



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ  
ΣΕ ΜΙΚΡΗ ΚΛΙΜΑΚΑ »**

Χρήστος Β. Νατούδης

**Επιβλέπων**

Μαμάσης Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

---

Αθήνα, Ιούλιος 2020

.....  
Νατούδης Χρήστος  
Προπτυχιακός φοιτητής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Copyright © Νατούδης Χρήστος, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό τη προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στον πατέρα μου.....

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Μαμάση Νίκο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και για την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ την αδερφή μου Νατούδη Καλλιόπη καθώς και το φίλο μου Βούλγαρη Ντίνο οι οποίοι με τις γνώσεις τους και την εμπειρία τους συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Αισθάνομαι ακόμα την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που με στήριξαν και με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους στους φίλους μου Άκη, Ζήση, Γιώργο, Χρήστο, Ανθή, Μαριέττα, Ελένη, Βιβή, Όλγα, Νεκταρία, καθώς και στη Γεωργία, που μου στάθηκαν στα όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε.

## Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός και η σύγκριση μεταξύ τους, δύο αυτόνομων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την επίτευξη της πλήρους ηλεκτρικής ενεργειακής αυτονομίας της μονής Διονυσίου στο Άγιο Όρος. Τα δύο αυτόνομα συστήματα που εξετάζονται είναι αυτό της εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού και αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες και ενός υβριδικού έργου αντλησιοταμίευσης με χρήση φωτοβολταϊκού σταθμού ως ΑΠΕ. Η εγκατάσταση ΦΒ σταθμού με μπαταρίες προϋποθέτει τη διερεύνηση ορισμένων παραμέτρων οι βασικότερες εκ των οποίων είναι η εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού σταθμού και η απαιτούμενη χωρητικότητα των μπαταριών. Για το υβριδικό σύστημα αντλησιοταμίευσης με χρήση ΦΒ σταθμού ως ΑΠΕ αντίστοιχα οι βασικότερες παράμετροι προς διερεύνηση είναι επίσης η εγκατεστημένη ισχύς του ΦΒ σταθμού καθώς και η απαιτούμενη χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Για την περίπτωση αυτή, λαμβάνονται υπόψιν και η ιδιαίτερη μορφολογία του εδάφους, λόγω της γεωγραφικής θέσης της μονής και αναζητείται λύση προσαρμοσμένη σε αυτούς τους περιορισμούς που προκύπτουν. Αρχικά υπολογίστηκε η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια της μονής σε ετήσια βάση και στη συνέχεια προσδιορίστηκαν τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου για το κάθε σύστημα και καταστρώθηκαν οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία τους. Στη συνέχεια μέσω των ετήσιων ενεργειακών προσομοιώσεων λειτουργίας γίνεται προσπάθεια διαστασιολόγησης των επιμέρους συνιστωσών, για το κάθε ένα σύστημα ξεχωριστά. Παράλληλα με τη διαστασιολόγηση του κάθε συστήματος γίνεται προσπάθεια κοστολόγησης της κάθε λύσης που προκύπτει, με βάση το κόστος των τεχνολογιών της αγοράς. Για το κάθε σύστημα, λαμβάνοντας υπόψιν τους αντίστοιχους περιορισμούς, επιλέγεται η βέλτιστη λύση που ικανοποιεί ταυτόχρονα το κριτήριο της ενεργειακής αυτονομίας και του ελάχιστου δυνατού σταθμισμένου κόστους παραγόμενης ενέργειας. Τέλος από τη σύγκριση αυτών προκύπτει το αυτόνομο σύστημα που θεωρείται ότι ανταποκρίνεται και ικανοποιεί καλύτερα τις ανάγκες της μονής Διονυσίου.

## **Abstract**

In this Diploma thesis, the design of two autonomous electricity generation systems as well as a comparison between them is examined, in order to make Monastery of Dionysios in Agion Oros electrical energy-independent. The two autonomous systems examined are: 1) the installation of solar panels, where the energy would be stored in batteries; and 2) the installation of a hybrid hydro-pump system combined with solar panels as a renewable energy source. For any of the aforementioned systems, a number of parameters have to be examined prior to their installation, such as the installed power of the solar panel station and the required battery capacity as far as the first and the installed power of the solar panel station and the required capacity of the reservoir as far as the latter system is concerned. For both cases considered, the special and distinct geomorphological features of the area as well as the location of the monastery are taken into account; the installation of any of the systems would be significantly affected by those two characteristics and, therefore, any suggested solution would have to be adjusted accordingly so as to account for the geomorphological and geographic restraints. Initially, the annual demand in electrical energy for the monastery was calculated and, consequently, a mathematical model was developed, which was used to describe the function of the systems. The determination of each individual component comprising each of the two systems was attempted/achieved by simulating/estimating the annual energy consumption. In parallel with that, each emerging solution was costed, taking into account the prices of the available technology. For each system, taking into account the constraining factors, the optimized solution is selected, which provides electrical energy autonomy to the monastery at the lowest possible weighted cost of energy. Finally, the system that satisfies best the needs in autonomous electricity production of the Monastery of Dionysios is selected, after thoroughly comparing the optimized solutions for the two examined cases.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	9
1.1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	9
1.2. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών .....	10
1.3. Η τεχνολογία των συσσωρευτών .....	15
1.4. Αντλησιοταμίευση.....	20
1.5. Η αντλησιοταμίευση στην Ελλάδα.....	23
Κεφάλαιο 2 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ .....	26
2.1. Εισαγωγικά στοιχεία .....	26
2.2. Ενεργειακά στοιχεία της μονής.....	28
2.3. Εξέταση συμβολής στη ζήτηση, παραγόντων θρησκευτικού χαρακτήρα .....	30
2.4. Σύνοψη- Συμπεράσματα .....	37
Κεφάλαιο 3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ - ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ.....	38
3.1. Συνιστώσες και παράμετροι προσομοίωσης του συστήματος.....	38
3.2. Δεδομένα εισόδου .....	42
Κεφάλαιο 4 διαστασιολογηση συστημάτων.....	47
4.1.Εισαγωγή.....	47
4.2. Η περίπτωση Φ/Β σταθμού, χωρίς αποθηκευτικό μέσο .....	47
4.3. Σύστημα Φ/Β σταθμού και μπαταριών .....	49
4.4. Σύστημα αντλησιοταμίευσης με Φ/Β σταθμό .....	66
Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	81
5.1. Συγκεντρωτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας.....	81



# Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 1.1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται παγκοσμίως μέσω της εκμετάλλευσης των διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας, οι οποίες διακρίνονται σε:

- Ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο).
- Πυρηνική ενέργεια
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

Σε κάθε χώρα παρουσιάζεται μεγάλη διαφοροποίηση στη χρήση των πρωτογενών πηγών ενέργειας, καθώς ιδιαίτερο ρόλο σε αυτό διαδραματίζουν τα γεωλογικά, γεωφυσικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της, οι διαθέσιμοι Ενεργειακοί Πόροι και η εκάστοτε Ενεργειακή Πολιτική της.

Στην Ελλάδα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω λιγνιτικών σταθμών, σταθμών φυσικού αερίου, υδροηλεκτρικών σταθμών, πετρελαϊκών σταθμών στα ΜΔ νησιά και ΑΠΕ. Αναλυτικότερα σύμφωνα με τα στοιχεία για το 2017, οι λιγνιτικοί σταθμοί αντιστοιχούν στο 23% της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί στο 19 % , οι σταθμοί φυσικού αερίου στο 14% και τέλος οι ΑΠΕ στο 33 %.

Όσον αφορά στους θερμικούς σταθμούς, βάσει των ίδιων στοιχείων, η εγκατεστημένη ισχύς τους αντιστοιχεί σε 3912 MW για το λιγνίτη, 1760 MW για το πετρέλαιο και 2424 MW για το φυσικό αέριο. Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η διάρκεια ζωής των εκμεταλλεύσιμων κοιτασμάτων λιγνίτη καθώς είχε υπολογιστεί ότι δεν θα ξεπερνούσε τα 35 χρόνια, γι' αυτό μελετώνται διαφοροποιήσεις στο ελληνικό ισοζύγιο μέσω της αξιοποίησης νέων καυσίμων, όπως είναι ο λιθάνθρακας. Στα θετικά της αξιοποίησης του άνθρακα αναφέρεται η διαθεσιμότητα των γνωστών κοιτασμάτων που υπολογίζεται σε 200 χρόνια, όμως σημειώνεται πως για να είναι δυνατή η αξιοποίησή του, επιβάλλεται ο εναρμονισμός των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων άνθρακα με το αυστηρό πλαίσιο απαιτήσεων τόσο των Ευρωπαϊκών προδιαγραφών για τις μονάδες καύσης, όσο και με αυτές που απορρέουν από το «Πρωτόκολλο του Κυότο».

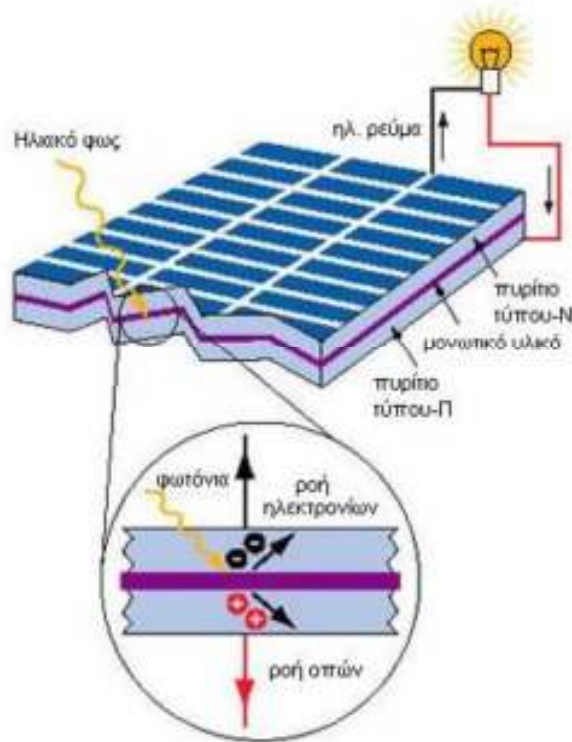
Τέλος, όσον αφορά στις ΑΠΕ, βάσει των στοιχείων για το τέλος του 2017, η εγκατεστημένη τους ισχύς αντιστοιχούσε σε 5623 MW, με την παραγωγή τους να υπολογίζεται στις 11 TWh, ενώ υπάρχει πρόβλεψη για περαιτέρω αξιοποίησή τους τα επόμενα χρόνια.

## 1.2. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών

### Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η φυσική διαδικασία, κατά την οποία συντελείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, καλείται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Για το σκοπό αυτό επιλέγονται ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο ή το αρσενιούχο γάλλιο. Το ευρύτερα διαδεδομένο φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου. Η πρόσπτωση του φωτός στην επιφάνεια ενός υλικού έχει ως αποτέλεσμα ένα τμήμα του να απορροφάται από το υλικό. Κάποια υλικά παρουσιάζουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν σε αυτά, σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα υλικά αυτά ονομάζονται ημιαγωγοί. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια, τα οποία περικλείουν διαφορετικά ποσά ενέργειας, που αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μπορεί να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να απελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο.

Καθ' όλη τη διάρκεια πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, δημιουργείται πλεόνασμα φορέων, δηλαδή περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Οι φορείς αυτοί, κυκλοφορούν στο στερεό και αν δεν συντελεστεί επανασύνδεσή τους, με φορείς αντίθετου προσήμου, δέχονται την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p-n. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κατευθύνονται προς το τμήμα τύπου-n και οι οπές προς το τμήμα τύπου-p, που αποτελεί το λόγο της δημιουργίας διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δύο τμημάτων της διόδου. Με τη σύνδεση κατάλληλου ηλεκτρικού φορτίου στους ακροδέκτες, επιτυγχάνεται ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο (Σχήμα 1.1). Η όλη διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος η οποία, για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κυττάρου, διατηρείται. Η ύπαρξη διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο ακροδεκτών της παραπάνω διάταξης, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Σχήμα 1.1: το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

### Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (cell)

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο, είναι η ελάχιστη δομική μονάδα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της φωτεινής ακτινοβολίας. Ανάλογα με το υλικό από το οποίο έχουν κατασκευαστεί, υπάγονται στις ακόλουθες κατηγορίες: μονοκρυσταλλικού πυριτίου «mono», πολυκρυσταλλικού πυριτίου «poly», λεπτών υμενίων «gibbon» και άμορφου πυριτίου «a-Si»

### Μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία έχουν συνήθως κυκλικό σχήμα, ενώ συχνά, με σκοπό να επιτυγχάνεται πιο πυκνή τοποθέτηση τους εντός ενός, δεδομένης επιφάνειας, φέροντος πλαισίου, αποκόπτονται οι απολήξεις των τεσσάρων αντιδιαμετρικών χορδών των τόξων. Ο αρχικός μονοκρύσταλλος αναπτύσσεται με τη μέθοδο Czochraski. Στη συνέχεια ο κρύσταλλος κόβεται σε δίσκους «wafers», με βάση τους οποίους κατασκευάζεται το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου.

## **Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων δημιουργούνται με την τοποθέτηση τουλάχιστον δύο λεπτών ημιαγωγικών υμενίων, πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα, το οποίο συνήθως, είναι είτε γυάλινη επιφάνεια, είτε μεταλλική, είτε κρύσταλλος διαφορετικού ημιαγωγού. Τα ημιαγωγικά υμενία, δηλαδή ένας ημιαγωγός τύπου n και ένας ημιαγωγός τύπου p, τοποθετούνται στην επιφάνεια του στοιχείου στην οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία στην οποία δημιουργείται το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού που, όπως προαναφέρθηκε, είναι αναγκαίο για τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η επαφή p-n που δημιουργείται ονομάζεται ετεροεπαφή (heterojunction), όταν το κάθε υμένιο αποτελείται από διαφορετικό ημιαγωγικό υλικό και έχει διαφορετική τιμή ενεργειακού διακένου, αλλιώς ονομάζεται ομοεπαφή (homojunction). Επειδή στα φωτοβολταϊκά στοιχεία τύπου λεπτών υμενίων ενδεχομένως να υπάρχουν ορισμένα τοξικά υλικά κατασκευής, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η καταλληλότητα τους στην κάθε εφαρμογή, πριν από την τελική χρησιμοποίησή τους.

## **Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si)**

Ο συγκεκριμένος τύπος φωτοβολταϊκών στοιχείων, ακριβώς επειδή έχει την ιδιότητα να διατηρεί την απόδοσή του ακόμα και σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, έχει ένα συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους τύπους φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για παράδειγμα η μείωση της παρεχόμενης μέγιστης ισχύος  $P_{max}$  ανά °C αύξησης της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου άμορφου πυριτίου είναι μόλις -0,2%, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής για τα υπόλοιπα φωτοβολταϊκά στοιχεία (mono, poly, ribbon) κυμαίνεται από -0,4% έως -0,5%. Ωστόσο, από την άλλη, ο βαθμός απόδοσης των στοιχείων άμορφου πυριτίου είναι μόλις 6% και σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τύπους των οποίων ο βαθμός απόδοσης είναι της τάξης του 12% έως 17%, μειονεκτούν συγκριτικά.

