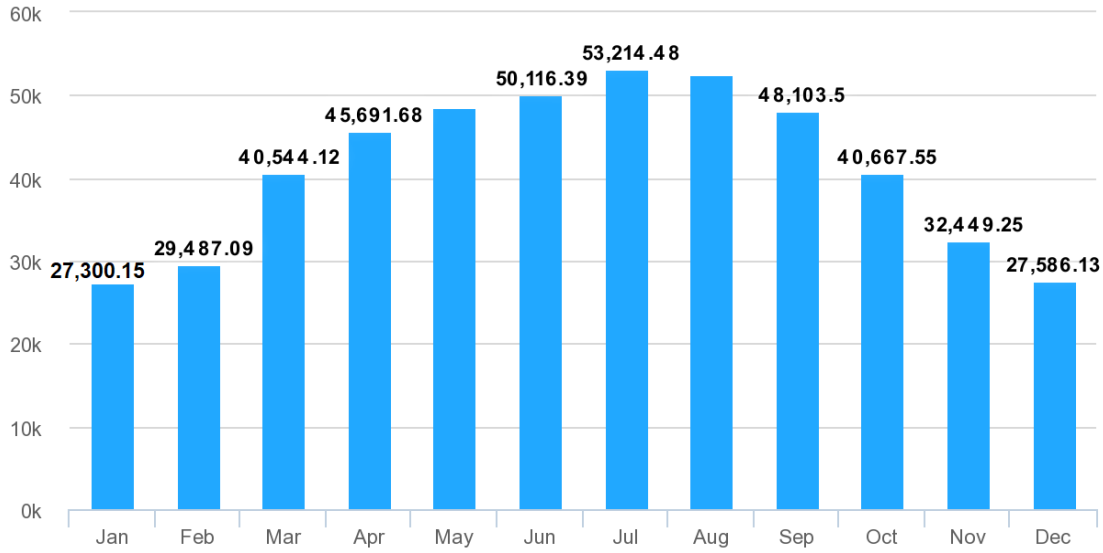
$$\mathbf{P\ [Wp] = A\ [m^2] \cdot 1000\ [W/m^2] \cdot \eta_R} \quad (5.21)$$

λύνοντας ως προς την επιφάνεια. Για βαθμό απόδοσης $\mathbf{\eta_R = 0,75}$, η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών που δίνονται είναι:

$$\mathbf{A = 400\ m^2}$$

### 5.4.2 Άντληση μετεωρολογικών δεδομένων και δεδομένων απόδοσης των φωτοβολταϊκών στην εν λόγω περιοχή

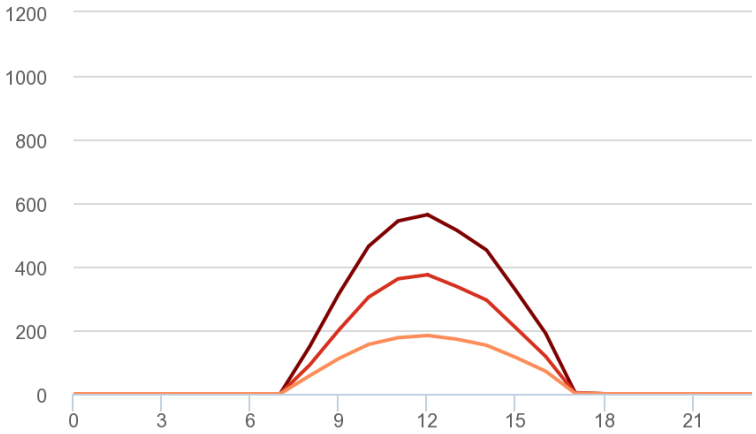
Αρχικά, πρέπει να βρεθεί ο μήνας με την μικρότερη παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Αυτό θα γίνει με τη βοήθεια του λογισμικού PVGIS.




**Εικόνα 5.2:** Μηνιαία παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκών εγκατεστημένης ισχύος 300 kWp, στην τοποθεσία της Ρόδου για ένα τυπικό έτος [36].

Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.2, ο μήνας που τα φωτοβολταϊκά παράγουν τη λιγότερη ενέργεια, είναι ο μήνας Ιανουάριος με **27.300,15 kWh**. Επιπλέον, η βέλτιστη γωνία είναι **31**°, ενώ η βέλτιστη αζιμούθια γωνία είναι **2**°, σύμφωνα με τους υπολογισμούς του PVGIS. Επομένως, τον Ιανουάριο, το σύστημα θα λειτουργήσει στα όριά του.

Στη συνέχεια, για μία τυπική ημέρα του Ιανουαρίου υπολογίζεται η μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος, με τη βοήθεια του PVGIS.




**Εικόνα 5.3:** Μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας στην τοποθεσία της Ρόδου [36].

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθούν αναλυτικά οι τιμές της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας, καθώς και η ισχύς που αποδίδουν τα φωτοβολταϊκά.

| **Ώρα** | **Πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας** | **Ισχύς που αποδίδουν τα φωτοβολταϊκά επιφάνειας 400 $m^2$** |
|---|---|---|
| 08:00 | 148,22 $W/m^2$ | 59,288 kW |
| 09:00 | 315,74 $W/m^2$ | 126,296 kW |
| 10:00 | 464,04 $W/m^2$ | 185,616 kW |
| 11:00 | 543,67 $W/m^2$ | 217,468 kW |
| 12:00 | 563,51 $W/m^2$ | 225,404 kW |
| 13:00 | 513,89 $W/m^2$ | 205,556 kW |
| 14:00 | 452 $W/m^2$ | 180,8 kW |
| 15:00 | 323,85 $W/m^2$ | 129,54 kW |
| 16:00 | 190,72 $W/m^2$ | 76,288 kW |
| 17:00 | 3,52 $W/m^2$ | 1,408 kW |

**Πίνακας 5.1:** Μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας και μέση παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών 300 kWp, για μία τυπική ημέρα του Ιανουαρίου, στην τοποθεσία της Ρόδου [36].

Από τον πίνακα 5.1, προκύπτει ότι η ημερήσια παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών είναι **1,407 MWh**. Το σύστημα καλύπτει εγγυημένη ισχύ **50 kW**, άρα φορτίο αντίστοιχο σε **50 kW · 24h = 1,2 MWh**. Άρα, θεωρητικά το σύστημα μπορεί να καλύψει το φορτίο τον Ιανουάριο, δηλαδή το μήνα με τη μεγαλύτερη πίεση στο σύστημα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τους υπόλοιπους μήνες για τη διασφάλιση της κανονικής λειτουργίας του συστήματος.

Τέλος, από τα ελεύθερα δεδομένα της ΕΜΥ, καθορίζεται η αυτονομία που πρέπει να έχει το σύστημα. Συγκεκριμένα, η ΕΜΥ δίνει στοιχεία για τη συννεφιά σε okta. Okta είναι μία μονάδα μέτρησης της συννεφιάς. Κάθε τρεις ώρες, γίνεται δειγματοληψία μίας εικόνας του ουρανού. Η εικόνα χωρίζεται σε οκτώ τμήματα και ανάλογα πόσα εκ των οκτώ τμημάτων του καρέ, καλύπτονται από σύννεφα, τόσα okta συννεφιάς αναλογούν την ώρα λήψης του καρέ. Το μήνα Ιανουάριο, ο μέγιστος αριθμός συνεχόμενων ημερών με τουλάχιστον 7 okta και τα τρία τρίωρα που είναι ορατός ο ηλιακός δίσκος, είναι 2. Άρα, ζητείται αυτονομία **3 ημερών**.

### 5.4.3 <u>Διαστασιολόγηση της δεξαμενής, των συμπιεστών και της τουρμπίνας</u>

Για να είναι αυτόνομο το σύστημα, πρέπει να μπορεί να αποδίδει την εγγυημένη ισχύ για διάστημα 2 ημερών. Άρα:

$$\mathbf{C_N = P_{load} \cdot 72\ h = 50\ kW \cdot 72\ h = 3{,}6\ MWh}$$

Από τις εξισώσεις (5.1), (5.2), (5.3), θα υπολογιστεί ο όγκος που πρέπει να έχει η δεξαμενή για την αποθήκευση 2,4 MWh. Από την εξίσωση (5.3) τελικά:

$$\mathbf{V_2 = \frac{Cn}{P2 \cdot \ln\left(\frac{P1}{P2}\right) + (P2 - P1)} = \frac{-3{,}6\ MWh}{20\ MPa \cdot \ln\left(\frac{0{,}1}{20}\right) + (20 - 0{,}1)MPa} = \frac{-12.960\ J}{-86{,}066\ J/m3} = 150.58\ m^3}$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επειδή η πίεση δεν πρέπει να πέσει κάτω από τα 30-40 bar, θα προστεθούν ακόμη 50 $m^3$. Η δεξαμενή, λοιπόν, θα είναι **200 $m^3$**.

Επόμενο η βήμα είναι η επιλογή κατάλληλων φυγοκεντρικών συμπιεστών, τριών σταδίων. Για εγκατεστημένη ισχύ **300 kWp**, και εγγυημένη ισχύ **50 kW**, επιλέγονται τρεις συμπιεστές, εκ των οποίων οι δύο θα ψύχονται με διαθερμικό λάδι

και ο τρίτος με νερό. Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά τους είναι ισχύς **75 kW** και παροχή αέρα **309 Nm$^3$/h**. Η επιλογή είναι τέτοια, ώστε στις περιόδους όπου τα φωτοβολταϊκά μπορούν να αποδώσουν την εγκατεστημένη ισχύ, να μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα και οι τρεις, ενώ παράλληλα να καλύπτεται το φορτίο.

Τέλος, ακολουθεί η επιλογή των τουρμπινών, οι οποίες είναι κατά παραγγελία και δεν βρίσκονται στο εμπόριο αυτή τη στιγμή. Στον παρακάτω πίνακα ακολουθούν τα στοιχεία για το κάθε στάδιο αποσυμπίεσης.

| **Στάδιο** | **$P_{in}$ (bar)** | **$P_{out}$ (bar)** | **$T_{in}$ (˚C)** | **$T_{out}$ (˚C)** | **P(kW)** | **$P_{loss}$ (kW)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ο | 200 | 110 | 220 | 170,8 | 11,96 | 2,086 |
| 2ο | 110 | 80 | 170,8 | 132,05 | 6,01 | 1,047 |
| 3ο | 80 | 34 | 132,05 | 77,3 | 13,67 | 2,384 |
| 4ο | 34 | 12 | 220 | 121,8 | 21,14 | 2,686 |
| 5ο | 12 | 6 | 121,8 | 64,1 | 11,04 | 1,925 |
| 6ο | 6 | 1 | 220 | 70,6 | 68,3 | 11,91 |

**Πίνακας 5.2:** Τεχνικά χαρακτηριστικά τουρμπίνας για κάθε στάδιο.

Η τουρμπίνα έχει παροχή αέρα $\dot{m}_{air,t}$ **= 0,18 kg/s**, ενώ στο έκτο στάδιο που γίνεται η έγχυση ατμού έχει παροχή **0,22 kg/s** (0,18 kg/s αέρα και 0,04 kg/s κορεσμένου ατμού). Τέλος, η ταχύτητα περιστροφής της είναι **50.000 rpm**. Η συνολική ισχύς εξόδου είναι **132,12 kW**, ενώ οι απώλειες **22,038 kW**. Έτσι, η ωφέλιμη ισχύς εξόδου είναι **110,082 kW**. Τονίζεται ότι η ισχύς εξόδου είναι ανάλογη της παροχής αέρα, με γραμμική σχέση μεταξύ τους. Έτσι, ρυθμίζοντας την παροχή αέρα, είναι εφικτό να παράγεται μικρότερη ισχύς, αλλά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος.

### 5.4.4 Υπολογισμός ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης

Για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης, πρέπει πρώτα να βρεθεί πόση ώρα είναι σε λειτουργία οι συμπιεστές κατά το γέμισμα της δεξαμενής και πόση ώρα λειτουργεί η τουρμπίνα κατά το άδειασμα της δεξαμενής. Αυτό θα γίνει μέσω των εξισώσεων 5.4 και 5.5 αντίστοιχα.

Ο χρόνος λειτουργίας των τριών συμπιεστών κατά το γέμισμα της δεξαμενής είναι:

$$\mathbf{t_{compression}} = \frac{\mathbf{V \cdot 1000\ (\frac{lt}{m3})}}{\mathbf{5\ (\frac{lt}{m3}) \cdot k \cdot \dot{m}}} = \frac{\mathbf{150\ [Nm3] \cdot 1000\ (\frac{lt}{m3})}}{\mathbf{5\ (\frac{lt}{m3}) \cdot 3 \cdot 309\ Nm3/h}} = \mathbf{32{,}36\ h}$$

Ο χρόνος λειτουργιάς των τουρμπινών κατά το άδειασμα της δεξαμενής είναι:

$$\mathbf{t_{expansion}} = \frac{\mathbf{V \cdot 1000\ (\frac{lt}{m3})}}{\mathbf{5\ (\frac{lt}{m3}) \cdot \dot{m}/\rho}} = \frac{\mathbf{150\ [Nm3] \cdot 1000\ (\frac{lt}{m3})}}{\mathbf{5\ (\frac{lt}{m3}) \cdot 0{,}18 \frac{kg}{s} \cdot 3600 \frac{h}{s} \cdot \frac{1}{1{,}225\ kg/m3}}} = \mathbf{56{,}71\ h}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η κατανάλωση των συμπιεστών και η παραγωγή ενέργειας των τουρμπινών από τις σχέσεις 5.6 και 5.7 αντίστοιχα:

$$\mathbf{E_c = 3 \cdot 75\ kW \cdot 32{,}36\ h = 7{,}281\ MWh}$$

και

$$\mathbf{E_t = (132{,}12\ kW - 22{,}038\ kW) \cdot 56{,}71\ h = 6{,}243\ MWh}$$

Τελικά από τη σχέση 5.8, υπολογίζεται ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, ο οποίος επαληθεύει το θεωρητικό υπολογισμό του σχεδιαστή του συστήματος:

$$\boldsymbol{\eta_{el} = \frac{6{,}243\ MWh}{7{,}281\ MWh} = 0{,}8574}$$

### 5.4.5 Θερμικά μεγέθη και τελικός βαθμός απόδοσης

Από τις σχέσεις 5.9 και 5.10, υπολογίζεται η ωφέλιμη θερμική ενέργεια από τα προϊόντα του έκτου σταδίου:

$$\mathbf{\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air,t} \cdot c_{p,air} \cdot (T_{out} - 25\ ^oC) =}$$

$$\mathbf{= 0{,}18\ [kg/s] \cdot 0{,}2\ [kcal/kg \cdot ^oC] \cdot 4{,}18\ [kJ/kcal] \cdot (70{,}6 - 25)\ [^oC]}$$

$$\mathbf{\dot{Q}_{air} = 6{,}86\ kW}$$

$$\mathbf{\dot{Q}_{water} = \dot{m}_{water,t} \cdot c_{p,water} \cdot (T_{out} - 25\ ^oC) =}$$

$$\mathbf{= 0{,}04\ [kg/s] \cdot 4{,}18\ [kJ/kg^oC] \cdot (70{,}6 - 25)\ [^oC] = 7{,}624\ kW}$$

Άρα, τελικά η συνολική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση είναι

$$\mathbf{\dot{Q} = (\dot{Q}_{water} + \dot{Q}_{air}) \cdot t_{expansion} = (7{,}624\ kWh + 6{,}862\ kWh) \cdot 56{,}71\ h = 0{,}823\ MWh}$$

Επομένως, ο συνολικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\boldsymbol{\eta_{total} = \frac{Et+Q}{Ec} = \frac{6{,}243\ MWh + 0{,}832\ MWh}{7{,}281\ MWh} = 0{,}97}$$

Πρέπει να σημειωθεί, ότι αυτός ο ιδιαίτερα σημαντικός συνολικός βαθμός απόδοσης (97%) επιτυγχάνεται όταν το πλήρες θερμικό φορτίο στην έξοδο του συστήματος αποτελεί εκμεταλλεύσιμη ποσότητα θερμότητας για την είσοδο ενός συστήματος τηλεθέρμανσης. Στη πραγματικότητα και αυτό το σύστημα θα έχει σημαντικές απώλειες, οι οποίες όμως θεωρείται ότι βρίσκονται εκτός του δικού μας συστήματος, οπότε δεν συνυπολογίζονται.

Τελευταίο βήμα για το σχεδιασμό του συστήματος είναι ο υπολογισμός της ποσότητας λαδιού και νερού που θα χρησιμοποιηθούν για την ψύξη του αέρα. Για τη μεταφορά θερμότητας κατά τη συμπίεση του αέρα, χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας μήκους 1,3 m και διαμέτρου 0,3 m. Επειδή απαιτείται ένας τέτοιος εναλλάκτης σε κάθε στάδιο συμπίεσης του αέρα και το σύστημα αποτελείται από τρεις συμπιεστές, τριών σταδίων συμπίεσης, απαιτούνται 9 εναλλάκτες θερμότητας. Αντίστοιχα, στο στάδιο της εκτόνωσης του αέρα, απαιτούνται δύο εναλλάκτες θερμότητας για κάθε στάδιο, όπου ο αέρας πρέπει να θερμανθεί, άρα τελικά απαιτούνται 6 εναλλάκτες με διαστάσεις 1,2 m μήκος και 0,5 m διάμετρο.

Αρχικά, υπολογίζεται η αναλογία αέρα και νερού με χρήση των εξισώσεων 5.13 και 5.14:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air,c} \cdot c_{p,air} \cdot (270\ ^oC - T_{atm}) =$$

$$= 309\ [Nm^3/h] \cdot \frac{1}{3600\ [s]} \cdot 1{,}225\ [kg/m^3] \cdot 0{,}2\ [kcal/kg^oC] \cdot 4{,}18\ [kJ/kcal] \cdot (270 - 14)\ [^oC] = 22{,}503\ kW$$

$$\dot{Q}_{water} = \dot{m}_{water,a} \cdot c_{p,water} \cdot (240\ ^oC - T_{atm}) =>$$

$$\dot{Q}_{water} = \dot{m}_{water,a} \cdot 4{,}18\ [kJ/kg^oC] \cdot (240 - 18)\ [^oC]$$

Επειδή, ολόκληρη η θερμότητα του αέρα, μεταφέρεται στο νερό, ισχύει:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{Q}_{water}$$

Τελικά, η παροχή του νερού στον εναλλάκτη πρέπει να είναι:

$$\dot{m}_{water,a} = \frac{22{,}503\ kW}{4{,}18\left[\frac{kJ}{kg^\circ C}\right] \cdot 222[^\circ C]} = 0{,}024\ kg/s$$

$$\dot{m}_{air,c} = \frac{309\frac{Nm3}{h} \cdot 1{,}225\ kg/m3}{3600\ s/h} = 0{,}105\ kg/s$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ωριαία παροχή νερού στους εναλλάκτες σύμφωνα με τη σχέση 5.16:

$$\dot{m}_{water} = \frac{0{,}024\frac{kg}{s}\ (\nu\varepsilon\rho\acute{o})}{0{,}105\frac{kg}{s}(\alpha\acute{e}\rho\alpha)} \cdot 1{,}225\ kg/m^3 \cdot (3\ \text{στάδια συμπίεσης}) \cdot (1\ \text{συμπιεστής}) \cdot 309\ Nm^3/h = 259{,}56\ kg/h$$

Η συνολική μάζα νερού που απαιτείται για την ψύξη του αέρα, με βάση την 5.17 είναι:

$$m_{water} = \dot{m}_{water} \cdot t_{compression} = 259{,}56\ kg/h \cdot 21{,}57\ h = 5.598{,}71\ kg$$

Για την αναλογία νερού και διαθερμικού λαδιού, προκύπτει από την 5.18:

$$\dot{m}_{oil} / \dot{m}_{air} = (\dot{m}_{water,a} / \dot{m}_{air,c}) \cdot c_{p,oil} = \frac{0{,}024\frac{kg}{s}\ (\nu\varepsilon\rho\acute{o})}{0{,}105\frac{kg}{s}(\alpha\acute{e}\rho\alpha)} \cdot 2{,}18 = 0{,}498$$

Άρα η ωριαία παροχή διαθερμικού λαδιού, σύμφωνα με την 5.19 είναι:

$$\dot{m}_{oil} = (\dot{m}_{oil} / \dot{m}_{air}) \cdot \rho_{air} \cdot (\text{compression stages}) \cdot k \cdot \dot{m}_{air,c} =$$

$$= 0{,}498 \cdot 1{,}225\ kg/m^3 \cdot (3\ \text{στάδια συμπίεσης}) \cdot (2\ \text{συμπιεστές}) \cdot 309\ Nm^3/h = 1.131{,}03\ kg/h$$

Και τελικά από την 5.20, η συνολική μάζα λαδιού που απαιτείται:

$$m_{oil} = \dot{m}_{oil} \cdot t_{compression} = 1.131{,}03\ kg/h \cdot 21{,}57\ h = 24.396{,}32\ kg$$

## 5.5 Συμπέρασμα

Το σύστημα της παραγράφου 5.4, με θεωρητικό συνολικό βαθμό απόδοσης να φτάνει το 97%, δείχνει ικανό από πλευράς απόδοσης να ανταγωνιστεί τα υπόλοιπα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, μεγάλης κλίμακας. Επίσης, μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις εγγυημένης ισχύος για το μήνα Ιανουάριο, κατά τον οποίο τα φωτοβολταϊκά παράγουν την ελάχιστη μέση μηνιαία ενέργεια. Αυτό σημαίνει, ότι το σύστημα είναι αξιόπιστο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, καθώς τους υπόλοιπους μήνες η μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας αυξάνεται, με αποτέλεσμα το σύστημα να λειτουργεί υπό ευνοϊκότερες συνθήκες. Πρέπει, βέβαια, να εξεταστεί και η ανταγωνιστικότητα του συστήματος σε οικονομικό επίπεδο. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση κόστους ανάμεσα στα συστήματα που εξετάστηκαν στα κεφάλαια 3, 4 και στο σύστημα που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, προκειμένου να καθοριστεί ποια είναι η οικονομικότερη επιλογή για αποθήκευση ενέργειας σε ένα μεσαίου μεγέθους ελληνικό νησί, όπως της Ρόδου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

## 6.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια, φάνηκε ότι ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με τη μορφή συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage ή CAES), μπορεί να ανταγωνιστεί συστήματα συσσωρευτών ως προς την απόδοση. Για τα τρία διαφορετικά συστήματα αποθήκευσης που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 3, 4 και 5, θα ακολουθήσει οικονομική ανάλυση, ώστε να εξεταστεί ποιο σύστημα υπερτερεί οικονομικά. Για να γίνει αυτό πρέπει να γίνει προσέγγιση του κόστους κάθε στοιχείου που θα χρειαστεί για την υλοποίηση του εκάστοτε συστήματος. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου, είναι να αποδειχθεί ότι το σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για μονάδα θερμικής και ηλεκτρικής ισχύος (Renewable Energy System for Heat and Power Combined ή RESCHP) είναι η πιο συμφέρουσα επιλογή. Σε αυτό το σημείο σημειώνεται η παραδοχή ότι τα μεταφορικά κόστη, τα μισθολογικά έξοδα και τα έξοδα συντήρησης δεν έχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις τρεις εφαρμογές, επομένως δεν λαμβάνονται υπόψιν.