## **Πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία**

Οι κρύσταλλοι του πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται ως επί το πλείστον με πρώτη ύλη από επαναχρησιμοποιημένο πυρίτιο ηλεκτρονικής καθαρότητας. Συναντώνται δύο τεχνικές με βάση τις οποίες γίνεται η κατασκευή τετραγωνικών δίσκων πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Στην πρώτη τεχνική, οι μικροκρύσταλλοι του πυριτίου τοποθετούνται σε καλούπι ορθογωνικής γεωμετρίας, το οποίο θερμαίνεται μέχρι να φτάσει στο σημείο τήξης και στη συνέχεια παρέχεται πολυκρύσταλλος στον οποίο πολλά μικρά τμήματά του έχουν κρυσταλλωθεί αυτοτελώς σε μονοκρυσταλλική μορφή. Ακολούθως, ο πολυκρύσταλλος κόβεται με αδαμαντοτροχούς κατάλληλα, με σκοπό να καθαριστεί από το εξωτερικό τμήμα του. Μετά την παραπάνω διαδικασία δημιουργούνται ορθογωνικές ράβδοι μικρότερου μεγέθους. Η κάθε μία ορθογωνική ράβδος κόβεται εκ νέου σε λεπτά φύλλα (wafers), τα οποία είναι η βάση για την κατασκευή των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τελικά, με κατάλληλες χημικές διεργασίες και με την τεχνολογία μικροηλεκτρονικής καθαρότητας διαμορφώνεται το πολυκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου η λειτουργία του οποίου βασίζεται στη δίοδο επαφής p-n. Στη δεύτερη τεχνική, μικροκρύσταλλοι πυριτίου τοποθετούνται σε λεπτό επίπεδο ορθογώνιο καλούπι,

στο οποίο θερμαίνονται και συντήκονται στα όρια των κόκκων τους και με διεργασία πυροσυσσωμάτωσης κατασκευάζοντας απευθείας το «wafer».

### **Συνοπτική σύγκριση**

- Τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης της τάξης του 15%-18% αλλά παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος καθώς και λιγότερο πυκνή στοίβαση ανά φωτοβολταϊκό πλαίσιο
- Τα στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου παρουσιάζουν μικρότερο βαθμό απόδοσης, της τάξης του 13%-15% αλλά χαμηλότερο κόστος.
- Τα στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) έχουν χαμηλότερη πτώση απόδοσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά πολύ χαμηλότερο βαθμό απόδοσης, της τάξης του 6%-7%
- Τα στοιχεία λεπτών υμενίων, παρουσιάζουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης, αλλά λόγω της ενδεχόμενης ύπαρξης τοξικών στοιχείων δεν επιτρέπονται από εθνικά κέντρα ελέγχου ποιότητας αρκετών χωρών σε οικιακές εγκαταστάσεις.

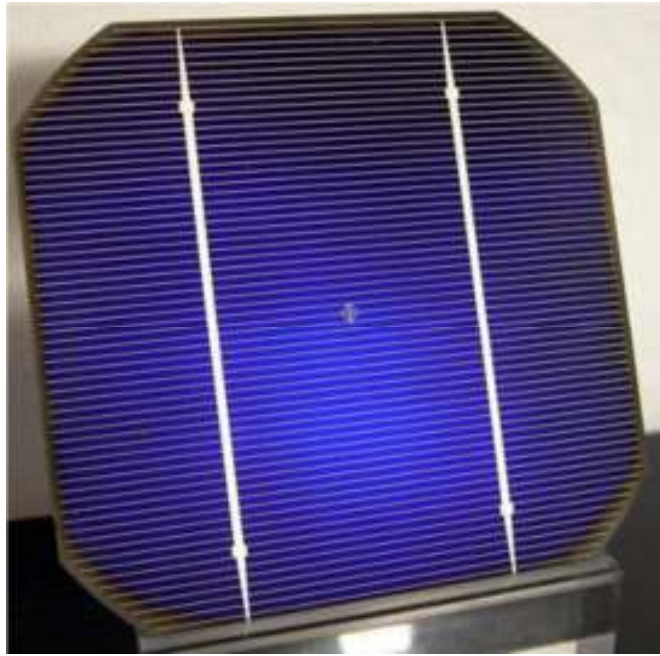
### **Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο**

Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο, όταν δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, παρέχει στην έξοδό του συνεχή τάση ίση προς 0,5 V. Η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να παράξει κάθε τέτοιο στοιχείο εξαρτάται από την επιφάνειά του και εκτιμάται με βάση, κυρίως, την τιμή της πυκνότητας ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Μια τυπική τιμή του ρεύματος μεγίστης ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου κυμαίνεται στα 4 έως 7 A, ενώ η παρεχόμενη μέγιστη ισχύς ανέρχεται περίπου στα 3 W.

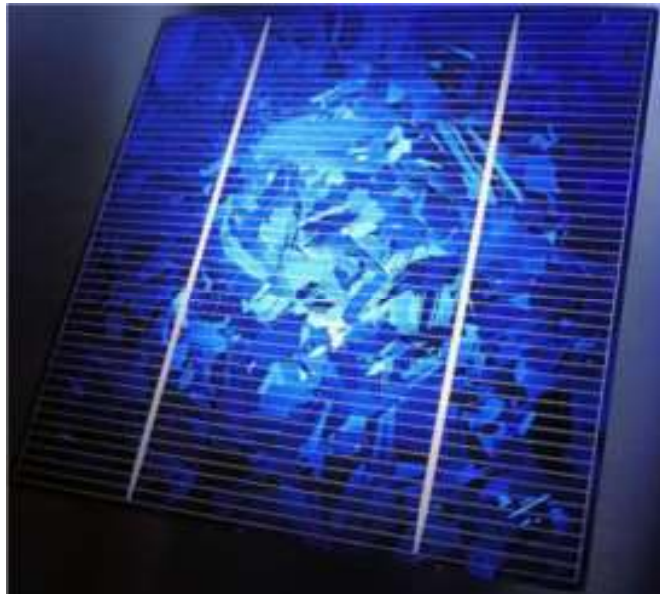
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους για το σχηματισμό πλαισίων (modules). Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελεί τη βασική κατασκευαστική μονάδα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, ανεξάρτητα από το μέγεθος της εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ουσιαστικά αποτελεί, μια ενιαία στοιχειοσειρά τοποθετημένη επάνω σε κοινό φέρον υπόστρωμα. Συνεπώς, περιλαμβάνει πολλά, όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά προκειμένου να επιτυγχάνεται αύξηση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Ανάλογα, με τον τύπο φωτοβολταϊκών στοιχείων που τα αποτελούν και έχουν περιγραφεί παραπάνω, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διακρίνονται σε:

- φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Εικόνα 1.1)
- φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Εικόνα 1.2)
- φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτών υμενίων
- φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου



*Εικόνα 1.1: Πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Πηγή: [www.m0ukd.com](http://www.m0ukd.com))*



*Εικόνα 1.2: Πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Πηγή: [www.m0ukd.com](http://www.m0ukd.com))*

## 1.3. Η τεχνολογία των συσσωρευτών

### 1.3.1. Εισαγωγικά στοιχεία-τρόπος λειτουργίας

Ο συσσωρευτής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία διάταξη που έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει χημική ενέργεια και να τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, όταν υπάρχει η αντίστοιχη ζήτηση, για την ηλεκτροδότηση ενός κυκλώματος. Χρησιμοποιούνται σε ποικιλία εφαρμογών, οι οποίες καλύπτουν μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών και λειτουργικών απαιτήσεων .

### 1.3.2. Δομή και στοιχεία συσσωρευτών

Η βασική ηλεκτροχημική μονάδα είναι το στοιχείο. Ένας συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά. Ένα στοιχείο αποτελείται από τρία βασικά συστατικά:

- την άνοδο ή το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και είναι αυτό που οξειδώνεται, δηλαδή αποβάλλει ηλεκτρόνια, κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
- την κάθοδο ή θετικό ηλεκτρόδιο, το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται, δηλαδή προσλαμβάνει ηλεκτρόνια, κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
- τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος παρέχει το μέσο για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του στοιχείου μεταξύ ανόδου και καθόδου. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως ένα υγρό, όπως νερό ή κάποιος άλλος διαλύτης, με διαλυμένα άλατα, οξέα ή αλκάλια, που μεταδίδει την ιοντική αγωγιμότητα. Μερικοί συσσωρευτές χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου.

Τα δύο ηλεκτρόδια δεν έρχονται σε επαφή, αλλά είναι ηλεκτρικώς συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω του ηλεκτρολύτη.

Η άνοδος επιλέγεται κάθε φορά λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, την αποτελεσματικότητα ως αναγωγικό μέσο, την υψηλή απόδοση αμπερωρίων (Ah/g) δηλαδή την μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου που εκφράζει την ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μεταφέρεται από έναν αγωγό όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης ενός αμπερ σε χρόνο μίας ώρας, την καλή αγωγιμότητα, καθώς επίσης και την ευκολία κατασκευής και το χαμηλό κόστος. Τα συνηθέστερα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί έως τώρα, λόγω καταλληλότητας, ως αρνητικά ηλεκτρόδια είναι το υδρογόνο, ο ψευδάργυρος και το λίθιο.

Η κάθοδος από την άλλη είναι αναγκαίο να είναι ένας αποτελεσματικός οξειδωτικός παράγοντας, να είναι σταθερή όταν έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη και να έχει ικανοποιητική τάση λειτουργίας. Το οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας από ατμοσφαιρικό αέρα που έχει εισέλθει μέσα στο στοιχείο, όπως συμβαίνει στους συσσωρευτές ψευδαργύρου-αέρα. Βέβαια, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για την κάθοδο είναι μεταλλικά οξείδια, ενώ για ειδικά

συστήματα συσσωρευτών χρησιμοποιούνται αλογόνο, θείο και τα οξείδιά του και άλλα χημικά συστατικά που περιέχουν οξυγόνο και υδρογόνο ενωμένα με κάποιο άλλο χημικό στοιχείο.

Τέλος, ο ηλεκτρολύτης πρέπει να ικανοποιεί ορισμένα κριτήρια με βάση τις ιδιότητες του, όπως να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα, αλλά να μην είναι ηλεκτρικά αγώγιμος, καθώς τότε υπάρχει κίνδυνος πρόκλησης βραχυκυκλωμάτων. Επιπρόσθετα, σημαντικό είναι ο ηλεκτρολύτης να μην αντιδρά με τα ηλεκτρόδια, να μην επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, να είναι ασφαλής και χαμηλού κόστους. Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδατικά διαλύματα, αλλά υπάρχουν σημαντικές εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα οι «θερμικές μπαταρίες» ή οι συσσωρευτές με λίθιο στην άνοδο, όπου ο ηλεκτρολύτης είναι τήγμα άλατος ή άλλοι μη υδατικοί ηλεκτρολύτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αποφυγή αντίδρασης με την άνοδο.

Από άποψη διάταξης τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου είναι ηλεκτρικά απομονωμένα στα στοιχεία της μπαταρίας για να αποφεύγονται τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Σε πρακτικούς σχεδιασμούς των στοιχείων, υπάρχει μηχανισμός που διαχωρίζει τα δύο ηλεκτρόδια, με το διαχωριστή να είναι διαπερατός από τον ηλεκτρολύτη για να διατηρείται η ιοντική αγωγιμότητα. Επίσης, ηλεκτρικοί αγωγοί με δομή πλέγματος μπορούν να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για να μειώσουν την εσωτερική αντίσταση.

Με βάση το επιθυμητό σχήμα του συσσωρευτή καθορίζονται και οι διάφορες διατάξεις και σχήματα των στοιχείων, δηλαδή των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη, ώστε να χωρούν. Στη συνέχεια, τα στοιχεία σφραγίζονται, με τρόπο τέτοιο, ώστε να αποφεύγουμε διαρροές ή ξήρανση των υλικών τους. Μερικά συνοδεύονται από συσκευές εξαερισμού ή άλλων μέσων που επιτρέπουν στα συγκεντρωμένα αέρια να διαφύγουν. Τελικά, η κατασκευή των ηλεκτροχημικών στοιχείων ολοκληρώνεται με κατάλληλα κιβώτια ή δοχεία, με μέσα σύνδεσης του ακροδέκτη και με τη σήμανσή τους.

### **1.3.3. Τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών**

Ένας συσσωρευτής, με σκοπό την πιο αποτελεσματική λειτουργία του, είναι απαραίτητο να μπορεί να αποδίδει σωστά στις απαιτούμενες συνθήκες που καλείται να ικανοποιήσει. Για να μπορέσει να γίνει εκτίμηση του κατά πόσο είναι ο κατάλληλος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που μελετάται, γίνεται χρήση των χαρακτηριστικών μεγεθών του. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν υπάρχει ένα ιδανικό σύστημα συσσωρευτή που παρουσιάζει όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα διαφορετικά χαρακτηριστικά του κάθε συσσωρευτή είναι αλληλένδετα μεταξύ τους και η όποια αλλαγή στο σχεδιασμό για τη βελτίωση του ενός, μπορεί να επιδράσει αρνητικά σε άλλα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:



- **Το δυναμικό**

Το δυναμικό μεταξύ των πόλων ενός συσσωρευτή εξαρτάται από την αλλαγή της ελεύθερης ενέργειας στη συνολική ηλεκτροχημική αντίδραση του κελιού του και επομένως στην επιλογή των ηλεκτροδιακών αντιδράσεων, τις κινητικές τους και την αντίδραση του κελιού.

- **Το ρεύμα**

Το ρεύμα είναι ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο εκφορτίζεται ο συσσωρευτής. Το ρεύμα και το δυναμικό του συσσωρευτή συσχετίζονται άμεσα μεταξύ τους

- **Η χωρητικότητα**

Ως χωρητικότητα ορίζεται το φορτίο που μπορεί να αποδώσει ένας συσσωρευτής και συνήθεις μονάδες είναι τα αμπερώρια (Ah)

- **Πυκνότητα αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου**

Είναι ένα μέτρο του αποθηκευμένου φορτίου, ως προς το βάρος του συσσωρευτή, δηλαδή η χωρητικότητα ανά μονάδα βάρους.

- **Πυκνότητα ενέργειας**

Είναι η ενέργεια που μπορεί να αποδοθεί ανά μονάδα βάρους του συσσωρευτή (kWh/kg)

- **Ρυθμός εκφόρτισης**

Είναι ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο το φορτίο απάγεται από το κελί. Αναφέρεται σε C/n ή σε n-ωριαίος ρυθμός που είναι το ρεύμα το οποίο εκφορτίζει την ονομαστική χωρητικότητα C του συσσωρευτή σε n ώρες.

- **Κύκλος ζωής**

Ως κύκλος ζωής ορίζεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/ εκφόρτισης ενός επαναφορτιζόμενου συσσωρευτή, μέχρι την παύση λειτουργίας του.

- **Πυκνότητα ισχύος**

Μερικές εφαρμογές συσσωρευτών απαιτούν καθορισμένη ικανότητα παροχής ισχύος, ανά μονάδα βάρους του συσσωρευτή. Αυτό ορίζεται ως «πυκνότητα ισχύος»

- **Απόδοση ενέργειας**

Η ενεργειακή απόδοση των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών αποτελεί σημαντική παράμετρο, η οποία ορίζεται ως εξής

$$\text{Απόδοση ενέργειας \%} = \frac{100 \times (\text{Ενέργεια που αποδίδεται κατά την εκφόρτιση})}{(\text{Απαιτούμενη ενέργεια φόρτισης})}$$

- **Συμπεριφορά κατά την υπερφόρτιση**

Στους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές δεν είναι πάντοτε εφικτό να σταματάει την κατάλληλη στιγμή ο κύκλος φόρτισης. Κατά την υπερφόρτιση συμβαίνουν πρόσθετες ηλεκτροδιακές αντιδράσεις οι οποίες δεν πρέπει να δημιουργούν λειτουργικούς κινδύνους (έναρξη πυρκαγιάς, έκρηξη), ούτε να οδηγούν στην καταστροφή του συσσωρευτή..

- **Αποθήκευση**

Πολλές φορές απαιτείται η αποθήκευση για μεγάλο χρονικό διάστημα, των συσσωρευτών, πριν τη χρησιμοποίησή τους. Πρέπει να μην αποφορτίζονται από μόνοι τους κατά το διάστημα αυτό, ούτε να διαβρώνονται οι πόλοι τους.

- **Εύρος λειτουργικών συνθηκών**

Ο συσσωρευτής μπορεί να απαιτηθεί να λειτουργεί συνεχόμενα ή παροδικά, σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, ενώ απαιτείται να λειτουργεί και να ανταποκρίνεται σε εύρος λειτουργικών καταστάσεων.

- **Αξιοπιστία**

Η αξιοπιστία είναι η ικανότητα του συσσωρευτή να λειτουργεί, χωρίς να παρουσιάζονται αστοχίες

#### **1.3.4. Συσσωρευτές και ΦΒ συστήματα**

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές, κυρίως συσσωρευτές μολύβδου-οξέως και συσσωρευτές ιόντων λιθίου.

##### **Συσσωρευτές μολύβδου-οξέως**

Η χημική σύσταση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέως είναι διοξείδιο μολύβδου ως το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου και μεταλλικός μολύβδος σε μία μεγάλης επιφάνειας πορώδη δομή για το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου. Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα θειικού οξέος. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται, τα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θειικό μολύβδο. Η

διαδικασία αντιστρέφεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγεται η διαθεσιμότητά τους σε πληθώρα μεγεθών, η ικανότητα λειτουργίας τους σε υψηλά ρεύματα, η καλή διατήρηση της φόρτισης σε διακοπτόμενη λειτουργία, το χαμηλό κόστος, η εύκολη ανακύκλωση των ηλεκτροχημικών στοιχείων ενώ διατίθενται και για συντήρηση. Βέβαια παρουσιάζουν σχετικά λίγους κύκλους ζωής, η αποθήκευσή τους για μεγάλο διάστημα ενώ είναι εκφορτισμένοι μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μόνιμη πόλωση των ηλεκτροδίων, έχουν περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα, ενώ η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο ανάφλεξης. Η αυτοεκφόρτιση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μπορεί να περιοριστεί αν η αποθήκευση των συσσωρευτών γίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 5 και 15°C.

### **Συσσωρευτές ιόντων λιθίου**

Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές ιόντων λιθίου αποτελούνται από ηλεκτροχημικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούν ενώσεις παρεμβολής για το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης, γίνεται ανταλλαγή μεταξύ των ηλεκτροδίων, θετικών ιόντων λιθίου.

Τα ενεργά υλικά των ηλεκτροδίων ενός συσσωρευτή ιόντων λιθίου είναι μεταλλικό οξείδιο λιθίου για το θετικό ηλεκτρόδιο και ενώσεις γραφίτη (άνθρακα) για το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Τα υλικά αυτά είναι συνδεδεμένα με ένα μεταλλικό φύλλο συλλογής ρεύματος με συνδετικό υλικό και με ένα αγωγίμο αραιωτικό, συνήθως μαύρο άνθρακα. Τα ηλεκτρόδια μονώνονται ηλεκτρικά με τη βοήθεια μικροπορώδους πολυαιθυλενικού ή πολυπροπυλενικού διαχωριστικού φύλλου.

Στα θετικά τους στοιχεία συμπεριλαμβάνονται η μη απαίτηση συντήρησης, η αποτελεσματική λειτουργία τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ο χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης, η ικανότητα να αποφορτίζονται σε μεγάλη ισχύ, η υψηλή απόδοση ενέργειας και τέλος το γεγονός ότι παρουσιάζουν πολλούς κύκλους ζωής. Πρέπει βέβαια να σημειωθούν και μειονεκτήματά τους, όπως η απώλεια χωρητικότητας και η θερμική διαφυγή κατά την υπερφόρτιση, απαιτείται κύκλωμα προστασίας, ενώ μπορούν να υποστούν χημική αλλοίωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Σχετικά με το κόστος τους, τα προηγούμενα χρόνια, ήταν ιδιαίτερα υψηλό, όμως μειώνεται συνεχώς ενώ θεωρείται ότι θα είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικό τα επόμενα χρόνια.

## 1.4. Αντλησιοταμίευση

Η αντλησιοταμίευση αποτελεί τη μέθοδο αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας (5 MW – 5000 MW) που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αξιοπιστία. Αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Ένα σύστημα αντλιών.
- Ένα σύστημα υδροστροβίλων.
- Δύο ταμιευτήρες σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους.
- Σύστημα σωληνώσεων για την άντληση νερού από τον κατάντη στον ανάντη ταμιευτήρα.
- Σύστημα σωληνώσεων για την προσαγωγή νερού από τον ανάντη προς τον κατάντη ταμιευτήρα.
- Μια ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με την αντλία και τον υδροστρόβιλο.

Ο τρόπος λειτουργίας ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης περιγράφεται ως εξής. Κατά την περίοδο που εμφανίζεται πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας, είτε λόγω χαμηλής ζήτησης είτε λόγω αυξημένης παραγωγικότητας των ΑΠΕ, τροφοδοτεί το σύστημα αντλιών του έργου με αποτέλεσμα να τροφοδοτείται με νερό ο ανάντη ταμιευτήρας από τον κατάντη. Έτσι αποθηκεύεται το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Όταν εμφανίζεται αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής, ο ανάντη ταμιευτήρας τροφοδοτεί τον κατάντη και μέσω του συστήματος των υδροστροβίλων παράγεται η απαιτούμενη ενέργεια. Αξιοποιείται δηλαδή η δυναμική ενέργεια του νερού χάρη στην υψομετρική διαφορά των ταμιευτήρων.

Στα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αντλησιοταμίευσης είναι ο μικρός χρόνος απόκρισης, η ικανότητά τους δηλαδή να αναλάβουν φορτίο σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα από τη στιγμή που θα εμφανιστεί η ανάγκη. Είναι δηλαδή κατάλληλο σύστημα για να αναλάβει τη ζήτηση σε περίπτωση αιχμής και με χαμηλότερο κόστος από τις θερμικές μονάδες. Άλλο ένα πλεονέκτημά του συστήματος είναι ο βαθμός απόδοσής του τόσο κατά τη φάση άντλησης όσο και κατά τη φάση παραγωγής. Συγκριτικά, μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης παρουσιάζουν οι υδροστρόβιλοι έναντι των αντλιών. Χάρη στη χρήση των ταμιευτήρων ως αποθηκευτικό μέσο, το σύστημα αντλησιοταμίευσης δύναται να παρέχει εγγυημένη ισχύ, σε αντίθεση με τις ΑΠΕ οι οποίες «πάσχουν» στον τομέα αυτό, λόγω της μεταβλητής φύσης των φαινομένων που αξιοποιούν (ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος).

Στα μειονεκτήματα του συστήματος αντλησιοταμίευσης κατατάσσεται το υψηλό επενδυτικό κόστος, όπως και το ότι δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε θέση. Τίθενται αρκετοί γεωγραφικοί και γεωλογικοί περιορισμοί (εύρεση κατάλληλης θέσης δημιουργίας ταμιευτήρων, να υπάρχει επαρκές ύψος πτώσης), ενώ τα τελευταία χρόνια αυξάνονται οι πολέμιοί τους για λόγους περιβαλλοντικούς. Τέλος δεδομένου ότι αποτελούν μεγάλα έργα, δεν γίνεται να αμεληθεί και ο χρόνος κατασκευής τους ο οποίος είναι σημαντικός.

Μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα (Σχήμα 1.2). Το τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές

υδροδυναμικές μηχανές, τον υδροστρόβιλο και την αντλία. Κάθε μηχανή ρυθμίζεται να λειτουργεί στο αντίστοιχο κανονικό σημείο λειτουργίας της. Στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα χρησιμοποιείται αναστρέψιμο υδροδυναμικό μηχάνημα, η στροβιλοαντλία, που μπορεί να λειτουργεί είτε ως υδροστρόβιλος είτε ως αντλία και επομένως επιτελεί και τις δύο φάσεις (παραγωγή και άντληση). Όμως γίνεται υποχρεωτικά συμβιβασμός στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της και αυτό είναι και το βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζει ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα, έναντι του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης.

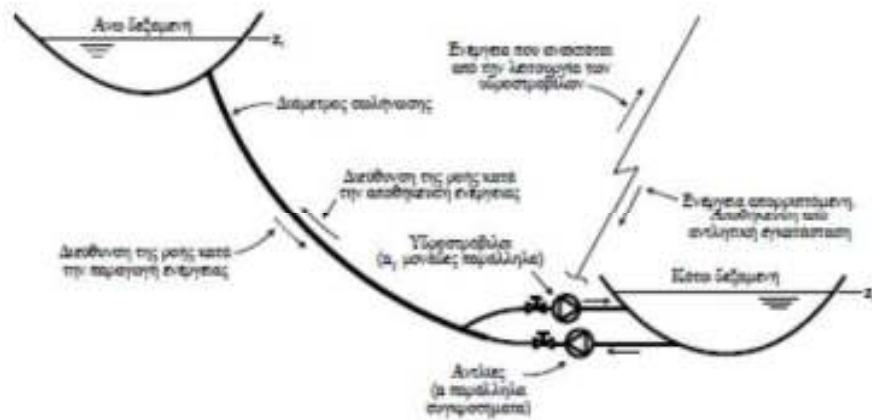


Σχήμα 1.2: Αναστρέψιμο ΥΗΕ διπλής λειτουργίας (Πηγή: Παπαντώνης Δ., 2015)

Τέλος υπάρχουν δύο βασικές περιπτώσεις ως προς τον σχεδιασμό ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης:

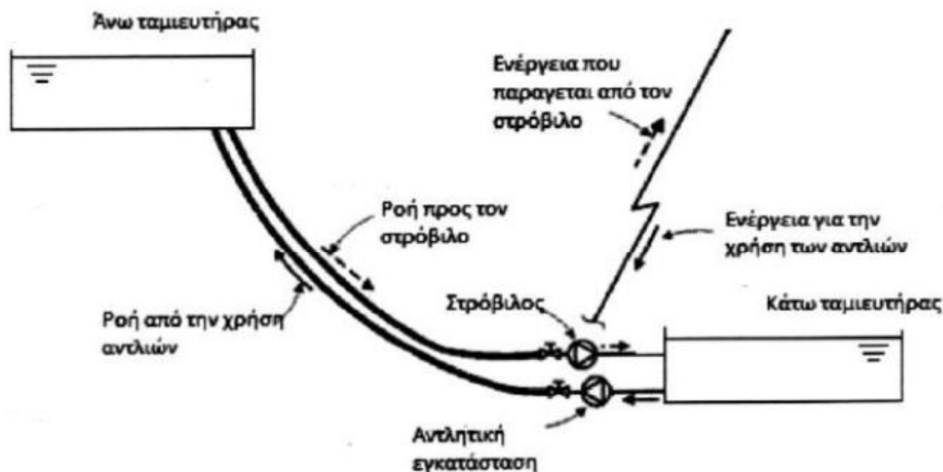
- Σύστημα αντλησιοταμίευσης με χρήση μονής σωλήνωσης (Σχήμα 1.3)
- Σύστημα αντλησιοταμίευσης με χρήση διπλής σωλήνωσης (Σχήμα 1.4)

Όσον αφορά στο σύστημα αντλησιοταμίευσης με μονή σωλήνωση, χρησιμοποιείται κοινό σύστημα σωλήνωσης τόσο για τον υδροστρόβιλο, όσο και για την αντλία. Αυτό βέβαια έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία ταυτόχρονης λειτουργίας και των δύο υδροδυναμικών μηχανών, επιβάλλεται δηλαδή ο καθορισμός προτεραιότητας λειτουργίας. Όταν εμφανίζεται φορτίο αιχμής τότε η προτεραιότητα δίνεται στη λειτουργία του υδροστροβίλου, με στόχο την παραγωγή για την άμεση ικανοποίηση της ζήτησης. Όταν υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας (είτε από ΑΠΕ χωρίς βέβαια απαίτηση συμμετοχής του έργου στην ικανοποίηση ζήτησης, είτε από μειωμένη ζήτηση όπως δηλαδή κατά τις νυχτερινές ώρες) τότε δίνεται προτεραιότητα στη φάση άντλησης. Παρά την αδυναμία της ταυτόχρονης λειτουργίας υδροστροβίλου και αντλίας, αποτελεί σαφώς οικονομικότερη κατασκευαστική λύση.



Σχήμα 1.3: Αναστρέψιμο ΥΗΕ μονής σωλήνωσης (Πηγή: Παπαντώνης Δ., 2009)

Όσον αφορά στο σύστημα αντλησιοταμίευσης με διπλή σωλήνωση οι δύο φάσεις λειτουργίας του συστήματος (άντληση και παραγωγή), πραγματοποιούνται από ανεξάρτητες σωληνώσεις για την καθεμία. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται να δοθεί προτεραιότητα είτε στη φάση άντλησης είτε στη φάση παραγωγής όπως στο σύστημα μονής σωλήνωσης και άρα δεν υπάρχει περίπτωση αδυναμίας εκμετάλλευσης περίσσειας ενέργειας, στην περίπτωση δηλαδή αιχμής της ζήτησης και ταυτόχρονα περίσσειας ισχύος των μονάδων βάσεως, καθώς δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας του υδροστροβίλου και της αντλίας. Στον αντίποδα αποτελεί σαφώς ακριβότερη λύση σε σύγκριση με το σύστημα αντλησιοταμίευσης μονής σωλήνωσης.



Σχήμα 1.4: Αναστρέψιμο ΥΗΕ διπλής σωλήνωσης (Πηγή: Παπαντώνης Δ., 2009)

## 1.5. Η αντλησιοταμίευση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα λειτουργούν δύο αναστρέψιμοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, ενώ τον Ιούνιο του 2019 εγκαινιάστηκε το υβριδικό ενεργειακό έργο Ικαρίας-Ναέρας. Οι αναστρέψιμοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι οι :

- Ασωμάτων - Σφηκιάς του ποταμού Αλιάκμονα (Εικόνα 1.3)
- Πλατανόβρυσης - Θησαυρού του ποταμού Νέστου (Εικόνα 1.4)

Ο ταμιευτήρας της Σφηκιάς είναι ημερήσιας ρύθμισης με χωρητικότητα  $99 \text{ hm}^3$  και ωφέλιμο όγκο  $18 \text{ hm}^3$ . Ο σταθμός παραγωγής είναι υπόγειος και αποτελείται από τρεις αναστρέψιμες μονάδες κατακόρυφου άξονα, τύπου Francis, με τα εξής χαρακτηριστικά

- Λειτουργία σαν Γεννήτριες:  $3 \times 105 \text{ MW}$
- Λειτουργία σαν Αντλίες:  $3 \times 108 \text{ MW}$

Όταν κρίνεται σκόπιμο αναστρέφεται η λειτουργία των στροβίλων και αντλούν νερό από την κατάντη λίμνη Ασωμάτων, κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας που εμφανίζεται περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από τις λιγνιτικές μονάδες και την αποδίδουν την ημέρα, με καλύτερους όρους. Ο ταμιευτήρας των Ασωμάτων είναι επίσης ημερήσιας ρύθμισης με χωρητικότητα  $53 \text{ hm}^3$  και ωφέλιμο όγκο  $10 \text{ hm}^3$ . Ο σταθμός παραγωγής του ταμιευτήρα είναι επίσης υπόγειος και αποτελείται από δύο μονάδες τύπου Francis εγκατεστημένης ισχύος  $55 \text{ MW}$  η κάθε μία.