## 6.2 Οικονομική ανάλυση συστήματος με χρήση συσσωρευτών

Σε αυτήν την παράγραφο επιδιώκεται η ανάλυση των οικονομικών δεδομένων του συστήματος αποθήκευσης με τη χρήση συσσωρευτών. Για το σύστημα αυτό, θα γίνει χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου, οι οποίες είναι η πιο συμφέρουσα και ώριμη τεχνολογία στην αγορά για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Για την υλοποίηση του συστήματος απαιτούνται:

- **DC-DC μετατροπέας**: Απαιτείται για να φέρει την συνεχή τάση από την έξοδο των φωτοβολταϊκών στα κατάλληλα επίπεδα συνεχούς τάσης για την αποθήκευση στους συσσωρευτές ιόντων λιθίου, δηλαδή στα 48 V.
- **Μπαταρίες ιόντων λιθίου**: Απαιτούνται συσσωρευτές με τάση 48 V και συνολική αποθηκευτική ικανότητα τουλάχιστον 180 kAh.
- **DC-AC αντιστροφέα**: Απαιτείται για να μετατρέψει την dc τάση από την έξοδο των μπαταριών σε ac τάση, στα κατάλληλα επίπεδα για σύνδεση με το δίκτυο, δηλαδή στα 230 V.

Θεωρώντας δεδομένο ότι τα φωτοβολταϊκά είναι 300 kWp και επιλέγοντας πάνελ με διαστάσεις 1 x 1,5 m με ονομαστική ισχύ 300 W, απαιτούνται συνολικά 1.000 τέτοια πάνελ. Η τάση κάθε τέτοιου πάνελ, θεωρείται ότι κυμαίνεται στα 40 V.

Επομένως, απαιτείται τάση dc εισόδου 300 V και τάση εξόδου 48 V, καθώς οι συσσωρευτές επιλέχθηκαν να έχουν τάση 48 V. Επιλέγεται ο DC-σε-DC μετατροπέας TinoPrime Isolated DC-DC Converter 20 kW, 500 A της Zekalabs, ο οποίος κοστολογείται στα **5.320€** και έχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| | |
|---|---|
| **Τάση εισόδου $V_{in}$** | έως 800 V |
| **Ρεύμα εισόδου $I_{in}$** | 500 A |
| **Τάση εξόδου $V_{out}$** | 0 – 60 V |
| **Ρεύμα εξόδου $I_{out}$** | 32 A |
| **Ονομαστική ισχύς** | 20 kW |
| **Απόδοση** | 95% |
| **Σειρές φωτοβολταϊκών που μπορεί να δεχθεί έως 800 V** | 2 |

**Πίνακας 6.1:** Τεχνικά χαρακτηριστικά του DC-DC μετατροπέα TinoPrime Isolated DC-DC Converter 20 kW, 500 A της Zekalabs [42].

Επειδή, οι μετατροπείς DC-DC δέχονται στην είσοδό τους, έως και 2 σειρές φωτοβολταϊκών με τάση έως 800 V η καθεμία, τα πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν σε συστοιχίες 2 x 20, άρα 40 πάνελ, ανά μετατροπέα. Άρα συνολικά, απαιτούνται 25 μετατροπείς DC-DC και το συνολικό κόστος τους ανέρχεται στα 25 · 5.320€ = **133.000€**.

Στη συνέχεια, πρέπει να γίνει η επιλογή των κατάλληλων μπαταριών ιόντων λιθίου. Θα επιλεχθούν μπαταρίες UU-48V/250Ah LiFePO4 Battery Pack της Voltai. Στον πίνακα 6.3 φαίνονται τα τεχνικά της χαρακτηριστικά. Το κόστος της ανέρχεται στα **2.700€** η μπαταρία.

| | |
|---|---|
| **Χωρητικότητα** | 12,8 kWh ή 250 Ah |
| **Ονομαστική τάση** | 48 V (51,2 V) |
| **Διάρκεια ζωής** | >5000 κύκλοι |
| **Βάθος εκφόρτισης** | >80% |
| **Απόδοση** | >95% |

**Πίνακας 6.2:** Τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας ιόντων λιθίου UU-48V/240Ah LiFePO4 Battery Pack της Voltai [44].

Επειδή ζητείται η αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος να είναι 123,15 kAh, θα χρειαστούν 493 μπαταρίες ιόντων λιθίου. Το συνολικό κόστος για τις μπαταρίες ανέρχεται στα **1.331.100€**. Τέλος, η διάρκεια ζωής τους, αναμένεται να είναι περίπου 10 χρόνια.

Τέλος, ακολουθεί η επιλογή του DC-AC αντιστροφέα. Τα ζητούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι η τάση εισόδου $V_{dc}$ να είναι στα 48 V, η τάση εξόδου στα 230 V και ημιτονοειδής με συχνότητα 50 Hz. Ο DC-AC αντιστροφέας που επιλέγεται είναι το μοντέλο **1-40 kW power inverter DC-to-AC solar inverter** της Dongguan Zumax Technology, το κόστους του οποίου ανέρχεται στα **4.229€** και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| | |
|---|---|
| **Ονομαστική τάση εισόδου $V_{dc}$** | 12 - 240 V |
| **Τάση εξόδου $V_{ac}$** | 110 / 220 V |
| **Ισχύς εξόδου** | 3 – 30 kW |
| **Συχνότητα εξόδου** | 50/60 Hz |
| **Απόδοση (DC/AC)** | >85% |
| **Σειρές που μπορεί να δεχθεί έως 240 V** | 2 |

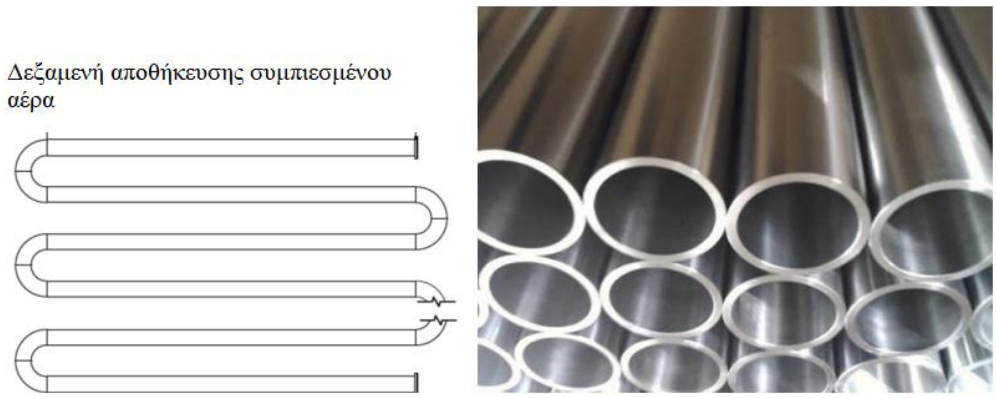
**Πίνακας 6.3:** Τεχνικά χαρακτηριστικά του **1-40 kW power inverter 1000 W, 12V, 220V, 5000W DC-to-AC solar inverter** της Dongguan Zumax Technology [43].

Ο αντιστροφέας DC-AC είναι ικανός να δεχτεί στην είσοδό του συστοιχίες 2 x 5 μπαταριών ιόντων λιθίου, άρα συνολικά κάθε αντιστροφέας δέχεται 10 μπαταρίες. Άρα, συνολικά απαιτούνται 493 / 10 = 49,3, δηλαδή 50 τέτοιοι αντιστροφείς. Έτσι, το συνολικό κόστος για τους DC-AC αντιστροφείς ανέρχεται στα 50 · 4.229€ = **211.450€**.

Με βάση το κόστος των προϊόντων που περιγράφονται παραπάνω, μια εκτίμηση κόστους για την υλοποίηση του συστήματος, με εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών 300 kWp και εγγυημένη ισχύ στο δίκτυο 50 kW, φτάνει στα **1.675.550€**. Επιπλέον, θεωρώντας 5.000 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, για χρονικό διάστημα 10 ετών, θα γίνει αναγωγή στα 40 έτη, που είναι η διάρκεια ζωής των συστημάτων A-CAES και RESCHP, δηλαδή το τελικό κόστος για 40 έτη λειτουργίας είναι **6.013.300€**. Συνολικά, οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης θα είναι 5.000 · 4 = 20.000. Έτσι, οι συσσωρευτές αναμένεται να αποδώσουν 20.000 · 12,8 kWh · 493 · 0,85 · 0,95 · 0,95 · 0,80 = 77.453.850 kWh. Άρα, το κόστος ανά kWh είναι 6.013.300€ / 77.453.850 kWh = **0,078 €/kWh**.

## 6.3 Οικονομική ανάλυση συστήματος αποθήκευσης A-CAES

Για την υλοποίηση του συστήματος αδιαβατικής μονάδας αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα απαιτούνται ένας αντιστροφέας DC-σε-AC, ο οποίος θα πρέπει να αντιστρέφει την DC τάση στην έξοδο των φωτοβολταϊκών, τάση AC. Επειδή, το κόστος σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα του συστήματος είναι πολύ μικρό, δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν. Στη συνέχεια, απαιτούνται τρεις σύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες με ισχύ τουλάχιστον 80 kW. Οι τρεις σύγχρονοι κινητήρες είναι μηχανικά συζευγμένοι με τρεις κατά παραγγελία ηλεκτρικούς συμπιεστές με ονομαστική ισχύ 75 kW. Επιπλέον, απαιτείται η τουρμπίνα αποσυμπίεσης έξι σταδίων, με ονομαστική ισχύ 110 kW και απόδοση 86%. Επιπλέον, απαιτούνται 15 εναλλάκτες θερμότητας, για μεταφορά θερμότητας από αέρα σε λάδι και το αντίστροφο. Τέλος, η δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα κατασκευάζεται από σωλήνες από ανοξείδωτο ατσάλι, ειδικούς για την ασφαλή αποθήκευση αέρα στα 200 bar. Η δεξαμενή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

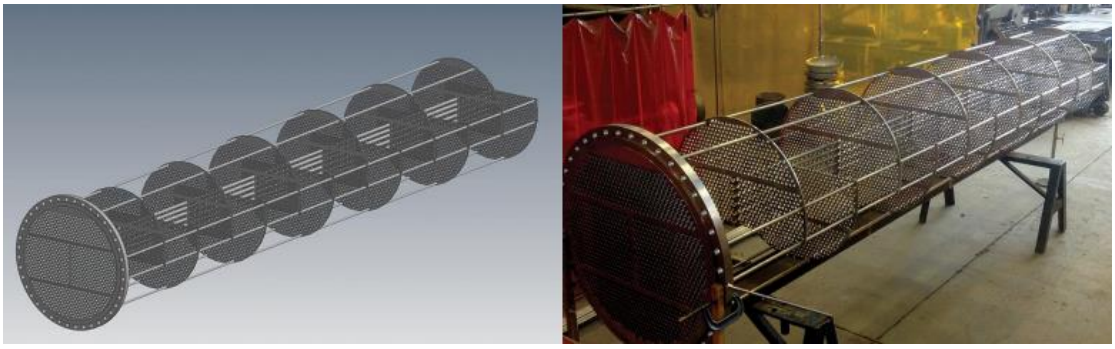



**Εικόνα 6.1:** Δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (αριστερά), ατσάλινοι σωλήνες για αποθήκευση αέρα στα 200 bar (δεξιά). Παραχώρηση Νικόλαου Πήττα.

Η χωρητικότητα της δεξαμενής, όπως υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 4, είναι 350 $m^3$, έτσι το προσεγγιστικό κόστος της δεξαμενής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, αναμένεται να ανέλθει στις **210.000€**.

Οι τρεις ειδικοί συμπιεστές τριών σταδίων συμπίεσης των 75 kW μαζί με τους ηλεκτρικούς κινητήρες με τους οποίους είναι μηχανικά συζευγμένοι, έχουν προσεγγιστικό κόστος **80.000€**. Η ειδική τουρμπίνα των 75 kW έχει προσεγγιστικό κόστος **80.000€**.

Οι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την ψύξη των συμπιεστών, με διαστάσεις 1,3 m μήκος και 0,3 m διάμετρο και αντίστοιχοι που χρησιμοποιούνται για την θέρμανση του συμπιεσμένου αέρα, πριν εισέλθει στο θάλαμο των τουρμπινών, με μήκος 1,2 m και διάμετρο 0,5 m έχουν προσεγγιστικό κόστος 12.000€ ο καθένας. Επειδή, χρησιμοποιούνται 9 εναλλάκτες, καθώς απαιτείται ένας εναλλάκτης ανά στάδιο συμπίεσης για κάθε συμπιεστή, και 6 εναλλάκτες για την θέρμανση του συμπιεσμένου αέρα, 2 για κάθε στάδιο εκτόνωσης όπου απαιτείται προθέρμανση (συγκεκριμένα στο πρώτο, το τέταρτο και το έκτο στάδιο), συνολικά απαιτούνται 15 εναλλάτες θερμότητας. Έτσι, το κόστος αναμένεται να φτάσει στις 15 · 12.000€ = **180.000€**.



**Εικόνα 6.2:** Εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται στο σύστημα A-CAES. Παραχώρηση Νικόλαου Πήττα.

Τέλος, απαιτούνται περίπου 110 τόνοι διαθερμικού λαδιού με θερμοχωρητικότητα $c_p$ = 2,08 kJ/kc$^o$C.

Στη συνέχεια, επιλέγεται κατάλληλο υγρό διάδοσης θερμότητας. Επιλέγεται το διαθερμικό λάδι High Temperature Resistance Phenyl Silicone Oil της Sunoit. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

| | |
|---|---|
| **Πυκνότητα (20 ºC)** | 857 kg/$m^3$ |
| **Θερμοκρασία ανάφλεξης** | >250 ºC |
| **Ειδική θερμοχωρητικότητα (25 ºC)** | 2,05 kJ / kg ºC |

**Πίνακας 6.4:** Τεχνικά χαρακτηριστικά του διαθερμικού λαδιού High Temperature Resistance Phenyl Silicone Oil της Sunoit [45].

Σύμφωνα με το τους υπολογισμούς στο Κεφάλαιο 4, απαιτούνται 111.857 kg διαθερμικού λαδιού. Το λάδι που επιλέχθηκε έχει τιμή 1 €/kg, άρα το κόστος του λαδιού ανέρχεται στα 111.857 €. Η δεξαμενή αποθήκευσης του λαδιού αναμένεται να έχει αμελητέο κόστος σε σύγκριση με το υπόλοιπο σύστημα και δεν λαμβάνεται υπόψιν.

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθούν αναλυτικά τα επιμέρους τμήματα του συστήματος A-CAES και το κόστος που αναμένεται να έχουν:

| | |
|---|---|
| **Συμπιεστές** | 80.000 € |
| **Τουρμπίνα** | 80.000 € |
| **Εναλλάκτες θερμότητας** | 210.000 € |
| **Δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα** | 180.000 € |
| **Διαθερμικό λάδι** | 110.000 € |
| **Σύνολο** | 660.000 € |

**Πίνακας 6.5:** Κοστολόγηση των διάφορων τμημάτων του συστήματος A-CAES. Παραχώρηση Νικόλαου Πήττα.

Το σύστημα αποθήκευσης A-CAES, είναι σε θέση να παρέχει 1,2 MWh σε ημερησίως, για 5 ημέρες, ενώ για την πλήρη επαναφόρτιση απαιτούνται 3 ημέρες. Έτσι, το σύστημα μπορεί να επαναλάβει τον κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης 365 / 8 = 46 φορές ετησίως. Έτσι, σε ετήσια βάση μπορεί να αποδώσει περίπου 276 MWh. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής της μονάδας A-CAES, υπολογίζεται 40 έτη το ελάχιστο, αποδίδοντας συνολικά 11,04 GWh. Έτσι, το κόστος ανά kWh, αναμένεται να ανέλθει στα 660.000€ / 11.040.000 kWh = **0,059 €/kWh**.

## 6.4 Οικονομική ανάλυση συστήματος αποθήκευσης RESCHP

Για την υλοποίηση του συστήματος RESCHP, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, απαιτούνται τα εξής επιμέρους τμήματα: α) τρεις συμπιεστές, τριών σταδίων συμπίεσης, ονομαστικής ισχύος 75 kW και παροχής αέρα 309 $Nm^3/h$, μηχανικά συζευγμένους με τρεις κινητήρες, β) μία ειδική τουρμπίνα αποσυμπίεσης έξι σταδιών, ονομαστικής ισχύος 110 kW και παροχής αέρα 540 $Nm^3/h$, γ) δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα κατασκευασμένη από ανοξείδωτο ατσάλι, παρόμοιας κατασκευής με της παραγράφου 6.3, αλλά με μικρότερη χωρητικότητα, δ) διαθερμικό λάδι, για την ψύξη των συμπιεστών και για την προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν εισέλθει στο θάλαμο της τουρμπίνας, ε) εναλλάκτες θερμότητας, για την ψύξη των συμπιεστών και για την προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν εισέλθει στο θάλαμο της τουρμπίνας και στ) έναν αντιστροφέα DC – σε – AC για την μετατροπή της DC τάσης στην έξοδο των φωτοβολταϊκών σε AC τάση, ώστε να τροφοδοτηθούν οι σύγχρονοι κινητήρες που είναι συζευγμένοι με τους ηλεκτρικούς συμπιεστές, ο οποίος έχει μικρό κόστος συγκριτικά με το υπόλοιπο σύστημα και δεν συνυπολογίζεται παρακάτω.

Οι τρεις ηλεκτρικοί συμπιεστές και οι σύγχρονοι κινητήρες με τους οποίους είναι συζευγμένοι μηχανικά, είναι ίδιας τεχνολογίας με αυτούς της παραγράφου 6.3, το εκτιμώμενο κόστος των οποίων είναι στις 80.000€. Η τουρμπίνα, είναι επίσης ίδιας τεχνολογίας με της παραγράφου 6.3, με τη διαφορά ότι στο $6^ο$ στάδιο αποσυμπίεσης γίνεται έκχυση κορεσμένου ατμού, ώστε το έργο εξόδου του τελευταίου σταδίου να ανέβει. Το εκτιμώμενο κόστος της, είναι 80.000€.

Αντίστοιχα, οι εναλλάκτες θερμότητας, διαδραματίζουν τον ίδιο ακριβώς ρόλο και στο σύστημα που περιγράφεται σε τούτη την παράγραφο και στο σύστημα της παραγράφου 6.3. Δηλαδή, απαιτούνται ένας εναλλάκτης θερμότητας μήκους 1,3 m και διαμέτρου 0,3 m, για κάθε στάδιο συμπίεσης του κάθε συμπιεστή. Έτσι, συνολικά απαιτούνται 6 εναλλάκτες θερμότητας για τους συμπιεστές που ψύχονται με διαθερμικό λάδι και άλλοι 3 εναλλάκτες για το συμπιεστή που ψύχεται με νερό. Έτσι, συνολικά χρειάζονται 9 εναλλάκτες για τη συμπίεση του αέρα. Για την αποσυμπίεση του αέρα, καθώς απαιτείται προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα σε τρία διαφορετικά στάδια (1$^{ο}$, 4$^{ο}$ και 6$^{ο}$ στάδιο αποσυμπίεσης), θα χρειαστούν για κάθε στάδιο αποσυμπίεσης 2 εναλλάκτες με διαστάσεις 1,2 m μήκος και 0,5 m διάμετρο, για σύνολο 6 εναλλακτών θερμότητας. Το κόστος του κάθε εναλλάκτη εκτιμάται στις 12.000€, και για 15 εναλλάκτες συνολικά, το κόστος είναι 180.000€.

Το διαθερμικό λάδι που περιγράφεται στην παράγραφο 6.3, χρησιμοποιείται και εδώ, ωστόσο όπως υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 5, η ποσότητα που απαιτείται είναι περίπου 25 τόνοι. Το κόστος του λαδιού εκτιμάται στο 1 €/kg, και συνολικά το κόστος αναμένεται να ανέλθει στις 25.000€. Οι δεξαμενές αποθήκευσης λαδιού και νερού, έχουν πολύ μικρό κόστος συγκριτικά με τα υπόλοιπα τμήματα του συστήματος και επομένως δεν χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν.

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθούν αναλυτικά τα επιμέρους τμήματα του συστήματος RESCHP και το κόστος που αναμένεται να έχουν:

| | |
|---|---|
| **Συμπιεστές** | 80.000 € |
| **Τουρμπίνα** | 80.000 € |
| **Εναλλάκτες θερμότητας** | 210.000 € |
| **Δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα** | 90.000 € |
| **Διαθερμικό λάδι** | 25.000 € |
| **Σύνολο** | 485.000 € |

**Πίνακας 6.6:** Κοστολόγηση των διάφορων τμημάτων του συστήματος RESCHP. Παραχώρηση Νικόλαου Πήττα.

Το σύστημα αποθήκευσης RESCHP, είναι σε θέση να παρέχει 1,2 MWh σε ημερησίως, για 3 ημέρες, ενώ για την πλήρη επαναφόρτιση απαιτούνται 2 ημέρες. Έτσι, το σύστημα μπορεί να επαναλάβει τον κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης 365 / 5 = 73 φορές ετησίως. Έτσι, σε ετήσια βάση μπορεί να αποδώσει περίπου 263 MWh. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής της μονάδας RESCHP, υπολογίζεται 40 έτη το ελάχιστο, αποδίδοντας συνολικά 10,52 GWh. Έτσι, το κόστος ανά kWh, αναμένεται να ανέλθει στα 485.000€ / 10.520.000 kWh = **0,046 €/kWh**.