Εικόνα 1.3: Αναστρέψιμο ΥΗΕ Σφηκιάς (Πηγή: [www.dei.gr](http://www.dei.gr))

Ο ΥΗΣ Θησαυρού είναι αντλητικός και αποτελείται από τρεις αναστρέψιμες μονάδες κατακόρυφου άξονα τύπου Francis, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 384 MW (3 X 128 MW). Η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι 565 εκ. m<sup>3</sup>. Όπως στην περίπτωση του ΥΗΣ Σφηκίας, ο ΥΗΣ Θησαυρού κατά τη διάρκεια της νύχτας, εκμεταλλεύομενος το πλεόνασμα ενέργειας από τις λιγνιτικές μονάδες αντλεί νερό από τον ταμιευτήρα Πλατανόβρυσης και την αποδίδει την ημέρα. Ο ταμιευτήρας Πλατανόβρυσης έχει ωφέλιμη χωρητικότητα 57 hm<sup>3</sup>, ενώ διαθέτει σταθμό παραγωγής εγκατεστημένης ισχύος 116 MW.



Εικόνα 1.4: Αναστρέψιμο ΥΗΕ Θησαυρού (Πηγή: [www.dei.gr](http://www.dei.gr))

Όσον αφορά στο υβριδικό ενεργειακό έργο Ικαρίας- Ναέρας, αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Αιολικό πάρκο στην περιοχή Στραβοκουντούρα (λόφος), αποτελούμενο από τρεις ανεμογεννήτριες, 900 MW η κάθε μία.
- Τον ΜΥΗΣ Προεσπέρας με υδροστρόβιλο ισχύος 1,05 MW. Από τον υδροστρόβιλο αξιοποιείται το πλεόνασμα νερού του ταμιευτήρα του φράγματος στο Πέζι.
- Τον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας με δύο υδροστρόβιλους συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 3,1 MW. Ο ΜΥΗΣ θα αξιοποιεί το πλεόνασμα νερού του ταμιευτήρα, καθώς και τα νερά που προέρχονται από την αντλησιοταμίευση.
- Δύο δεξαμενές νερού χωρητικότητας 80.000 m<sup>3</sup> έκαστη στις περιοχές Προεσπέρας και Κάτω Προεσπέρας, που θα εξυπηρετούν τις ανάγκες της αντλησιοταμίευσης για την απορρόφηση της αιολικής ενέργειας και έναν ταμιευτήρα νερού συνολικού όγκου περίπου 910.000 m<sup>3</sup> στο Πέζι.
- Το Αντλιοστάσιο Κάτω Προεσπέρας, με 12 αντλίες ονομαστικής ισχύος 250 kW έκαστη, εκ των οποίων οι 4 είναι μεταβλητών στροφών.

Ο ΜΥΗΣ Προεσπέρας παράγει ενέργεια από την υπερχειλίση του παλαιού Φράγματος στο Πέζι. Λειτουργεί μόνο κατά τη μη αρδευτική περίοδο (Οκτώβριος-Απρίλιος). Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, το νερό κυκλοφορεί μεταξύ της Άνω και της Κάτω Δεξαμενής μέσω 12 αντλιών και 2 αγωγών (προσαγωγού και καταθλιπτικού) και παράγεται υδροηλεκτρική ενέργεια από τον ΜΥΗΣ



Κάτω Προεσπέρας, που διοχετεύεται στο δίκτυο του νησιού. Η βασική παραγωγή υβριδικής ενέργειας του έργου προκύπτει από το γεγονός ότι για τη λειτουργία του αντλιοστασίου αξιοποιείται η αιολική ενέργεια, που παράγεται από το αιολικό πάρκο στη Στραβοκουντούρα. Η ενεργειακή τροφοδότηση του αντλιοστασίου συνιστά αποθήκευση ενέργειας (μπαταρία), διότι η αιολική ενέργεια του αιολικού πάρκου δεν απορροφάται από το έργο, αλλά, μεταφέρεται από την κάτω στην άνω Δεξαμενή και τελικά αποδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού μέσω του ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας με τη μορφή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για ένα έργο που συνδυάζει δύο βασικές ΑΠΕ –την αιολική και την υδροηλεκτρική– που δημιουργεί την υβριδική ενέργεια. Ο Ναέρας υπολογίζεται πως θα παράγει, συνολική καθαρή ενέργεια της τάξεως των 9,8 GWh/έτος, καλύπτοντας μεγάλο μέρος της ετήσιας ζήτησης σε ενέργεια της Ικαρίας.

## Κεφάλαιο 2 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ

### 2.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Η μονή Διονυσίου, βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά της χερσονήσου του Άθω, της ανατολικότερης από τις τρεις χερσονήσους της Χαλκιδικής. Η ίδρυση της μονής χρονολογείται το 1366 μ.Χ. από τον όσιο Διονύσιο. Βρίσκεται κτισμένη πάνω σε βράχο, σε ύψος 80 μέτρων από τη θάλασσα. Πρόκειται για ελληνικό κοινόβιο μοναστήρι, πέμπτο στην ιεραρχία των μονών του Αγίου Όρους. Το 1535 μ.Χ. η μονή καταστράφηκε από πυρκαγιά και ανοικοδομήθηκε εκ νέου.

Μέσα στη μονή κτίστηκε ο αμυντικός πύργος της, το 1520 μ.Χ. ο οποίος χρησιμοποιείται για τη φύλαξη της βιβλιοθήκης της. Η βιβλιοθήκη της μονής θεωρείται μία από τις πιο αξιόλογες και περιέχει πάνω από 1000 χειρόγραφα. Παράλληλα διαθέτει σημαντικά κειμήλια, από θρησκευτικής άποψης, στα οποία συγκαταλέγονται το δεξί χέρι του Τιμίου Προδρόμου καθώς και η εικόνα της Παναγίας του Ακαθίστου που αποδίδεται στον Ευαγγελιστή Λουκά. Το καθολικό της μονής φέρει τοιχογραφίες του αγιογράφου Τζώρτζη, που χρονολογούνται το 16ο αιώνα, ενώ η τράπεζα της μονής φέρει τοιχογραφίες των μοναχών αγιογράφων Δανιήλ και Μερκούριου.

Η μονή γιορτάζει τη γέννηση του Ιωάννη του Προδρόμου στις 24 Ιουνίου, ενώ η μοναστική της δύναμη υπολογίζεται σήμερα στα 55 άτομα.



Εικόνα 2.1: Γεωγραφική θέση της μονής Διονυσίου (Πηγή: google maps)



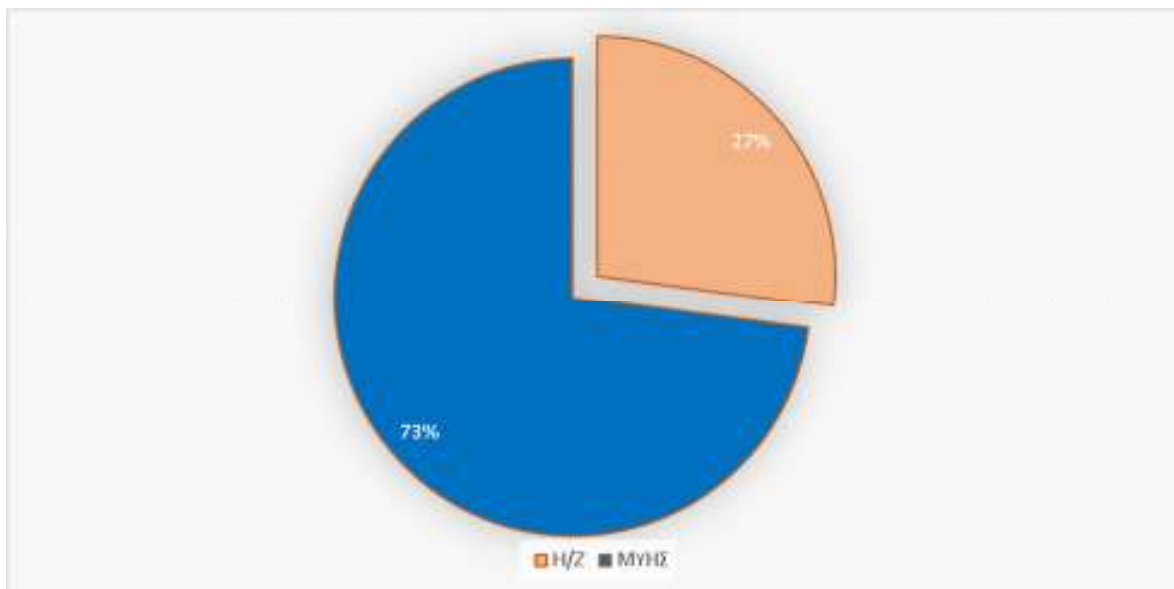
Εικόνα 2.2: Αποψη της μονής Διονυσίου (Πηγή: www.google.gr)

## 2.2. Ενεργειακά στοιχεία της μονής

Το Άγιο Όρος, δεν είναι διασυνδεδεμένο στο κεντρικό σύστημα διανομής ενέργειας. Οι μονές καθώς και τα υπόλοιπα οικήματα τροφοδοτούνται κατά κύριο λόγο μέσω Η/Ζ (πετρελαίου), ενώ σε ορισμένες μονές υπάρχουν και μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Μία από αυτές είναι και η εξεταζόμενη, η μονή Διονυσίου. Η ζήτηση της μονής καλύπτεται από δύο ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, συνολικής ισχύος 300 kVA, (150 kVA έκαστο) και από ένα ΜΥΗΣ μεγίστης ισχύος 128 kW. Τα δύο Η/Ζ, ο ΜΥΗΣ και οι ηλεκτρικοί πίνακες είναι εγκατεστημένα στο κτίριο του ενεργειακού κέντρου, βορειοανατολικά της μονής, σε απόσταση 120 m από αυτήν.

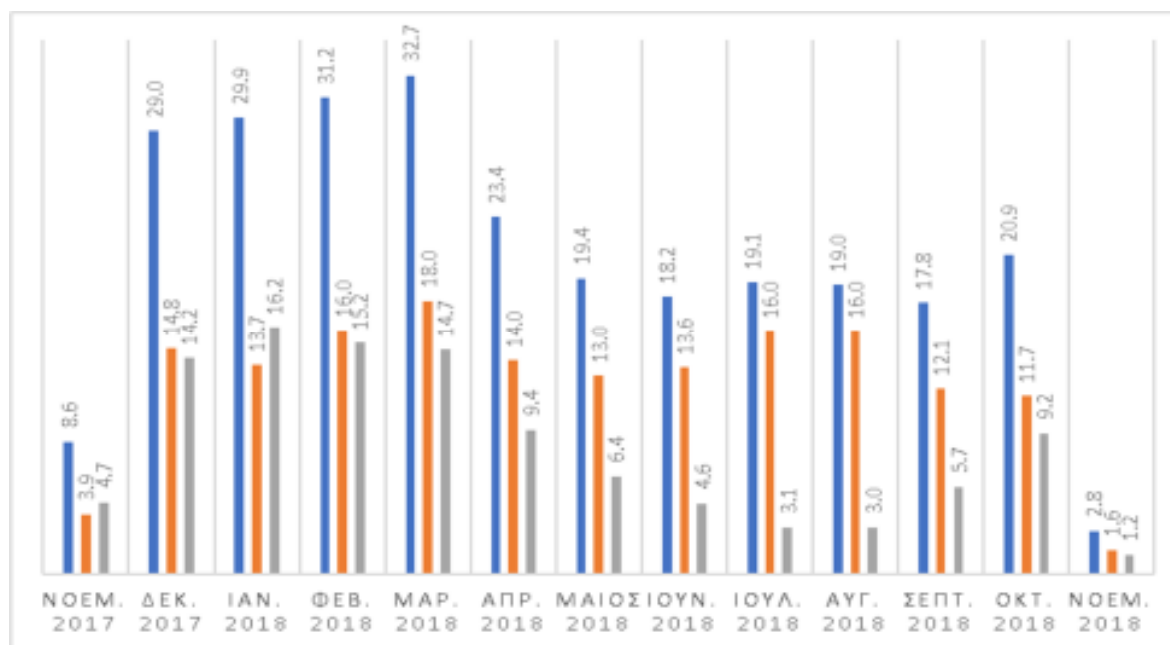
Για τον υπολογισμό της ζήτησης της μονής, αξιοποιήθηκε η χρονοσειρά ζήτησης ισχύος όπως αυτή καταγράφηκε από το μετρητή της. Τα διαθέσιμα στοιχεία αφορούν το χρονικό διάστημα, από 22 Νοεμβρίου 2017 έως και τις 4 Νοεμβρίου 2018. Η ζήτηση της μονής για το διάστημα αυτό υπολογίστηκε σε 272371,2 kWh. Από αυτές οι 198607,7 kWh καλύπτονται από τη λειτουργία του ΜΥΗΣ, ενώ οι υπόλοιπες 73763,4 kWh καλύπτονται μέσω της λειτουργίας των Η/Ζ. Έτσι προκύπτει το Σχήμα 2.1.