## 6.5 Συμπέρασμα

Όπως φάνηκε στις προηγούμενες παραγράφους, το κόστος του συστήματος με μπαταρίες ιόντων λιθίου ανέρχεται στα **0,078 €/kWh**, καθώς η διάρκεια ζωής των μπαταριών είναι τέσσερις φορές μικρότερη από τη διάρκεια ζωής των συστημάτων A-CAES και RESCHP. Αυτό προκαλεί τη μεγάλη διαφορά κόστους και ήταν αναμενόμενο, καθώς οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν είναι σχεδιασμένες για μεγάλης

κλίμακας αποθήκευσης. Αντιθέτως, τα συστήματα A-CAES και RESCHP, που είναι σχεδιασμένα για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση παρουσιάζουν μικρότερο αρχικό κόστος, με ελαφρώς οικονομικότερο το σύστημα RESCHP με κόστος **0,046 €/kWh**, σε σχέση με το κόστος του A-CAES στα **0,059 €/kWh**. Ωστόσο, η ενεργειακή απόδοση της μονάδας RESCHP με θεωρητικό συνολικό βαθμό απόδοσης έως και 97% και ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 85%, σε σύγκριση με τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης του A-CAES που είναι 56%, καθιστά το πρώτο το αποδοτικότερο και οικονομικότερο σύστημα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

## 7.1 Εισαγωγή

Οι παγκόσμιοι φορείς για την προστασία του κλίματος, επιβάλλουν ειδικά τέλη στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με την ποσότητα $CO_2$ που απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα. Με αυτόν τον τρόπο, ελπίζουν να στρέψουν τους επενδυτές σε φιλικότερες μορφές ενέργειας για το περιβάλλον. Ωστόσο, αυτές οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας ή ΑΠΕ, λόγω της μεταβλητότητάς τους, δεν μπορούν να εξασφαλίσουν εγγυημένη ισχύ, με αποτέλεσμα να καθιστούν τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ δύσκολο εγχείρημα. Η λύση έγκειται στην αποθήκευση ενέργειας, προκειμένου, όταν δεν είναι εφικτή η κάλυψη της εγγυημένης ισχύος από κάποια ΑΠΕ, να συμπληρώνει ενέργεια η αποθηκευτική μονάδα. Αν και η λύση της αποθήκευσης ενέργειας μοιάζει ιδανική, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που εφαρμόζονται σήμερα, δεν είναι ικανές για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση, χωρίς να έχουν πολύ σοβαρούς γεωγραφικούς περιορισμούς (πχ. αντλιοταμίευση). Έτσι, προς το παρόν χρησιμοποιούνται συσσωρευτές, οι οποίοι ωστόσο δεν είναι οικονομικοί για μονάδες μεγάλης κλίμακας. Μία λύση θα μπορούσε να είναι οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage ή CAES). Αυτή τη στιγμή βρίσκονται σε λειτουργία δύο μονάδες (Huntorf στη Γερμανία και McIntosh στην Αλαμπάμα των ΗΠΑ), οι οποίες είναι διαβατικού τύπου. Στη βιβλιογραφία έχουν ήδη προχωρήσει σε μονάδες αδιαβατικού και ισόθερμου τύπου, οι οποίες είναι πιο βελτιωμένες και πιο οικονομικές από αυτές που είναι διαβατικού τύπου. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μονάδες διαβατικού τύπου χάνουν πολύ ενέργεια υπό μορφή θερμότητας κατά τη συμπίεση του αέρα, με αποτέλεσμα να έχουν πολύ μικρό βαθμό απόδοσης. Ωστόσο, οι άλλοι δύο τύποι χρησιμοποιούν τη θερμότητα που προκύπτει από τη συμπίεση του αέρα, η οποία αποθηκεύεται σε διαθερμικό λάδι και χρησιμοποιείται ξανά όταν απαιτηθεί. Βέβαια, δεν χρησιμοποιούν όλη τη θερμότητα και έτσι έχουν σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης (έως 70-80%). Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, όμως, εξετάζεται μία λύση, η οποία δεν έχει τόσους γεωγραφικούς περιορισμούς, είναι αποδοτική ενεργειακά και είναι οικονομικά ανταγωνιστική. Αυτή η λύση είναι η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα για παραγωγή ισχύος και θερμότητας (Renewable Energy System Combined Heat & Power ή RESCHP). Σκοπός αυτής της μονάδας είναι η εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας κατά τη συμπίεση του αέρα, τόσο για την προθέρμανση του συμπιεσμένου αέρα πριν αυτός εισέλθει στο θάλαμο της τουρμπίνας, όμως σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα αδιαβατικού και ισόθερμου τύπου, την επιπλέον θερμότητα τη χρησιμοποιεί για συστήματα θέρμανσης το χειμώνα, φτάνοντας σε θεωρητικό βαθμό απόδοσης, μεγαλύτερο από 90%.

Μία τέτοια μονάδα μπορεί να λειτουργήσει και να εξασφαλίσει ενεργειακή αυτονομία σε ένα ενεργειακά απομονωμένο σύστημα (π.χ. ένα νησί), ενώ παράλληλα είναι και οικονομικά ανταγωνιστική σε σχέση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης. Έτσι, μπορεί να διευκολύνει κατά πολύ την ποιότητα ζωής, καθώς είναι δύσκολη η τροφοδότησή τέτοιων συστημάτων με ηλεκτρική ενέργεια, καθώς η κατασκευή μονάδων που κάνουν καύση ορυκτών καυσίμων είναι πλέον οικονομικά ασύμφορη

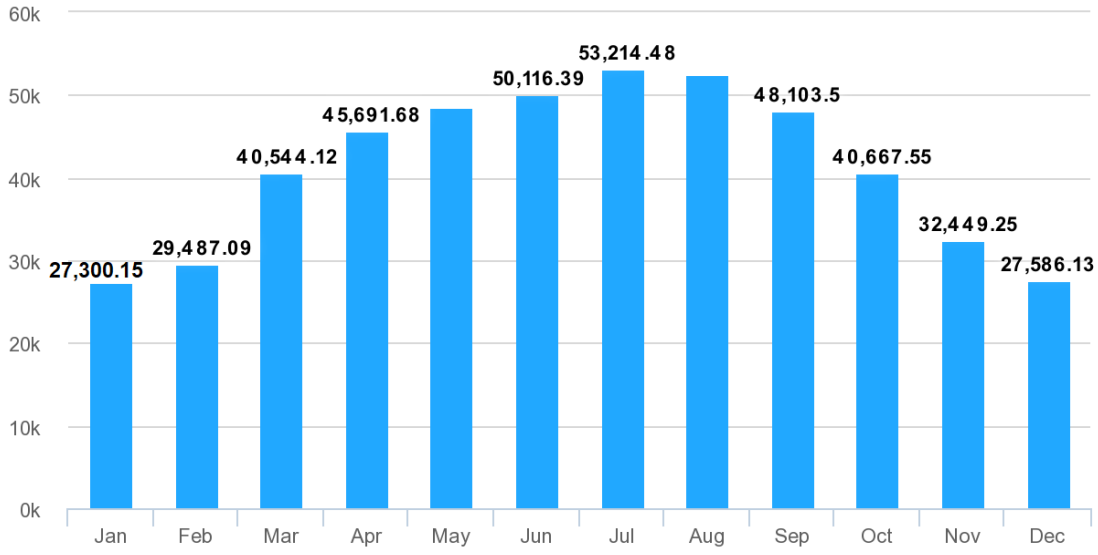
λόγω των τελών και της μεταφοράς εξοπλισμού και καύσιμης ύλης, ενώ η σύνδεσή τους με την ηπειρωτική χώρα απαιτεί τεράστια κεφάλαια. Για την απόδειξη ότι μία τέτοια μονάδα, όχι μόνο είναι εφικτή, αλλά και ενεργειακά και οικονομικά συμφέρουσα, έγινε η υπόθεση ότι ζητείται στο νησί της Ρόδου, εγγυημένη ισχύς 50 kW στο δίκτυο, από φωτοβολταϊκά εγκατεστημένης ισχύος 300 kWp. Τα δεδομένα για την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών και οι ημέρες νέφωσης λήφθηκαν από το λογισμικό Photovoltaic Geographical Information System ή PVGIS και τα ελεύθερα δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας.

## 7.2 Αποτελέσματα και συμπεράσματα

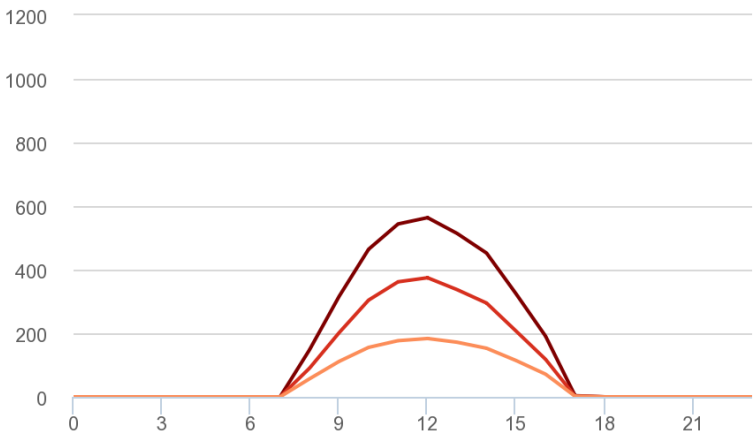
Στα κεφάλαια 3, 4 και 5 έγινε η διαστασιολόγηση των τριών συστημάτων μονάδων αποθήκευσης, ώστε και τα τρία να μπορούν να εγγυηθούν την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

1. Εύρεση του μήνα, όπου τα φωτοβολταϊκά αναμένεται να παράγουν τη μικρότερη τιμή ενέργειας σε kWh, για τον καθορισμού του μήνα όπου το σύστημα θα βρεθεί στη δυσχερέστερη θέση.
2. Για το μήνα που βρέθηκε στο βήμα 1, βρίσκεται η πυκνότητα ενέργειας της ακτινοβολίας για μία τυπική ημέρα αυτού του μήνα, ώστε να καθοριστεί αν είναι εφικτό το σύστημα να τροφοδοτήσει το δίκτυο με την εγγυημένη ισχύ και παράλληλα να φορτίζει τη μονάδα αποθήκευσης.
3. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης ολόκληρου του συστήματος αποθήκευσης.
4. Για τα μοντέλα CAES αδιαβατικού τύπου και RESCHP, υπολογίζεται η ποσότητα διαθερμικού λαδιού που απαιτείται .
5. Για το μοντέλο RESCHP, υπολογίζεται η θερμότητα με την οποία μπορεί να τροφοδοτηθεί το σύστημα θέρμανσης.

Από το PVGIS προκύπτουν τα εξής γραφήματα:




**Εικόνα 7.1:** Μηνιαία παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκών εγκατεστημένης ισχύος 300 kWp, στην τοποθεσία της Ρόδου για ένα τυπικό έτος [36].




**Εικόνα 7.2:** Μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας στην τοποθεσία της Ρόδου [36].

| **Ώρα** | **Πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας** | **Ισχύς που αποδίδουν τα φωτοβολταϊκά επιφάνειας 400 $m^2$** |
|---|---|---|
| 08:00 | 148,22 $W/m^2$ | 59,288 kW |
| 09:00 | 315,74 $W/m^2$ | 126,296 kW |
| 10:00 | 464,04 $W/m^2$ | 185,616 kW |
| 11:00 | 543,67 $W/m^2$ | 217,468 kW |
| 12:00 | 563,51 $W/m^2$ | 225,404 kW |
| 13:00 | 513,89 $W/m^2$ | 205,556 kW |
| 14:00 | 452 $W/m^2$ | 180,8 kW |
| 15:00 | 323,85 $W/m^2$ | 129,54 kW |
| 16:00 | 190,72 $W/m^2$ | 76,288 kW |
| 17:00 | 3,52 $W/m^2$ | 1,408 kW |

**Πίνακας 7.1:** Μέση ωριαία πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας και μέση παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών 300 kWp, για μία τυπική ημέρα του Ιανουαρίου, στην τοποθεσία της Ρόδου [36].