Αναφέρεται επίσης ότι οι διαθέσιμες μετρήσεις για το Νοέμβριο του 2017, καθώς και για τον ίδιο μήνα του 2018 δεν είναι ολοκληρωμένες. Αφορούν μόνο 9 καταγεγραμμένες ημέρες για την πρώτη περίπτωση και 4 για την δεύτερη. Παρατίθενται κανονικά, σε όλα τα γραφήματα, αλλά πρέπει να αναφερθεί ότι δεν επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 2.1: ποσοστό συμμετοχής ΜΥΗΣ και Η/Ζ στην κάλυψη της ζήτησης

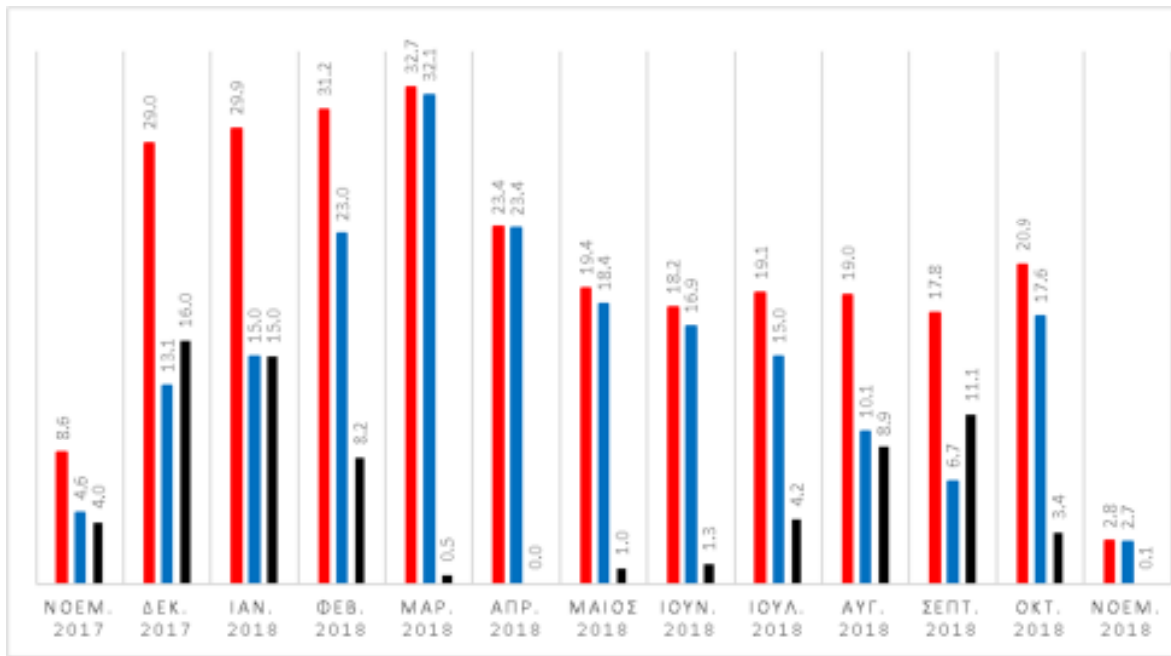
Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική ζήτηση ενέργειας για κάθε μήνα ξεχωριστά του εξεταζόμενου διαστήματος, καθώς επίσης και η ζήτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και των νυχτερινών ωρών. Τα στοιχεία παρατίθενται στο Σχήμα 2.2 και στο Σχήμα 2.3



Σχήμα 2.2: Μηνιαία ζήτηση ενέργειας (MWh), συνολική ζήτηση (μπλε), νυχτερινή ζήτηση (γκρι), ζήτηση κατά τη διάρκεια της ημέρας (πορτοκαλί)

Η ζήτηση ενέργειας των νυχτερινών ωρών παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένη κατά τους χειμερινούς μήνες με αποκορύφωμα τον Ιανουάριο όπου ξεπερνάει τη ζήτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Πτωτική πορεία εμφανίζει κατά τους μήνες της άνοιξης, ενώ οι χαμηλότερες τιμές της εμφανίζονται τους θερινούς μήνες, ενώ αυξάνεται ξανά κατά τους φθινοπωρινούς μήνες. Πιθανό λόγο αποτελεί η χρήση θέρμανσης το χειμώνα, ενώ λόγω του ασκητικού τρόπου ζωής στο μοναστήρι, κρίνεται λογική η μη ύπαρξη κλιματισμού για τη θερινή περίοδο. Παράλληλα πρέπει να ληφθεί υπόψη πως οι μονές αποτελούν θρησκευτικούς χώρους λατρείας και στις διάφορες θρησκευτικές εορτές κατά τη διάρκεια του έτους παρουσιάζονται εκκλησιαστικές δραστηριότητες όπως ολονύκτιες λειτουργίες, φωταγώγηση μονής κλπ.

Παράλληλα παρουσιάζονται για τον κάθε μήνα η συμβολή του ΜΥΗΣ καθώς και των Η/Ζ στη κάλυψη της συνολικής ζήτησης σε ενέργεια που απαιτείται.



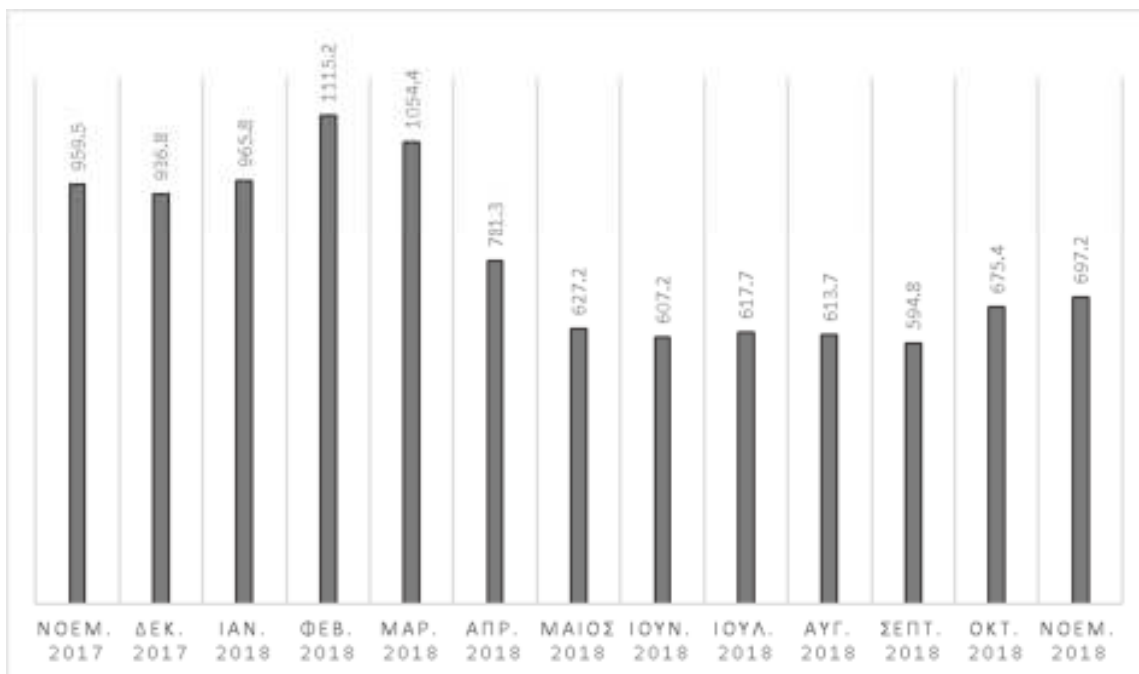
Σχήμα 2.3: Μηνιαία ζήτηση ενέργειας (MWh), συνολική ζήτηση (κόκκινο), ζήτηση που καλύπτεται από τον ΜΥΗΣ (μπλε), ζήτηση που καλύπτεται από τα Η/Ζ (μαύρο)

Αυξημένη χρήση των Η/Ζ παρατηρείται κατά τους χειμερινούς μήνες, Δεκέμβριο και Ιανουάριο, καθώς επίσης και τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Συγκεκριμένα τον Δεκέμβριο, όπως και τον Σεπτέμβριο τα Η/Ζ συμμετέχουν σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τον ΜΥΗΣ στην κάλυψη της απαιτούμενης ενέργειας, ενώ τον Ιανουάριο συμμετέχουν εξίσου. Συνολικά όμως κατά τη διάρκεια του χρόνου παρατηρείται ότι η ζήτηση εξυπηρετείται κατά κύριο λόγο από τη λειτουργία του ΜΥΗΣ. Ιδιαίτερα για τους μήνες της άνοιξης, όπως και για τους θερινούς, πλην του Αυγούστου, η συμμετοχή των Η/Ζ είναι ιδιαίτερα χαμηλή, ενώ παρουσιάζουν μηδενική συμμετοχή, για τον Απρίλιο συγκεκριμένα.

### 2.3. Εξέταση συμβολής στη ζήτηση, παραγόντων θρησκευτικού χαρακτήρα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μονή Διονυσίου αποτελεί χώρο θρησκευτικής λατρείας. Απαιτείται επομένως περαιτέρω διερεύνηση των ενεργειακών δεδομένων, για να εντοπιστούν πιθανοί παράγοντες που προκαλούν αυξημένη ζήτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους. Έναν τέτοιο παράγοντα αποτελούν οι θρησκευτικές εορτές κατά τη διάρκεια του έτους. Δεδομένου ότι πρόκειται για ορθόδοξο χριστιανικό μοναστήρι, επιλέγονται να μελετηθούν οι καταναλώσεις της μονής κατά τις ημερομηνίες, των μεγαλύτερων εορτών της ορθοδοξίας. Επιλέγεται να μελετηθούν ο εορτασμός των Χριστουγέννων στις 25 Δεκέμβρη, ο εορτασμός του Ευαγγελισμού της Θεοτόκου στις 25 Μαρτίου, το Πάσχα, που για το 2018 ήταν στις 8 Απριλίου, η γέννηση του Ιωάννη του Προδρόμου στις 24 Ιουνίου που είναι και η γιορτή του μοναστηριού, όπως αναφέρθηκε, και τέλος η κοίμηση της Θεοτόκου, που εορτάζεται στις 15 Αυγούστου.

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την κάθε μία εξεταζόμενη περίπτωση, θα χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία, η μέση ημερήσια ζήτηση (Σχήμα 2.4) και η ημερήσια ζήτηση του εκάστοτε μήνα, που τυχαίνει η αντίστοιχη εορτή. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων δεν αρκεί η σύγκριση της ζήτησης της ημέρας του εορτασμού. Κρίνεται επιβεβλημένη η μελέτη της ενεργειακής ζήτησης και των προηγούμενων ημερών, καθώς κατά τη χριστιανική παράδοση οι εκκλησιαστικές δραστηριότητες, λαμβάνουν χώρα κατά κύριο λόγο την προηγούμενη ημέρα της εορτής (παραμονή), ενώ για τις περιπτώσεις των Χριστουγέννων, όπως και του Πάσχα, ο εορτασμός ξεκινάει αρκετές ημέρες πριν. Συγκεκριμένα για το Πάσχα διαρκεί μία εβδομάδα (Μεγάλη Εβδομάδα).

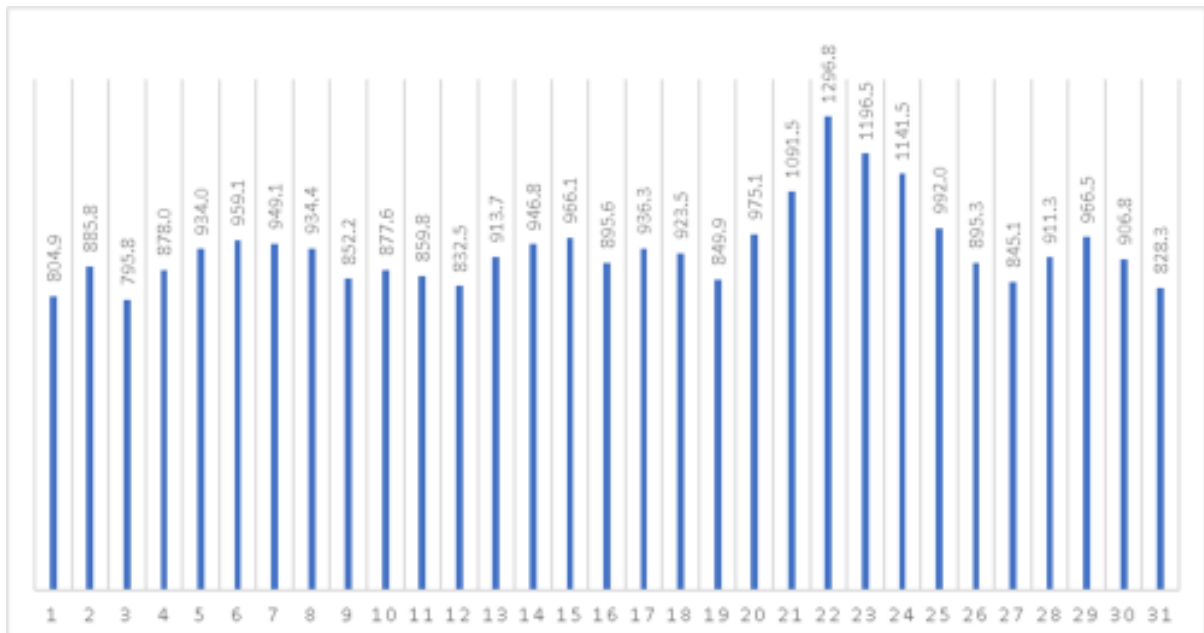


Σχήμα 2.4: Μέση ημερήσια ζήτηση ενέργειας (kWh), για τον κάθε μήνα

### Περίπτωση εορτασμού των Χριστουγέννων

Η μέση ημερήσια ζήτηση για τον μήνα Δεκέμβριο κυμαίνεται στις 936,8 kWh όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4. Σύμφωνα με τα στοιχεία που φαίνονται στο Σχήμα 2.5, προκύπτει πως για το αμέσως προηγούμενο διάστημα (22-23-24 Δεκεμβρίου) η ζήτηση είναι μεγαλύτερη της μέσης ημερήσιας για το μήνα και μάλιστα, το διάστημα αυτό, εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές ενεργειακής ζήτησης. Αυτό αποτελεί πιθανή ένδειξη της συμβολής εκκλησιαστικής εορτής στη αύξηση ενεργειακής κατανάλωσης της μονής.



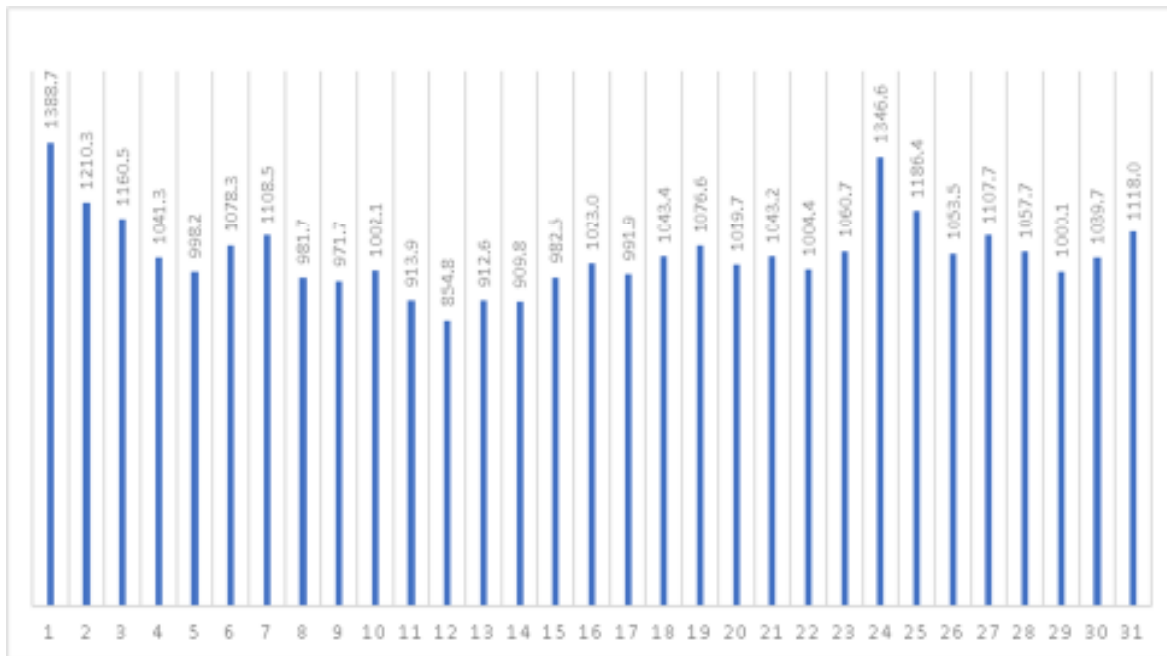


Σχήμα 2.5: Ημερήσια ζήτηση ενέργειας (kWh), για τον μήνα Δεκέμβριο

### Περίπτωση εορτασμού 25<sup>ης</sup> Μαρτίου

Η μέση ημερήσια κατανάλωση για το μήνα Μάρτιο κυμαίνεται στις 1054,4 kWh. Από τα στοιχεία που προκύπτουν για τις ημερήσιες καταναλώσεις του μήνα (Σχήμα 2.6), παρατηρείται πως στις 24 Μαρτίου, την παραμονή δηλαδή της εξεταζόμενης εορτής η ζήτηση ανέρχεται σε 1346,6 kWh, τιμή κατά πολύ μεγαλύτερη της μέσης ημερήσιας ζήτησης, ενώ παράλληλα είναι και η δεύτερη μεγαλύτερη για τον μήνα. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και για την περίπτωση των Χριστουγέννων, εμφανίζεται η θρησκευτική εορτή να επηρεάζει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της μονής.

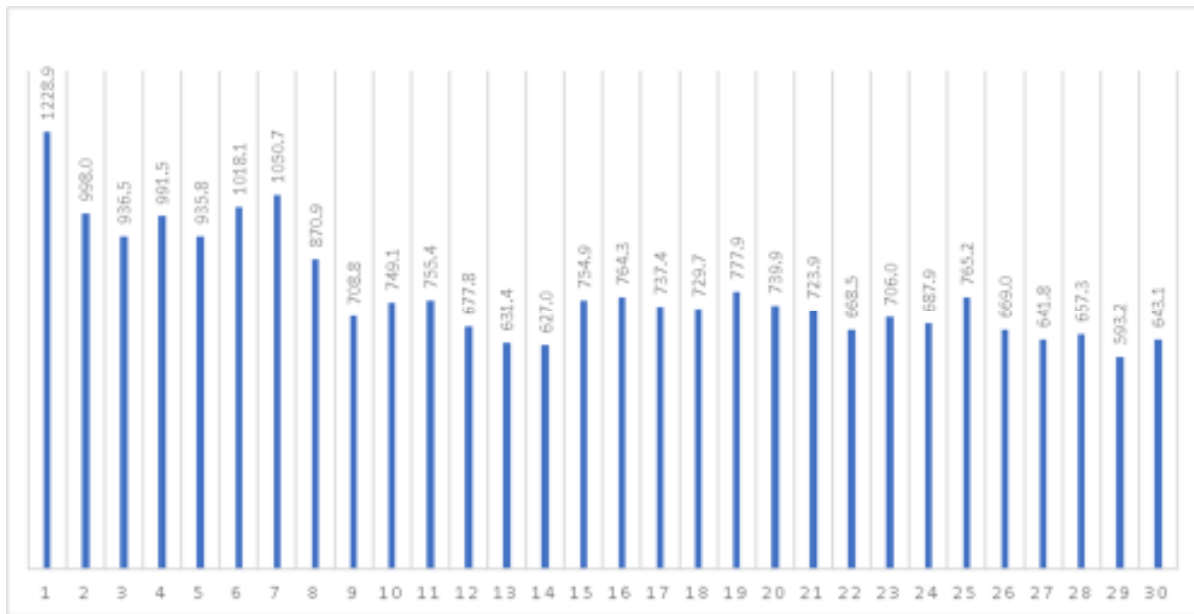




Σχήμα 2.6: Ημερήσια ζήτηση ενέργειας (kWh), για τον μήνα Μάρτιο

### Περίπτωση εορτασμού του Πάσχα

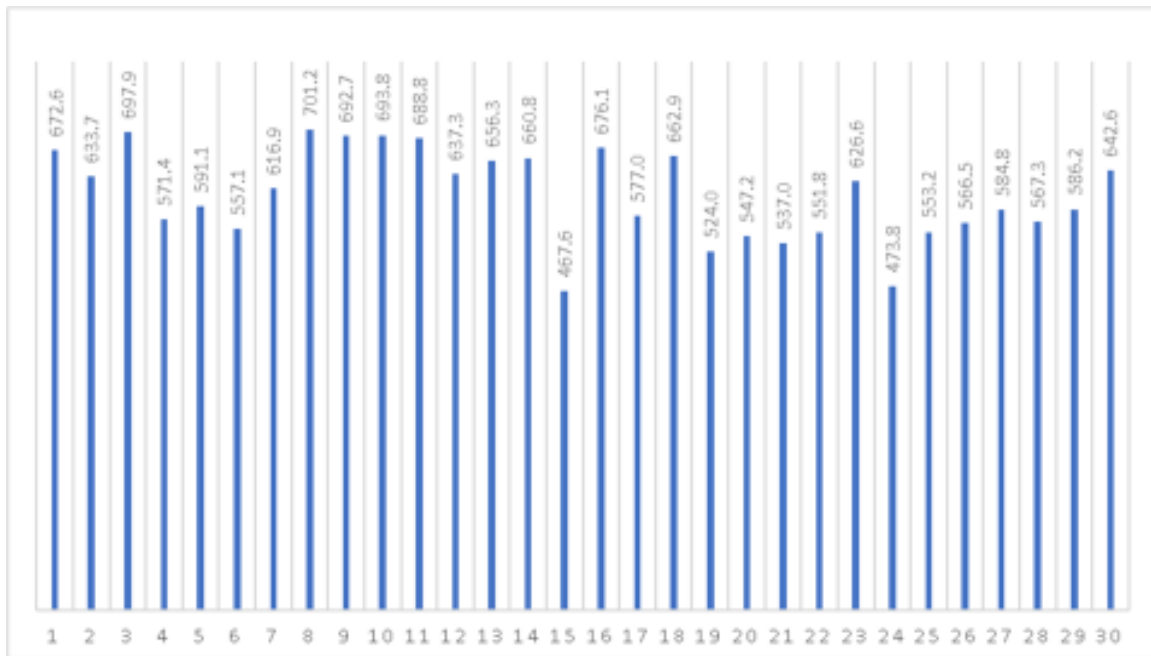
Για το μήνα Απρίλιο η μέση ημερήσια ζήτηση διαμορφώνεται στις 781,3 kWh. Ιδιαίτερα σε αυτή την περίπτωση κρίνεται επιβεβλημένο να ληφθεί υπόψη το διάστημα από 1 έως 7 Απριλίου (Σχήμα 2.7), καθώς τότε είναι η Μεγάλη Εβδομάδα, κατά την οποία υπάρχει έντονη θρησκευτική δραστηριότητα, κάθε ημέρα. Το διάστημα αυτό εμφανίζονται οι μέγιστες ηλεκτρικές καταναλώσεις, ενώ χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι η ημερήσια ζήτηση για τις υπόλοιπες ημέρες του μήνα κυμαίνεται σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και για τον Απρίλιο φαίνεται πως ο εορτασμός επηρεάζει την ζήτηση της μονής σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 2.7: Ημερήσια ζήτηση ενέργειας (kWh), για τον μήνα Απρίλιο

### Περίπτωση εορτασμού της 24<sup>ης</sup> Ιουνίου

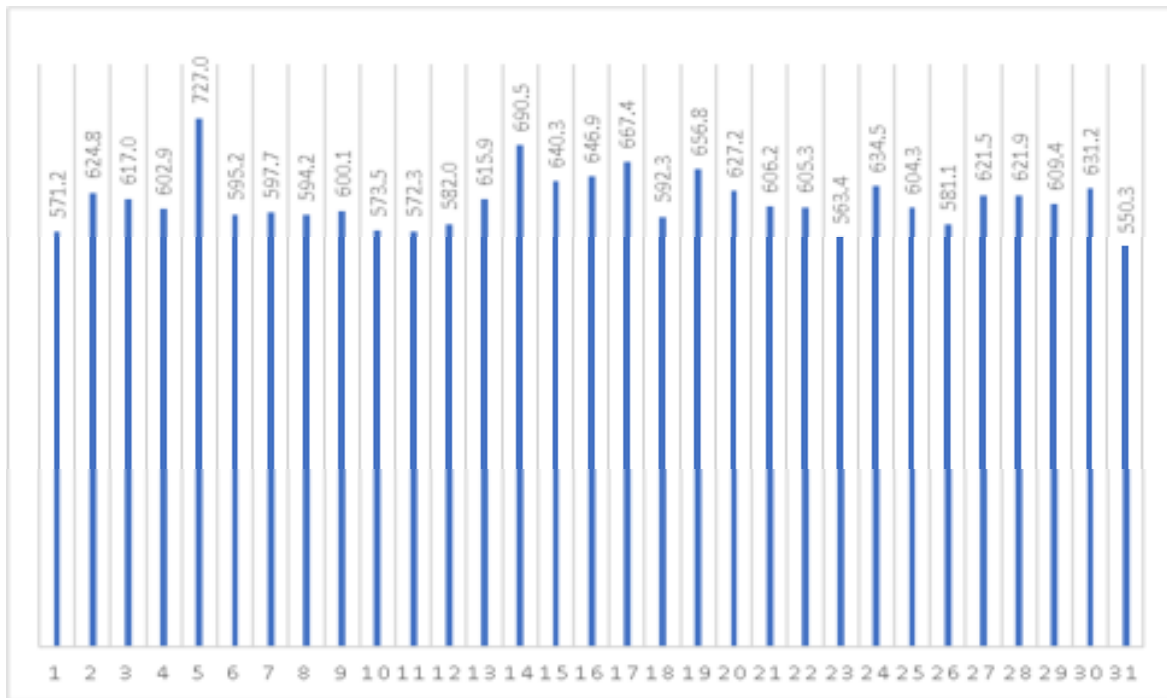
Η μέση ημερήσια ζήτηση για το μήνα Ιούνιο κυμαίνεται στις 607,2 kWh. Η ζήτηση που εμφανίζεται στις 24 Ιουνίου είναι ιδιαίτερα χαμηλή (δεύτερη μικρότερη του μήνα), ενώ η ζήτηση την αμέσως προηγούμενη ημέρα (23 Ιουνίου) εάν και είναι σαφώς υψηλότερη, δεν επιτρέπει την εξαγωγή άμεσου συμπεράσματος, όπως είχε συμβεί στις προηγούμενες περιπτώσεις. Η ζήτηση για αυτό το μήνα είναι αυξημένη κατά το πρώτο δεκαπενθήμερό του και έπειτα κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Παρατηρώντας τις τιμές που λαμβάνει η ζήτηση το διάστημα 19-29 Ιουνίου (Σχήμα 2.8), μέσα στο οποίο συμπεριλαμβάνεται η εξεταζόμενη περίπτωση, αυτές κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα. Εξαιρέση αποτελεί η 23η Ιουνίου, η παραμονή δηλαδή της εορτής, η ζήτηση της οποίας λαμβάνει την υψηλότερη τιμή εντός του διαστήματος αυτού. Αυτό ενισχύει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη και των προηγούμενων θρησκευτικών εορτών, ότι αποτελούν δηλαδή αιτία που οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 2.8: Ημερήσια ζήτηση ενέργειας (kWh), για τον μήνα Ιούνιο

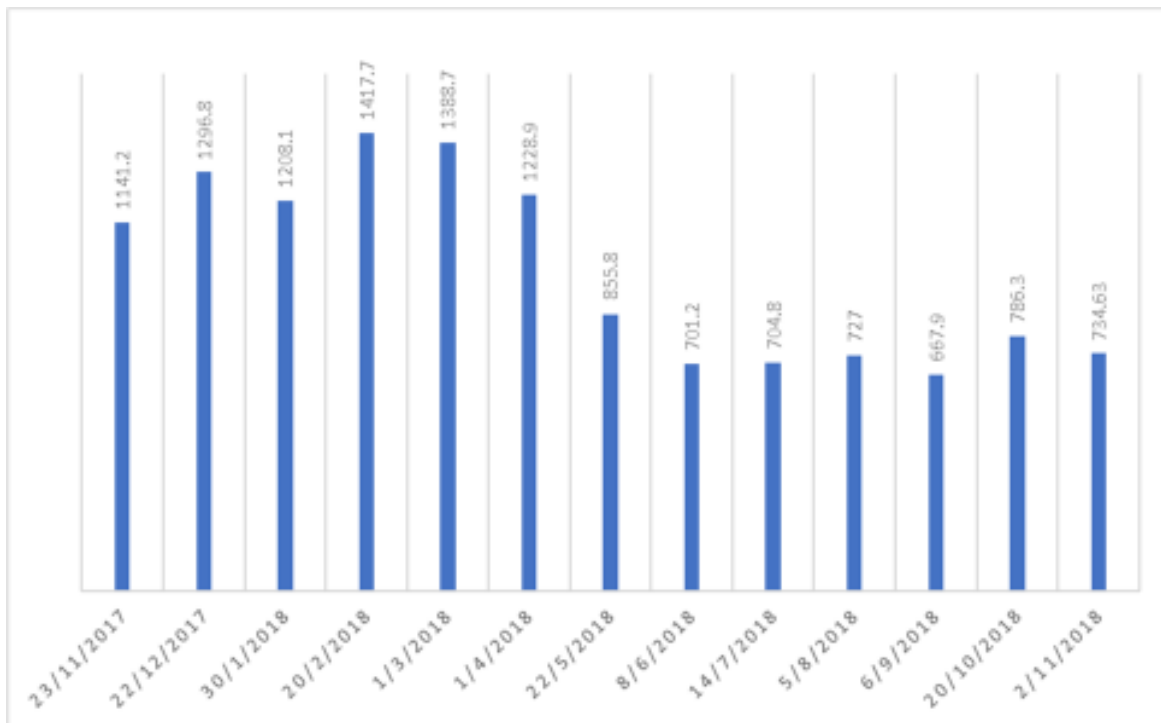
### Περίπτωση εορτασμού 15<sup>ης</sup> Αυγούστου

Η τελευταία περίπτωση που εξετάζεται είναι αυτή της 15ης Αυγούστου. Για τον μήνα Αύγουστο η μέση ημερήσια ζήτηση κυμαίνεται στις 613,7 kWh. Υψηλή εμφανίζεται η ζήτηση για την 14η Αυγούστου, την παραμονή της εορτής η οποία αποτελεί και τη δεύτερη μεγαλύτερη σε τιμή (690,5 kWh ) για τον εξεταζόμενο μήνα (Σχήμα 2.9). Υψηλή επίσης παρουσιάζεται και η τιμή της ζήτησης για την ίδια την ημέρα του εορτασμού ( 640,3 kWh ). Και σε αυτή την περίπτωση επομένως εμφανίζεται η ένδειξη πως η ύπαρξη γεγονότος θρησκευτικού χαρακτήρα οδηγεί σε αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, τη μονή.