Από τις εικόνες 7.1 και 7.2 προκύπτει ότι ο Ιανουάριος είναι ο μήνας με τη μικρότερη παραγωγή ενέργειας το χρόνο. Για μία τυπική ημέρα του Ιανουαρίου, τα φωτοβολταϊκά παράγουν περίπου 1,4 MWh, τιμή μεγαλύτερη από τις 1,2 MWh, που είναι η απαίτηση του δικτύου. Τα φωτοβολταϊκά των 300 kWp, αποδεικνύεται ότι είναι ικανά να παρέχουν 50 kW εγγυημένης ισχύος, καθώς και μία περίσσεια της τάξης των 0,2 MWh. Έτσι, την ημέρα τα φωτοβολταϊκά μπορούν να καλύπτουν τη ισχύ που απαιτείται από το δίκτυο και ταυτόχρονα να αποθηκεύεται ενέργεια, η οποία θα χρησιμοποιηθεί τις νυχτερινές ώρες.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα κεφάλαια 3, 4, 5 και 6 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| **Μοντέλο** | **Μπαταρίες ιόντων λιθίου** | **A-CAES** | **RESCHP** |
|---|---|---|---|
| Βαθμός απόδοσης | 77% | 56% | 97% |
| Διάρκεια ζωής | 10 χρόνια | >40 χρόνια | >40 χρόνια |
| Κόστος | 0,078 €/kWh (κόστος που ανάγεται στα 40 χρόνια λειτουργίας) | 0,059 €/kWh | 0,046 €/kWh |

**Πίνακας 7.2:** Αποτελέσματα από τα κεφάλαια 3, 4, 5 και 6.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τον πίνακα 7.1, είναι ότι και τα τρία μοντέλα είναι εφικτά, αλλά το μοντέλο A-CAES παρουσιάζει πολύ μικρό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τα μοντέλα μπαταριών ιόντων λιθίου και RESCHP, με αποτέλεσμα να μην είναι το ιδανικό. Το μοντέλο RESCHP, έχει θεωρητικό βαθμό απόδοσης 97%, ωστόσο ο πραγματικός βαθμός απόδοσης αναμένεται να είναι περίπου 85%. Έτσι, είναι πιο ανταγωνιστικό από το μοντέλο μπαταριών ιόντων λιθίου ως προς την απόδοση. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σε βάθος χρόνου, τα μοντέλα A-CAES και RESCHP είναι πιο οικονομικά, καθώς με το ίδιο κόστος έχουν χρόνο ζωής τέσσερις φορές περισσότερο από το μοντέλο μπαταριών ιόντων λιθίου. Επίσης, με μια μικρή άνοδο στο κόστος των συστημάτων A-CAES και RESCHP, είναι εφικτό να φτιαχτεί σύστημα με μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα και έτσι να μειωθεί περαιτέρω το κόστος ανά kWh. Έτσι, το συμπέρασμα στο οποίο οδηγείται κανείς, είναι το σύστημα RESCHP είναι ενεργειακά πιο αποδοτικό και ταυτόχρονα οικονομικότερο από τα άλλα συστήματα που εξετάστηκαν.

## 7.3 Βελτιώσεις, επεκτάσεις και μελλοντικές χρήσεις

Στην παρούσα διπλωματική, τεκμηριώσαμε την άποψη ότι ένα βελτιωμένο σύστημα ΑΠΕ εγγυημένης ισχύος με αποθήκευση CAES (RESCHP) είναι εφικτό και οικονομικό. Ωστόσο, θα ήταν δυνατή η περαιτέρω μελέτη γύρω από το συγκεκριμένο θέμα.

Αρχικά, θα ήταν εφικτό με κατάλληλη βάση δεδομένων για τα μετεωρολογικά δεδομένα, να σχεδιαστεί ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης, ο οποίος θα είχε τη δυνατότητα να προβλέψει την παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών τις επόμενες ημέρες, ώστε είναι σε θέση να ρυθμίσει κατάλληλα την παροχή αέρα στην τουρμπίνα, δίχως να υπάρξει κίνδυνος να αδειάσει η δεξαμενή αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Η παροχή αέρα έχει γραμμική σχέση με την ωφέλιμη ισχύ στην έξοδο της τουρμπίνας, έτσι ρυθμίζοντας κατάλληλα την παροχή αέρα, από 0,18 kg/s που αναφέρεται στο κεφάλαιο 5, παροχή η οποία αντιστοιχεί σε παραγωγή 110 kW ισχύος, και αδειάζει τη δεξαμενή σε περίπου 55 ώρες, θα ήταν εφικτό να μειωθεί η παροχή, προκειμένου η τουρμπίνα να παράγει λίγο πάνω από 50 kW, που είναι η απαίτηση ισχύος, και η δεξαμενή να αδειάζει με αργότερο ρυθμό. Αυτή η επέκταση θα ήταν ένα βήμα ώστε το μοντέλο να γίνει πιο ακριβές.

Μία ακόμη επέκταση θα ήταν, η τροφοδότηση αέρα εξόδου του συστήματος σε ένα σύστημα κλιματισμού για τους καλοκαιρινούς μήνες, ώστε να υπολογιστεί ένας θεωρητικός βαθμός απόδοσης και για εκείνους τους μήνες. Παρόλο που το σύστημα, είναι σχεδιασμένο ώστε να λειτουργεί αξιόπιστα και τους θερινούς μήνες, δεν έχει γίνει αναφορά στο πώς θα γίνει η εκμετάλλευση του μείγματος θερμού αέρα και ατμού στην έξοδο του $6^{ου}$ σταδίου αποσυμπίεσης της τουρμπίνας. Θα μπορούσαν να γίνουν υπολογισμοί, για έναν συνολικό βαθμό απόδοσης, λαμβάνοντας υπόψιν ότι το μείγμα στην έξοδο του $6^{ου}$ σταδίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψύξη.

Τέλος, θα μπορούσε να γίνει μια αναλυτικότερη οικονομική ανάλυση σε βάθος χρόνου, λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή του ρεύματος και τις διακυμάνσεις που παρουσιάζει, τα επιτόκια και άλλες οικονομικές παραμέτρους. Αυτό θα οδηγούσε σε

καλύτερη αξιολόγηση ρίσκου για τους ενδιαφερόμενους επενδυτές και θα έδειχνε με μεγαλύτερη ακρίβεια ποιο από τα τρία συστήματα είναι το πιο ανταγωνιστικό.

## 7.4 Προσωπικά συμπεράσματα

Η εμπειρία συγγραφής της παρούσας διπλωματικής συνέβαλλε στην ανάπτυξη και εξέλιξη μου σαν μηχανικός, επιστήμονας, αλλά και σαν μελλοντικός επαγγελματίας. Αρχικά σαν επιστήμονας, διδάχθηκα ότι απαιτείται μεγάλη προσοχή στην επιλογή των πηγών και ότι απαιτείται διασταύρωσή τους, καθώς εσφαλμένη επιλογή πηγής, μπορεί να οδηγήσει σε τεράστια σφάλματα, που μπορούν να εκθέσουν τη δουλειά που έχει γίνει και να την καταστήσουν άχρηστη.

Σαν μηχανικός και επιστήμονας, χρειάστηκε να μάθω και κάποιους τομείς εκτός του δικού μου, δηλαδή του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού. Για παράδειγμα, χρειάστηκε να αποκτήσω μία καλύτερη κατανόηση της θερμοδυναμικής, ενός κλάδου που είχα ελάχιστη τριβή στα ακαδημαϊκά μου χρόνια και η μόνη επαφή που είχα ήταν κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Λύκειο.

Σαν μελλοντικός επαγγελματίας και επιστήμονας έμαθα την ανάγκη της συνεργασίας με άλλους ανθρώπους που έχουν μεγαλύτερη εξειδίκευση και εμπειρία από εμένα και να μάθω από αυτούς. Ο επιβλέπων καθηγητής μου ήταν εκεί όποτε είχα οποιαδήποτε απορία και με βοήθησε πολύ στην κατανόηση της μοντελοποίησης του συστήματος CAES. Ο Δρ.-Μηχ. Νικόλαος Πήττας με βοήθησε πολύ παραχωρώντας μου δεδομένα, πληροφορίες και τεχνογνωσία για το σύστημα RESCHP, το οποίο ο ίδιος σχεδίασε. Τέλος, χρειάστηκε να επικοινωνήσω με πολλούς εμπόρους ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, προκειμένου να μάθω την αγορά και να μπορέσω να παρουσιάσω μια εκτίμηση κόστους για το σύστημα με τους συσσωρευτές.

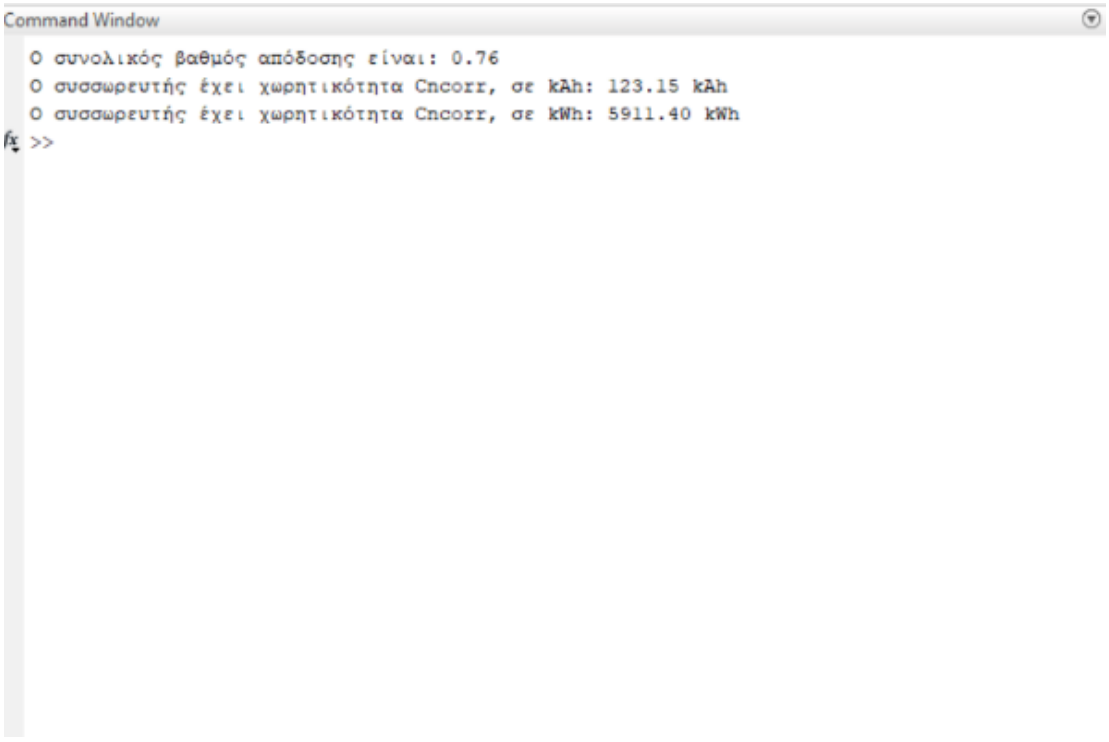
Τέλος, έμαθα για τον εαυτό μου, ότι αυτό το κομμάτι της επιστήμης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού, δηλαδή η πράσινη ενέργεια και η αποθήκευση ενέργειας, με ενδιαφέρει πάρα πολύ σαν κλάδος. Σκοπεύω να συνεχίσω να δουλεύω και να αποκτώ δεξιότητες και γνώσεις, όπως να μάθω μηχανική μάθηση και οικονομική ανάλυση, προκειμένου να το ακολουθήσω επαγγελματικά.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγηση του συστήματος των συσσωρευτών στη Ρόδο.

```
clc;

Pload = 50;

NCD = 2;
DaysOfAutonomy = NCD + 1;

BatteryEfficiency = 0.97;
BatteryVoltage = 48;
DOD = 0.8;

WiringEfficiency = 0.98;
ACDC_Efficiency = 0.88;
DCDC_Efficiency = 0.91;


Efficiency = DCDC_Efficiency * ACDC_Efficiency * WiringEfficiency * BatteryEfficiency;

E = DaysOfAutonomy * Pload * 24;
Ecorr = E / Efficiency;

Cn = Ecorr / BatteryVoltage;
Cncorr = Cn / DOD;

fprintf('Ο συνολικός βαθμός απόδοσης είναι: %.2f\n', Efficiency);
fprintf('Ο συσσωρευτής έχει χωρητικότητα Cncorr, σε kAh: %.2f kAh \n',  Cncorr);
fprintf('Ο συσσωρευτής έχει χωρητικότητα Cncorr, σε kWh: %.2f kWh \n',  Cncorr*48);