Σχήμα 2.9: Ημερήσια ζήτηση ενέργειας (kWh), για τον μήνα Αύγουστο

Τέλος για κάθε μήνα υπολογίστηκε η μέγιστη ζήτηση ενέργειας, καθώς και ποια ημέρα του μήνα εμφανίζεται (Σχήμα 2.10). Η μέγιστη ημερήσια ζήτηση του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος εμφανίζεται στις 20 Φεβρουαρίου και ανέρχεται σε 1417,7 kWh



Σχήμα 2.10: Μέγιστη ζήτηση ενέργειας (kWh), ανά μήνα

## 2.4. Σύνοψη- Συμπεράσματα

Καταρχήν επιβεβαιώνεται ο επικουρικός ρόλος των Η/Ζ κατά τη διάρκεια του έτους και ο κύριος ρόλος του ΜΥΗΣ στην κάλυψη των συνολικών αναγκών της μονής σε ηλεκτρική ενέργεια. Η συνεισφορά του ΜΥΗΣ είναι συντριπτική κατά το διάστημα Μάρτιος- Ιούνιος, ενώ παραμένει πολύ υψηλή, έναντι των Η/Ζ και τους μήνες Φεβρουάριο, Ιούλιο και Οκτώβριο. Αυτό φανερώνει την επάρκεια παροχτετευτικότητας όγκου νερού από τον παρακείμενο χείμαρρο «Αεροπόταμο» και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Τα Η/Ζ ξεπερνούν σε παραγωγή τον ΜΥΗΣ για τους μήνες Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο, ενώ για τον Ιανουάριο η παραγωγή ισομοιράζεται. Για το Νοέμβριο του 2017, όσο και του 2018, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα καθώς αποτελούν την περίοδο έναρξης και λήξης των καταγραφών και έχει καταμετρηθεί μικρός αριθμός δεδομένων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι πρόκειται για χώρο θρησκευτικής λατρείας, άρα υπεισέρχεται ο θρησκευτικός παράγοντας. Με βάση την ανάλυση των δεδομένων που παρουσιάστηκε παραπάνω, φαίνεται ότι η ζήτηση της μονής αυξάνεται κατά τη διάρκεια των θρησκευτικών εορτών. Επίσης ο ασκητικός τρόπος ζωής, περιλαμβάνει αρκετές στερήσεις και αποκλείει «πολυτέλειες», ή τις περιορίζει πολύ, όπως η χρήση κλιματιστικών το καλοκαίρι που αυξάνουν τη ζήτηση ενέργειας, καθώς και πληθώρα άλλων ηλεκτρικών συσκευών που συναντάμε σε έναν οποιοδήποτε οικισμό.

Τέλος πρέπει να υπογραμμισθεί ότι τα τελευταία χρόνια στη μονή λαμβάνουν χώρα εξωτερικές εργασίες (συντήρηση, ανακατασκευή) που απαιτούν σημαντικές ενεργειακές καταναλώσεις και σε κάποιο βαθμό «αλλοιώνουν» τις συνήθειες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια. Παρόλα αυτά λόγω της ιστορικότητας της μονής δεν γίνεται να αντιμετωπιστούν ως ένα προσωρινό φαινόμενο, καθώς είναι αναγκαίο σε βάθος χρόνου να υπάρχει πρόβλεψη ενεργειακής εξασφάλισης για την πραγματοποίησή τους, δεδομένης της έλλειψης διασύνδεσης στο κεντρικό σύστημα διανομής ενέργειας. Άρα η μονή πρέπει να είναι σε θέση να εξυπηρετεί και αυτό το σενάριο σε οποιαδήποτε προσπάθεια διαστασιολόγησης ενός αυτόνομου συστήματος.

## Κεφάλαιο 3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ - ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

### 3.1.Συνιστώσες και παράμετροι προσομοίωσης του συστήματος

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται η μαθηματική διατύπωση της λειτουργίας των αυτόνομων συστημάτων που μελετώνται. Στόχος δεν είναι να παρουσιαστούν αναλυτικά μία προς μία οι μαθηματικές εξισώσεις, αλλά οι πιο βασικές, για να γίνει πιο κατανοητή η ποιοτική λειτουργία τους.

Για εποπτικούς λόγους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συμβολισμοί και η σημασία των δεικτών, των σταθερών και των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τη μαθηματική περιγραφή του εκάστοτε συστήματος.

#### Δείκτες

$t$  : Χρονικό βήμα 10 min της ώρας

#### Σταθερές

$P_{SOL}(t)$  : Μέγιστη δυνατή παραγωγή φ/β το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  βάσει ηλ. ακτ. ( $kW$ )

$E_{bat\_max}$  : Ονομαστική χωρητικότητα μπαταρίας ( $kWh$ )

$P_{bat\_max}$  : Μέγιστη ισχύς μπαταρίας ( $kW$ )

$V$  : Όγκος ταμιευτήρα ( $m^3$ )

$V_{max}$  : Μέγιστος δυνατός όγκος νερού στον ταμιευτήρα ( $m^3$ )

$Dt$  : Χρονικό διάστημα βήματος σε ώρες ( $h$ )

#### Μεταβλητές

$P_d(t)$  : Ζήτηση ισχύος της μονής (φορτίο) το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  ( $kW$ )

$P_{out\_SOL}(t)$  : Παραγωγή του Φ/Β το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  ( $kW$ )

$E_{bat}(t)$  : Χωρητικότητα της μπαταρίας το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  ( $kWh$ )

$V(t)$  : Όγκος νερού στον ταμιευτήρα το τρέχον δεκάλεπτο ( $m^3$ )

- $soc(t)$  : Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας (state of charge,  $\leq 1$ )
- $sos(t)$  : Κατάσταση δεξαμενής (state of storage,  $\leq 1$ )
- $F_s(t)$  : Όγκος νερού που αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα λόγω λειτουργία της αντλίας το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  ( $m^3/10 min$ )
- $P_{bat}(t)$  : Ισχύς της μπαταρίας το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  ( $kW$ )
- $F_d(t)$  : Όγκος νερού που παρέχει ο ταμιευτήρας (έναρξη λειτουργίας υδροστροβίλου) το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  ( $m^3/10 min$ )
- $P_{pump}(t)$  : Ισχύς αντλίας το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  ( $kW$ )
- $P_{hydro}(t)$  : Ισχύς υδροστροβίλου το τρέχον δεκάλεπτο  $t$  ( $kW$ )

### 3.1.1 Διατύπωση λειτουργικών περιορισμών του συστήματος

#### Ισοζύγιο ισχύος

Για κάθε δεκάλεπτο του εξεταζόμενου διαστήματος, πρέπει να τηρείται το ισοζύγιο ισχύος, για το κάθε αυτόνομο σύστημα που μελετάται. Αυτό ορίζεται ως εξής:

- Περίπτωση αυτόνομου συστήματος Φ/Β σταθμού και μπαταριών

$$P_{out\_SOL}(t) = P_d(t) - P_{bat}(t)$$

όπου

$P_{bat}(t) > 0$  όταν η μπαταρία εκφορτίζεται

$P_{bat}(t) < 0$  όταν η μπαταρία φορτίζεται

- Περίπτωση αντλησιοταμίευσης (με χρήση Φ/Β σταθμού)

$$P_{out\_SOL}(t) = P_d(t) + P_{pump}(t) - P_{hydro}(t)$$

Στο ισοζύγιο ισχύος λαμβάνονται υπόψη και οι βαθμοί απόδοσης των μετατροπέων καθώς και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της μπαταρίας, για το σύστημα Φ/Β και μπαταρίας, καθώς επίσης και οι βαθμοί απόδοσης του υδροστροβίλου και της αντλίας, όμως δεν αποτυπώνονται στις παραπάνω εξισώσεις για λόγους απλούστερης διατύπωσης.

## Εξισώσεις ταμιευτήρα

Για κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης υπολογίζεται ο όγκος του διαθέσιμου νερού του ταμιευτήρα, ανάλογα με την λειτουργία του υδροστροβίλου ή της αντλίας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε η παραδοχή ότι δεν υπάρχει περιορισμός στην ταχύτητα εισόδου ή εξόδου του νερού από τον ταμιευτήρα.

$$V(t) = V(t - 1) + F_s(t) - F_d(t)$$

$F_s(t)$  όταν ο ταμιευτήρας αποθηκεύει νερό λόγω πλεονάζουσας παραγωγής του Φ/Β, όταν δηλαδή τίθεται σε λειτουργία η αντλία

$F_d(t)$  όταν ο ταμιευτήρας παρέχει νερό για κάλυψη της ζήτησης, τίθεται δηλαδή σε λειτουργία ο υδροστροβίλος

Για λόγους καλύτερης εποπτείας εισάγεται μία μεταβλητή που αποτυπώνει την κατάσταση της δεξαμενής (state of storage) για κάθε δεκάλεπτο:

$$sos(t) = \frac{V(t)}{V_{max}}$$

Ο όγκος του νερού του ταμιευτήρα περιορίζεται από τα φυσικά του όρια:

$$sos(t) \leq sos_{max}$$

$$sos(t) \geq sos_{min}$$

Η έννοια του κατώτατου ορίου ( $sos_{min}$ ) σημαίνει ότι ο ταμιευτήρας δεν αδειάζει ποτέ τελείως για λόγους αντιμετώπισης έκτακτων αναγκών.

## Εξισώσεις μπαταρίας

Σε κάθε δεκάλεπτο υπολογίζεται η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας ως εξής:

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t - 1) - P_{bat}(t) \times Dt$$

Η μέγιστη ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης δεν πρέπει να ξεπερνά τα κατασκευαστικά όρια της μπαταρίας:

$$|P_{bat}(t)| \leq P_{bat\_max}$$

Ορίζεται μεταβλητή που δείχνει την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (state of charge)



$$soc(t) = \frac{E_{bat}(t)}{E_{bat,max}}$$

Η μπαταρία δεν πρέπει να φορτίζεται και να εκφορτίζεται πέρα από κάποια όρια, καθώς αυτό έχει αρνητική στο χρόνο ζωής της.

$$soc(t) \leq soc_{max}$$

$$soc(t) \geq soc_{min}$$

### Λειτουργία Φ/B σταθμού

Η παραγωγή του Φ/B σταθμού μπορεί είναι το πολύ ίση με αυτή που του επιτρέπει η εγκατεστημένη ισχύς του, δεδομένης της ηλιακής ακτινοβολίας για το τρέχον δεκάλεπτο

$$P_{out,SOL}(t) \leq P_{SOL}(t)$$

#### 3.1.2. Απλή στρατηγική ελέγχου

Η διαχείριση των συνιστωσών των εξεταζόμενων συστημάτων, διαμορφώνεται χονδρικά ως εξής:

- Στην περίπτωση που η διαθέσιμη ισχύς του Φ/B σταθμού είναι τουλάχιστον ίση με την ισχύ που απαιτείται για την κάλυψη της τρέχουσας ζήτησης, τότε αυτή αξιοποιείται ως εξής:
  1. Φόρτιση της μπαταρίας στην περίπτωση συστήματος Φ/B σταθμού και μπαταριών
  2. Παροχή νερού στον ταμιευτήρα, δηλαδή έναρξης λειτουργίας του αντλιοστασίου στην περίπτωση της αντλιοσταμείευσης
- Αντίστοιχα στην περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμη ισχύς από το Φ/B σταθμό ή αν υπάρχει αλλά δεν επαρκεί για την κάλυψη της τρέχουσας ζήτησης, τότε αναλαμβάνουν οι εξής συνιστώσες:
  1. Εκφόρτιση μπαταρίας στην περίπτωση συστήματος Φ/B σταθμού και μπαταριών
  2. Παροχή νερού από τον ταμιευτήρα, δηλαδή έναρξη λειτουργίας του υδροστροβίλου

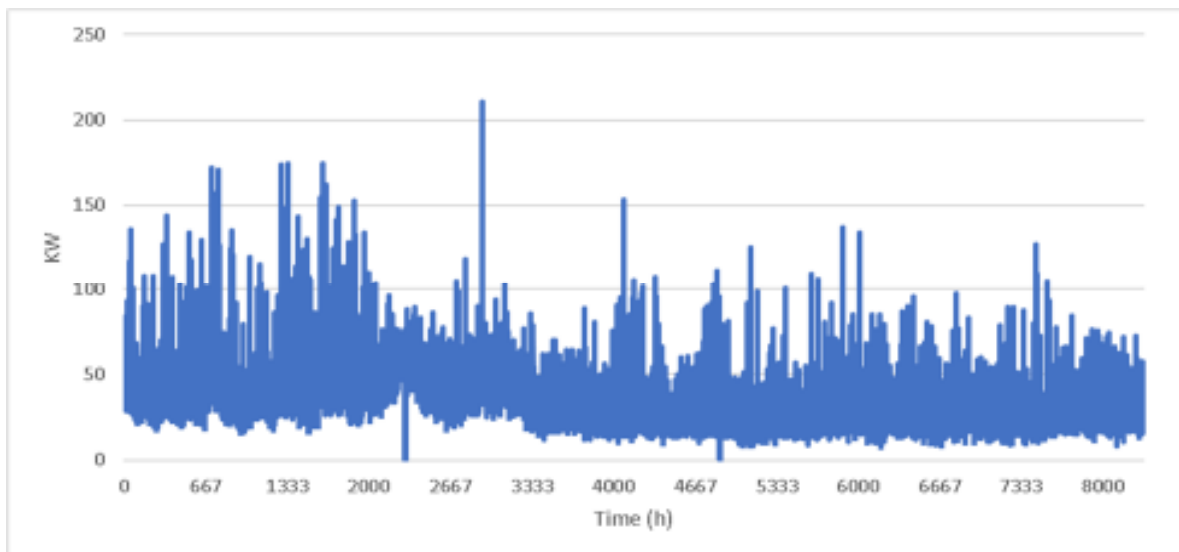
## 3.2. Δεδομένα εισόδου

Το μαθηματικό μοντέλο η διατύπωση του οποίου προηγήθηκε , εφαρμόζεται για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός αυτόνομου συστήματος αποτελούμενο από Φ/Β σταθμό και μπαταρίες, καθώς και για ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης με Φ/Β σταθμό, με σκοπό την εφαρμογή τους στη μονή Διονυσίου στο Άγιο Όρος. Σκοπός της εργασίας είναι η απαιτούμενη διαστασιολόγηση αυτών των αυτόνομων συστημάτων, ώστε να επιτυγχάνεται η ενεργειακή αυτονομία της μονής με το χαμηλότερο δυνατό κόστος παραγωγής.

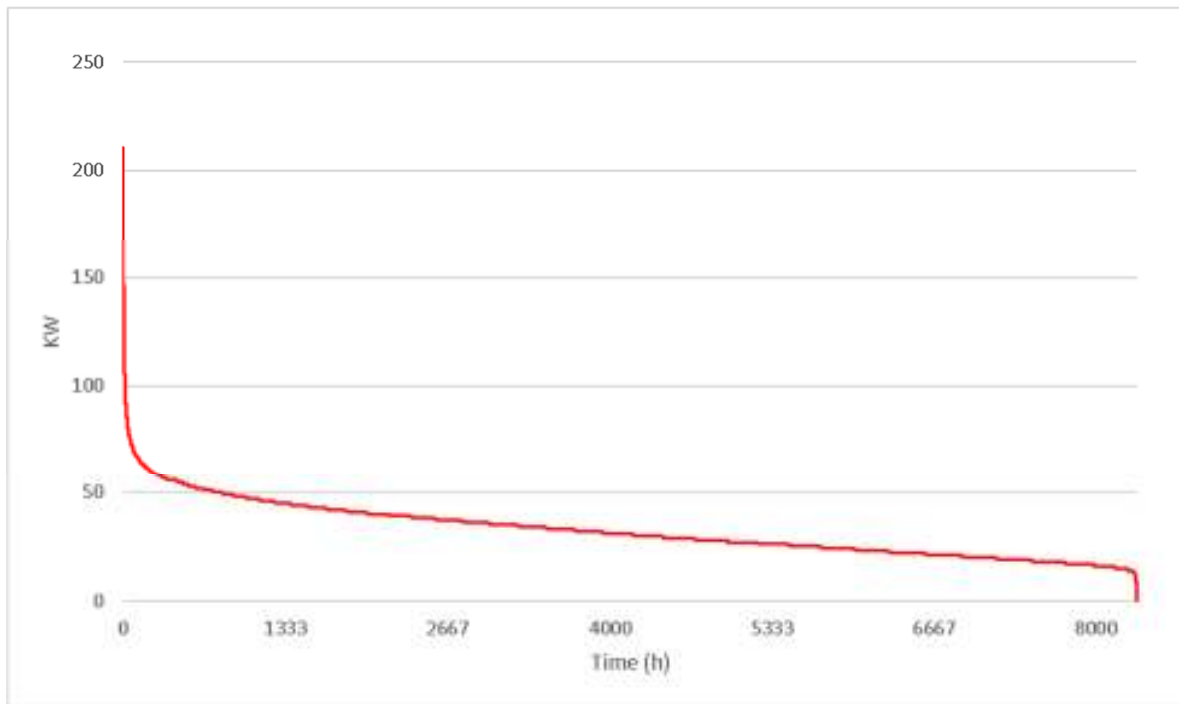
Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις παραμέτρους και στα δεδομένα εισόδου που λήφθηκαν υπόψη κατά την προσομοίωση της λειτουργίας των αυτόνομων συστημάτων όπως αυτά έχουν περιγραφεί.