```

Οι είσοδοι του συστήματος είναι η εγγυημένη ισχύς που απαιτείται από το σύστημα, οι ημέρες πλήρους συννεφιάς, η τάση, το βάθος εκφόρτισης και η απόδοση της μπαταρίας, καθώς και η απόδοση των επιμέρους στοιχείων του συστήματος. Οι έξοδοι του κώδικα είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος, η χωρητικότητα της μπαταρίας σε kAh και σε kWh. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα του κώδικα:



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγηση του συστήματος των A-CAES στη Ρόδο.

```
clc;

g = 7/5;
AirDensity = 1.225;
cpair = 0.2;
cpoil = 2.08;
Toill = 16;
P1 = 100;
P2 = 20000;
Tair1 = 14;
Ppeak = 300;
Pload = 50;
Pcompressor = 75;
NumberOfCompressors = 3;
NumberOfCompressionStages = 3;
Pturbine = 89.44;
Plosses = 14.591;
NumberOfCloudyDays = 2;
DaysOfAutonomy = NumberOfCloudyDays + 1;
Cn = Pload * 24 * DaysOfAutonomy;
AirFluxCompressor = 0.103;
AirFluxTurbine = 0.18;
SteamFluxTurbine = 0.06;

V2 = (Cn*3600*(g-1)) / (P2 - (P1* ((P2/P1)^(1/g))));
V1 = V2 * ((P2/P1)^(1/g));
Tair21 = ((P2*V2)/(P1*V1))*Tair1;
Tair22 = round(Tair21);

tcompression = (V2 * 1000) / (5 * NumberOfCompressors * (AirFluxCompressor*3600/AirDensity));
Consumption = tcompression * NumberOfCompressors * Pcompressor;
texpansion = (V2 * 1000) / (5 * AirFluxTurbine * 3600 / AirDensity);
Production = texpansion * (Pturbine - Plosses);
Efficiency = Production / Consumption;

Qair = AirFluxCompressor * cpair * 4.18 * (270 - Tair22);
Qoil = Qair;
OilFlux = Qoil / (cpoil * (240 - Toill));
OilFluxInHeatExchanger = (OilFlux / AirFluxCompressor) * NumberOfCompressors * NumberOfCompressionStages * AirDensity * AirFluxCompressor * 3600 / AirDensity;
TotalOil = OilFluxInHeatExchanger * tcompression;

fprintf('Οι ημέρες αυτονομίας είναι: %d\n', DaysOfAutonomy);
fprintf('Η χωρητικότητα της αποθηκευτικής μονάδας είναι: Cn = %.2f MWh\n', Cn/1000);
fprintf('Η πίεση του αέρα στη δεξαμενή είναι: P2 = %.0f bar\n', P2/100);
fprintf('Ο όγκος αέρα που θα συμιεστεί είναι: V1 = %.2f m3\n', V1);
fprintf('Ο όγκος του συμπιεσμένου αέρα εντός της δεξαμενής είναι: V2 = %.2f m3\n', V2);
fprintf('Η θερμοκρασία του αέρα μετά τη συμπίεση είναι: Tair = %d Celsius\n', Tair22);
fprintf('Η θερμότητα που απορροφά το λάδι από τον συμπιεσμένο αέρα είναι: Qair = Qoil = %.2f kW\n', Qair);
fprintf('Η παροχή διαθερμικού λαδιού στους εναλλάκτες είναι: moil = %.3f kg/h \n',OilFluxInHeatExchanger);
fprintf('Το συνολικό διαθερμικό λάδι που απαιτείται είναι: %.0f kg \n',TotalOil);
fprintf('Οι %d ηλεκτρικοί συμπιεστές λειτουργούν για: %.2f h\n', NumberOfCompressors, tcompression);
fprintf('Οι τουρμπίνες λειτουργούν για: %.2f h\n', texpansion);
fprintf('Η ενέργεια που καταναλώνουν οι ηλεκτρικοί συμπιεστές είναι: %.2f MWh\n', Consumption/1000);
fprintf('Η ενέργεια που παράγεται από τις τουρμπίνες είναι: %.2f MWh\n', Production/1000);
fprintf('Η απόδοση της μονάδας αποθήκευσης είναι: %.2f %% \n', Efficiency*100);
```

Ο κώδικας δέχεται σαν εισόδους την ειδική θερμοχωρητικότητα του διαθερμικού λαδιού, τη θερμοκρασία του λαδιού, την πίεση και την αρχική θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα σε kPa, την εγγυημένη ισχύ που απαιτείται από το σύστημα, την ονομαστική ισχύ, την ονομαστική παροχή αέρα, το πλήθος και το πλήθος σταδίων συμπίεσης των συμπιεστών, την ονομαστική ισχύ, τις απώλειες και την ονομαστική παροχή αέρα της τουρμπίνας και τις ημέρες πλήρους συννεφιάς. Σαν εξόδους δίνει τις ημέρες αυτονομίας, τη χωρητικότητα της αποθηκευτικής μονάδας, τον όγκο αέρα που θα συμπιεστεί, την πίεση του αέρα στη δεξαμενή, τον όγκο του συμπιεσμένου αέρα

εντός της δεξαμενής, τη θερμοκρασία του αέρα μετά τη συμπίεση, τη θερμότητα που απορροφά το λάδι, την παροχή διαθερμικού λαδιού στους εναλλάκτες, το συνολικό διαθερμικό λάδι που απαιτείται, το χρόνο λειτουργίας των συμπιεστών και της τουρμπίνας, την ενέργεια που καταναλώνουν οι συμπιεστές, την παραγωγή ενέργειας της τουρμπίνας και η απόδοση της μονάδας αποθήκευσης.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κώδικα.

```
Οι ημέρες αυτονομίας είναι: 3
Η χωρητικότητα της αποθηκευτικής μονάδας είναι: Cn = 3.60 MWh
Η πίεση του αέρα στη δεξαμενή είναι: P2 = 200 bar
Ο όγκος αέρα που θα συμιεστεί είναι: V1 = 14627.59 m3
Ο όγκος του συμπιεσμένου αέρα εντός της δεξαμενής είναι: V2 = 332.34 m3
Η θερμοκρασία του αέρα μετά τη συμπίεση είναι: Tair = 64 Celsius
Η θερμότητα που απορροφά το λάδι από τον συμπιεσμένο αέρα είναι: Qair = Qoil = 17.74 kW
Η παροχή διαθερμικού λαδιού στους εναλλάκτες είναι: moil = 1233.515 kg/h
Το συνολικό διαθερμικό λάδι που απαιτείται είναι: 90288 kg
Οι 3 ηλεκτρικοί συμπιεστές λειτουργούν για: 73.20 h
Οι τουρμπίνες λειτουργούν για: 125.65 h
Η ενέργεια που καταναλώνουν οι ηλεκτρικοί συμπιεστές είναι: 16.47 MWh
Η ενέργεια που παράγεται από τις τουρμπίνες είναι: 9.40 MWh
Η απόδοση της μονάδας αποθήκευσης είναι: 57.11 %
fx >>
```

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγηση του συστήματος των RESCHP στη Ρόδο.

```
clc;

Ppv = 300;
Pload = 50;
DaysOfAutonomy = 3;
Pressure = 20;
AtmPressure = 0.1;
AirDensity = 1.225;
Pcompressor = 75;
NumberOfCompressors = 3;
AirFluxC = 309;
MassAirFluxC = AirFluxC / (AirDensity*3600);
Pturbine = 132.12;
Plosses = 22.038;
MassAirFluxT = 0.18;
MassWaterFluxT = 0.04;
Tout6 = 70.6;
cpair = 0.836;
cpwater = 4.18;
cpoil = 2.08;

Cn = Pload * 24 * DaysOfAutonomy/1000;
VolumeI = (-1) * Cn * 3600 / ((Pressure * (log10(AtmPressure/Pressure))/log10(exp(1))) + (Pressure - AtmPressure));

Volume = fix(VolumeI);

tcompression = ((Volume) * 1000) / (5 * NumberOfCompressors * AirFluxC);
texpansion = (Volume * 1000) / (5 * MassAirFluxT * 3600 /AirDensity);

Consumption = tcompression * NumberOfCompressors * Pcompressor;
Production = texpansion * (Pturbine - Plosses);

Qair = MassAirFluxT * cpair * (Tout6 - 25);
Qwater = MassWaterFluxT * cpwater * (Tout6 - 25);
Q = (Qair + Qwater) * texpansion;
Q = (Qair + Qwater) * texpansion;

ElectricalEfficiency = Production / Consumption;
TotalEfficiency = (Production + Q) / Consumption;

fprintf('Η χωρητικότητα της αποθηκευτικής μονάδας είναι: %.2f MWh \n', Cn);
fprintf('Ο όγκος του συμπιεσμένου αέρα είναι: %d m3 \n', Volume);
fprintf('Ο χρόνος λειτουργίας των συμπιεστών είναι: %.2f h \n', tcompression);
fprintf('Η ηλεκτρική κατανάλωση των συμπιεστών είναι: %.2f MWh \n', Consumption/1000);
fprintf('Ο χρόνος λειτουργίας των τουρμπινών είναι: %.2f h \n', texpansion);
fprintf('Η παραγωγή ενέργειας των τουρμπινών είναι: %.2f MWh \n', Production/1000);
fprintf('Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος είναι: %.0f %% \n', ElectricalEfficiency*100);
fprintf('Η χρήσιμη θερμότητα που παράγεται από τον αέρα στην έξοδου του έκτου σταδίου αποσυμπίεσης είναι: %.2f kW \n', Qair);
fprintf('Η χρήσιμη θερμότητα που παράγεται από το νερό στην έξοδου του έκτου σταδίου αποσυμπίεσης είναι: %.2f kW \n', Qwater);
fprintf('Η συνολική χρήσιμη θερμότητα είναι: %.2f MWh \n', Q/1000);
fprintf('Ο τελικός βαθμός απόδοσης της μονάδας RESCHP είναι: %.0f %% \n', TotalEfficiency*100);
```

Ο κώδικας δέχεται σαν εισόδους την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών, την εγγυημένη ισχύ που απαιτεί το σύστημα, τις ημέρες αυτονομίας, την πίεση του αέρα στη δεξαμενή αποθήκευσης σε MPa, την ονομαστική ισχύ, την ονομαστική παροχή αέρα και το πλήθος των συμπιεστών, την ονομαστική ισχύ, τις απώλειες και την παροχή αέρα της τουρμπίνας και τέλος τη θερμοκρασία του μείγματος αέρα και νερού στην έξοδο του 6$^{ου}$ σταδίου αποσυμπίεσης της τουρμπίνας. Οι έξοδοι του κώδικα είναι η χωρητικότητα της αποθηκευτικής μονάδας, ο όγκος του συμπιεσμένου αέρα, χρόνος λειτουργίας και η ηλεκτρική κατανάλωση των συμπιεστών, ο χρόνος λειτουργίας και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της τουρμπίνας, η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος, η θερμότητα που θα χρησιμοποιηθεί για θέρμανση από τον αέρα, το νερό καθώς και τη συνολική θερμότητα και τέλος τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος RESCHP. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα αποτελέσματα του κώδικα.

Command Window

```
Η χωρητικότητα της αποθηκευτικής μονάδας είναι: 3.60 MWh
Ο όγκος του συμπιεσμένου αέρα είναι: 150 m3
Ο χρόνος λειτουργίας των συμπιεστών είναι: 32.36 h
Η ηλεκτρική κατανάλωση των συμπιεστών είναι: 7.28 MWh
Ο χρόνος λειτουργίας των τουρμπινών είναι: 56.71 h
Η παραγωγή ενέργειας των τουρμπινών είναι: 6.24 MWh
Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος είναι: 86 %
Η χρήσιμη θερμότητα που παράγεται από τον αέρα στην έξοδου του έκτου σταδίου αποσυμπίεσης είναι: 6.86 kW
Η χρήσιμη θερμότητα που παράγεται από το νερό στην έξοδου του έκτου σταδίου αποσυμπίεσης είναι: 7.62 kW
Η συνολική χρήσιμη θερμότητα είναι: 0.82 MWh
Ο τελικός βαθμός απόδοσης της μονάδας RESCHP είναι: 97 %
fx >>
```

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


1. *NOAA National Centers for Environmental Information. (2021, Ιανουάριος). Ανάκτηση από State of the Climate: Monthly Global Climate Report for Annual 2020:* https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202013

2. *Δημήτριος-Τσαμπίκος, Γ. https://qtm.materials.uoc.gr/c. Ανάκτηση από Θεωρία Ηλιακών Κυττάρων:* https://qtm.materials.uoc.gr/courses/een/projects2016/giannikakis.pdf

3. *Gessel, C. v. (2022, Φεβρουαρίου 2). https://group.vattenfall.com/. Ανάκτηση από Research into the effect of black blade in wind turbine:* https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2022/black-turbine-blades-reduce-bird-collisions

4. *Δ. Λαμπρίδης, Π. Ν. (2006). Υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Στο Π. Ν. Δ. Λαμπρίδης, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Τόμος Α' (σσ. 212-235). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.*

5. *Μακρυγιώργου, Δ. (2020). https://eclass.upatras.gr. Ανάκτηση από Ήπιες Μορφές Ενέργειας - Ενότητα 1:* https://eclass.upatras.gr/modules/document/?course=EE989

6. *Collins, B. (2021, Ιούλιος 2). https://www.abc.net.au. Ανάκτηση από North-west Australian tidal power project in final stages of federal environmental approvals:* https://www.abc.net.au/news/2021-07-02/kimberley-tidal-power-project-seeks-federal-approval/100249002

7. *Singh, T. (2012, Μάιος 19). https://inhabitat.com/. Ανάκτηση από 100-Foot Subsea Turbine Successfully Installed at World's First Tidal Farm Off the Coast of Scotland :* https://inhabitat.com/worlds-first-tidal-farm-successfully-installs-100-foot-subsea-turbine/

8. *Hannah Ritchie, M. R. (2020). OurWorldInData.org. Ανάκτηση από Energy:* https://ourworldindata.org/energy-mix

9. *Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης. (2020). https://www.dapeep.gr/. Ανάκτηση από Ενεργειακό Μείγμα:* https://www.dapeep.gr/viosimi-anaptixi/energeiako-meigma/

10. *Vourvoulias, A. (2022, Απρίλιος 19). https://www.greenmatch.co.uk/. Ανάκτηση από How Efficient Solar Panels Are in the UK?:* https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/11/how-efficient-are-solar-panels

11. *US Enviromental Protection Agency. (2013, Αύγουστος). https://www.epa.gov/. Ανάκτηση από Renewable Energy Fact Sheet: Wind Turbines:* https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/wind_turbines_fact_sheet_p100il8k.pdf

12. *U.S. Departmend of Interior Bureau of Reclamation - Power Sources Office. (2005, Ιούλιος). https://www.usbr.gov/. Ανάκτηση από Hydroelectric Power:* https://www.usbr.gov/power/edu/pamphlet.pdf

13. *U.S. Department of Energy. (2004, Ιούλιος). https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34916.pdf. Ανάκτηση από Wind & Hydropower Technologies Program - NREL:* https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34916.pdf

14. *IEA. (2007, Ιανουάριος). https://www.iea.org. Ανάκτηση από Biomass for Power Generation and CHP:* https://www.iea.org/reports/biomass-for-power-generation-and-chp

15. *National Renewable Energy Laboratory. https://www.nrel.gov/. Ανάκτηση από Useful Life:* https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html

16. *Chapman, B. (2019, Σεπτέμβριος 23). https://letstalkscience.ca/. Ανάκτηση από How does a lithium-Ion battery work?:* https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/how-does-a-lithium-ion-battery-work

17. *Ζαχαρίας, Θ. (2007). Συσσωρευτές. Στο Θ. Ζαχαρίας, Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ (σσ. 201-233). Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών.*

18. *McKerracher, R. P. (2015). ChemPlusChem. Ανάκτηση από A Review of the Iron–Air Secondary Battery for Energy Storage:* https://doi.org/10.1002/cplu.201402238

19. *Fraunhofer Umsicht. https://www.umsicht.fraunhofer.de. Ανάκτηση από ELuStat: Iron-air battery as stationary energy storage :* https://www.umsicht.fraunhofer.de/en/projects/iron-air-battery.html

20. *Gao, D. W. (2015). Chapter 1 - Basic Concepts and Control Architecture of Microgrids. Στο D. W. Gao, Energy Storage for Sustainable Microgrid (σσ. 1-34). Academic Press.*

21. *Zablocki, A. (2019, Φεβρουάριος 22). https://www.eesi.org. Ανάκτηση από Fact Sheet | Energy Storage (2019):* https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019

22. *AMT, Inc. http://american-maglev.com/fess. Ανάκτηση από Highly Efficient Electromechanical Energy Storage:* http://american-maglev.com/fess

23. *European Association for Storage of Energy. https://ease-storage.eu/. Ανάκτηση από Diabatic Compressed Air Energy Storage:* https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Mechanical_DCAES.pdf

24. *European Association for Storage of Energy. https://ease-storage.eu. Ανάκτηση από Adiabatic Compressed Energy Storage:* https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_ACAES.pdf

25. *Adewale Odukomaiya, A. A.-H. https://www.osti.gov. Ανάκτηση από THERMAL ANALYSIS OF NEAR-ISOTHERMAL COMPRESSED GAS ENERGY:* https://www.osti.gov/servlets/purl/1324083

26. *Energy Storage Association. https://energystorage.org/. Ανάκτηση από Isothermal CAES:* https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/isothermal-caes/

27. *Deign, J. (2020, Νοέμβριος 4). https://www.greentechmedia.com. Ανάκτηση από Pumped Hydro Moves to Retain Storage Market Leadership :* https://www.greentechmedia.com/articles/read/pumped-hydro-moves-to-retain-storage-market-leadership

28. *Energy Systems and Energy Storage Lab. http://www.eseslab.com. Ανάκτηση από Compressed Air Energy Storage: http://www.eseslab.com/ESsensePages/CAES-page*

29. *Hua Chen, Y.-h. P.-l. (2020). Energy Conversion and Management Volume 204. Elsevier.*

30. *Jihong Wang, X. L. (2017). Compressed Air Energy. Στο G. M. Crawley, Energy Storage (σσ. 81-83). World Scientific.*

31. *E. Jannelli, M. M. (2014). A small-scale CAES (compressed air energy storage) system for stand-alone renewable energy power plant for a radio base station: A sizing-design methodology. Στο M. M. E. Jannelli, Energy (σσ. 313-322). Elsevier.*

32. *Rooij, D. D. https://sinovoltaics.com/. Ανάκτηση από Isothermal CAES: https://sinovoltaics.com/learning-center/storage/isothermal-caes/*

33. *Initiative Energien Speichern. https://erdgasspeicher.de/. Ανάκτηση από Gas Storage Types: https://erdgasspeicher.de/en/gas-storage/gas-storage-types/*

34. *Julio López Seguel, S. I.-G. (2013, Απρίλιος). https://www.ingeniare.cl. Ανάκτηση από Methodology for the design of a stand-alone photovoltaic power supply:* https://www.ingeniare.cl/index.php?lang=en&option=com_ingeniare&view=va&aid=264&vid=74

35. *Ζαχαρίας, Θ. (2007). Σχεδίαση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στο Θ. Ζαχαρίας, Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ (σσ. 305-312). Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.*

36. *European Comission. https://re.jrc.ec.europa.eu/. Ανάκτηση από Photovoltaic Geographical Information System:* https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

37. *Polarpedia. https://polarpedia.eu. Ανάκτηση από Okta scale:* https://polarpedia.eu/en/okta-scale/

38. *Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. http://www.emy.gr. Ανάκτηση από Ελεύθερα Δεδομένα από την Ε.Μ.Υ.:* http://www.emy.gr/emy/el/services/paroxi-ipiresion-elefthera-dedomena

39. *https://phys.libretexts.org/. (2022, Φεβρουάριος 20). Ανάκτηση από Adiabatic Processes for an Ideal Gas : https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Book%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism_(OpenStax)/03%3A_The_First_Law_of_Thermodynamics/3.07%3A_Adiabatic_Processes_for_an_I*

40. *Πήττας, Ν. (2020). Ελλάδα Ευρεσιτεχνία Αρ. 20180100563.*

41. *Moreno, A. (2020, Απρίλιος 22). Pump & Systems. Ανάκτηση από https://www.pumpsandsystems.com/*

42. *Zekalabs. https://www.zekalabs.com/. Ανάκτηση από TinoPrime Isolated DC-DC Converter 20kW, 500A: https://www.zekalabs.com/products/isolated-power-converters/dc-dc-isolated-converter-20kw-500a*

43. *Alibaba.com. https://www.alibaba.com/. Ανάκτηση από 1KW 3KW 5KW 10KW 20KW 30KW 40KW power inverter 1000W 12V 220V 5000w 5000watts dc to ac solar inverters Inverters & Converters: https://www.alibaba.com/product-detail/10kw-*

*20kw-30kw-40kw-Inverter-220v_1600502498254.html?spm=a2700.7724857.0.0.114750556rIDru&s=p*

44. *Voltai. https://www.voltaienergy.com/. Ανάκτηση από 5 Year Warranty 48V-240AH LiFePO4 Battery Pack: https://www.voltaienergy.com/48v_lifepo4_battery_pack/show-120.html*

45. *Sunoit. https://sunoit.en. Ανάκτηση από https://sunoit.en: https://sunoit.en.made-in-china.com/product/SZGADvCKkkpe/China-High-Temperature-Resistance-Phenyl-Silicone-Oil.html*