### 3.2.1. Χρονοσειρά ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιείται η διαθέσιμη χρονοσειρά ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος της μονής με βήμα 10λέπτο. Παρατίθενται η χρονοσειρά ζήτησης της μονής (Σχήμα 3.1), καθώς και η καμπύλη διάρκειας του φορτίου (Σχήμα 3.2) για το εξεταζόμενο διάστημα



Σχήμα 3.1: Ετήσια χρονοσειρά ζήτησης ισχύος της μονής



Σχήμα 3.2: Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου

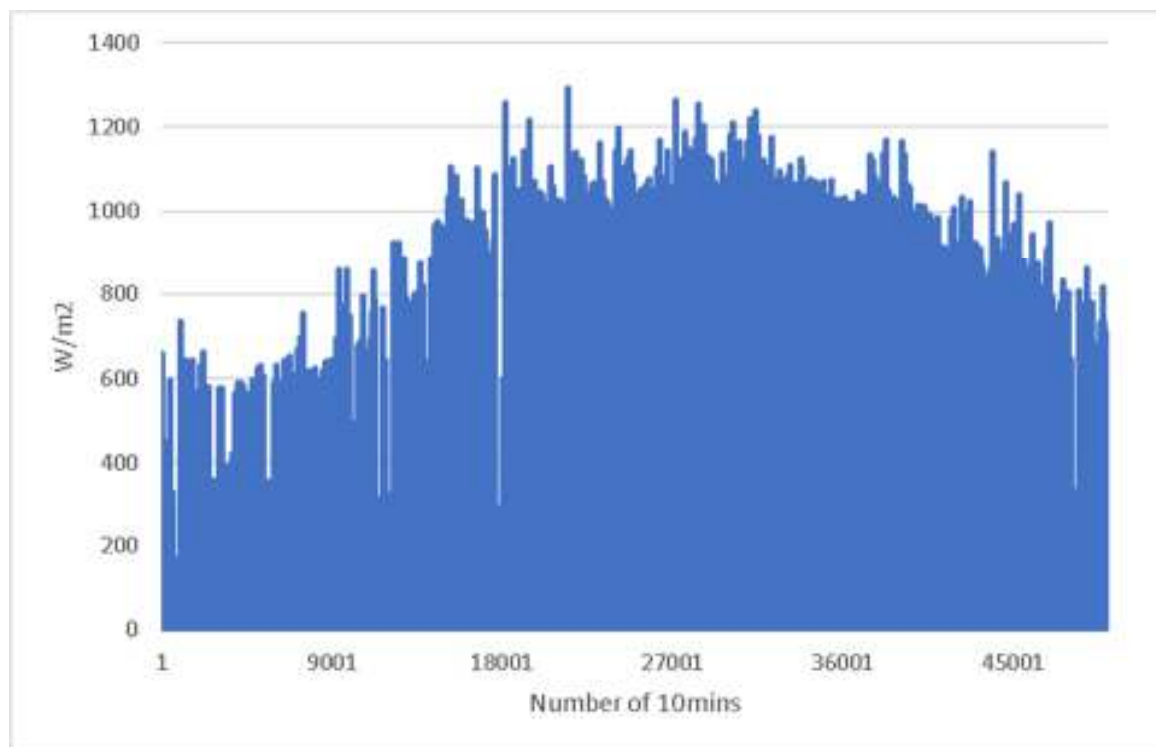
### 3.2.2. Φωτοβολταϊκός σταθμός

Στα πλαίσια των προσομοιώσεων με σκοπό τη διαστασιολόγηση του συστήματος, χρησιμοποιούνται Φ/Β πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου τα χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τύπος πλαισίου	Module 60 στοιχείων (cells) μονοκρυσταλλικού πυριτίου
Μέγιστη ισχύς πλαισίου	300 Wp
Φωτοβολταϊκή επιφάνεια πλαισίου	1,63 m <sup>2</sup>
Κλίση πλαισίων – προσανατολισμός	29°, Νότιος
Απόδοση Φωτοβολταϊκών στοιχείων	20,20%
Απόδοση Φωτοβολταϊκού πλαισίου	18,5 %

Με βάση τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων και τη διαθέσιμη χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 3.3), υπολογίζεται για κάθε δεκάλεπτο του έτους η παραγόμενη ισχύς από τον Φ/Βσταθμό.



Σχήμα 3.3: Ετήσια χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας με βήμα 10λέπτου

### 3.2.3. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας - Μπαταρίες

Οι μπαταρίες αποτελούν βασική συνιστώσα ενός αυτόνομου συστήματος και η χρήση τους είναι απαραίτητη για την κάλυψη της ζήτησης κατά τα διαστήματα αδυναμίας παραγωγής του Φ/Β σταθμού. Οι μπαταρίες που επιλέγονται είναι ιόντων-λιθίου. Συνήθως σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας επιλέγονται ολόκληρα «κοντέινερς» που αποτελούνται από συστοιχίες μπαταριών. Ως μπαταρία δηλαδή θεωρείται ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης. Οι βασικές παράμετροι προς διερεύνηση είναι η μέγιστη ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης και η χωρητικότητα της μπαταρίας. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης των μπαταριών λαμβάνεται ίσος με  $n_{bat} = 90\%$  ενώ ο βαθμός απόδοσης του DC-AC μετατροπέα ίσος με  $n_{DC-AC} = 95\%$ . Το κατώτατο και το ανώτατο επίπεδο φόρτισης των μπαταριών ορίζονται σε:  $SOC_{min} = 20\%$  και  $SOC_{max} = 95\%$  αντίστοιχα.

Οι μπαταρίες λιθίου επιλέγεται συνήθως να λειτουργούν σε βάθος εκφόρτισης (DOD) 80%. Ο αναμενόμενος χρόνος ζωής τους, φτάνει τα 15 έτη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία λαμβάνεται υπόψη η αντικατάστασή τους το 12<sup>ο</sup> έτος λειτουργίας τους.

### 3.2.4. Ταμιευτήρας συστήματος αντλησιοταμίευσης

Οι ταμιευτήρες είναι αναγκαία συνιστώσα ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης. Στην περίπτωση της μονής Διονυσίου, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, επιλέγεται η λύση διαστασιολόγησης ενός μόνο ταμιευτήρα. Λόγω της μορφολογίας του εδάφους κρίνεται δύσκολη η υλοποίηση δύο δεξαμενών και για το λόγο αυτό σαν κατάντη ταμιευτήρας επιλέγεται να αξιοποιηθεί η θάλασσα. Ταυτόχρονα θα διερευνηθεί και η ελάχιστη δυνατή διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα, για πρόληψη της περίπτωσης κατασκευαστικών περιορισμών λόγω της γεωγραφικής θέσης της μονής.

Η αξιοποίηση της θάλασσας ως κατάντη δεξαμενή- ταμιευτήρα, έχει βρει πρακτική εφαρμογή στην περίπτωση του αντλησιοταμιευτικού έργου στην Okinawa της Ιαπωνίας. Πρόκειται για σύστημα αντλησιοταμίευσης, το πρώτο στον κόσμο, που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό και λειτουργεί από το 1999, ισχύος 30 MW με διαθέσιμο ύψος πτώσης 140m. Βέβαια πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι η χρήση θαλασσινού νερού δημιούργησε αρκετά προβλήματα στο έργο όπως είναι η διάβρωση του μηχανολογικού εξοπλισμού, προσκόλληση θαλάσσιων οργανισμών στο σύστημα των αγωγών κλπ. Δεδομένων λοιπόν των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν σε ένα ήδη πραγματοποιημένο έργο, λαμβάνονται υπόψη αυξημένα κόστη συντήρησης ως μέτρο πρόληψης και αντιμετώπισης των αντίστοιχων προβλημάτων που αναμένεται να παρουσιαστούν.

Τέλος βάσει των πληροφοριών για την τοποθεσία της μονής Διονυσίου, κρίνεται εύλογο το ύψος πτώσης των 100m το οποίο και χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία της διαστασιολόγησης του συστήματος.

### 3.2.5. Οικονομικά στοιχεία και υπολογισμοί

Με δεδομένο το αρχικό επενδυτικό κόστος για το εκάστοτε σύστημα καθώς επίσης και τις απαιτούμενες ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης, από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, μπορεί να υπολογιστεί άμεσα το συνολικό ειδικό κόστος για την πλήρη ικανοποίηση της ζήτησης της μονής, σε €/kWh, καθώς και η συμμετοχή σε αυτό των επιμέρους συνιστωσών κόστους. Υπολογίζεται επομένως το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης ως εξής:

$$\text{Ισοδύναμο ετήσιο κόστος} = \frac{k(1+k)^n}{(1+k)^n - 1} * \left[ K_o + \sum_{t=1}^n \frac{\Delta\Delta_t}{(1+k)^t} \right]$$

όπου:

$k$  : Το επιτόκιο της αναγωγής

$n$  : Η θεωρούμενη διάρκεια ζωής του συστήματος σε έτη

$K_o$  : Το αρχικό κόστος επένδυσης

$\Delta\Delta_t$  : Οι ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης

Ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης εκφράζει την ετήσια επιβάρυνση από το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης, ενώ ο δεύτερος της ετήσιες λειτουργικές δαπάνες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τις εκτιμήσεις κόστους παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Δεδομένα κόστους των συνιστωσών των εξεταζόμενων συστημάτων

Δεδομένα κόστους	
Συνολικό κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών (€/kW):	900
Κόστος μπαταριών (€/kWh)	220
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος μπαταριών (€/kW)	150
Κόστος αντλησιοταμίευσης (€/kW):	650
Κόστος ταμιευτήρα (€/m <sup>3</sup> ):	2
Επιτόκιο αναγωγής:	8%
Οικονομική διάρκεια ζωής εγκατάστασης Φ/Β-συσσωρευτών	20 έτη
Οικονομική διάρκεια ζωής εγκατάστασης αντλησιοταμίευσης	25 έτη

Μετά τον υπολογισμό του ισοδύναμου ετήσιου κόστους από την παραπάνω σχέση, το μέγεθος αυτό διαιρείται με τη συνολική ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της μονής και προκύπτει το αντίστοιχο σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh).

Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό του κόστους περιλαμβάνονται και οι δαπάνες περιοδικής αντικατάστασης των μπαταριών, ανάλογα με την κατά περίπτωση εκτιμώμενη διάρκεια ζωής τους, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της ποιοτικής 3.2.3.

## Κεφάλαιο 4 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### 4.1.Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις ετήσιες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, για διάφορα σενάρια, των δύο αυτόνομων συστημάτων που έχουν περιγραφεί. Μέσω των προσομοιώσεων αναζητείται η απαιτούμενη διαστασιολόγηση των παραμέτρων των εξεταζόμενων συστημάτων, η λειτουργία τους από ενεργειακή σκοπιά, αναλύονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και εξετάζεται η επίδραση των διάφορων παραμέτρων διαστασιολόγησης στο κόστος. Για το κάθε σύστημα, η διαστασιολόγηση γίνεται με κριτήριο την επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας της μονής, δηλαδή την μη εμφάνιση περιστατικών αστοχίας στο εξεταζόμενο διάστημα. Στόχος είναι η σύγκριση των σεναρίων που προκρίνονται για την κάθε περίπτωση και τελικά η επιλογή του βέλτιστου συστήματος με οικονομικά κριτήρια.

Η ενεργειακή προσομοίωση της λειτουργίας των συστημάτων πραγματοποιείται με χρονικό βήμα ίσο με 10 min. Η επιλογή του βήματος έγινε σε επίπεδο μικρότερο της ώρας προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση της στοχαστικής φύσης της πρωτογενούς πηγής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ήλιος) στη λειτουργία και στη διαστασιολόγηση των συστημάτων. Ωστόσο εντός του διαστήματος αυτού δεν εξετάζονται δυναμικά φαινόμενα, δηλαδή θεωρείται σταθερή συμπεριφορά και λειτουργία των συστημάτων, συνεπώς όλα τα επιμέρους μεγέθη (παραγόμενη ισχύς των Φ/Β, ισχύς φορτίου, μπαταριών, ταμειυτήρα κλπ.) αποτελούν μέσες τιμές 10λέπτου.

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση της ικανοποίησης της ζήτησης της μονής, μέσω της εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού και χωρίς παράλληλη χρήση αποθηκευτικού μέσου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση μπαταριών λιθίου ως αποθηκευτικό μέσο και τέλος αυτά της περίπτωσης του συστήματος αντλησιοταμίευσης.

### 4.2. Η περίπτωση Φ/Β σταθμού, χωρίς αποθηκευτικό μέσο

Η πρώτη περίπτωση προς διερεύνηση είναι η δυνατότητα εξυπηρέτησης της ζήτησης της μονής με αντικατάσταση των Η/Ζ και του ΜΥΗΣ, από φωτοβολταϊκό σταθμό. Εξετάζονται σενάρια Φ/Β σταθμού διαφορετικής εγκατεστημένης ισχύος και για το κάθε ένα παρουσιάζεται η συνολική διαθέσιμη ενέργεια (MWh) για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα (Πίνακας 4.1). Παράλληλα παρουσιάζεται η πιθανότητα αστοχίας του κάθε σεναρίου, ο αριθμός των δεκαλέπτων δηλαδή που δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί το απαιτούμενο φορτίο της μονής, ως προς το συνολικό αριθμό δεκαλέπτων του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος.

Πίνακας 4.1: Σενάρια διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκού σταθμού

A/A Σεναρίων	Εγκ. ισχύς (kW)	Διαθέσιμη ενέργεια (MWh)	Πιθανότητα αστοχίας (%)
1	87.6	158.3	74.2
2	90	162.7	73.8
3	105	189.8	71.6
4	120	216.9	69.9
5	150	271.1	67.4
6	151.5	273.9	67.3
7	180	325.4	65.4
8	210	379.6	63.8
9	240	433.8	62.5
10	270	488.1	61.6
11	300	542.3	60.7
12	450	813.4	57.7

Από τα αποτελέσματα αρχικά προκύπτει πως για Φ/Β σταθμό εγκατεστημένης ισχύος από 151,5 kW (σενάριο 6) και μεγαλύτερης, η διαθέσιμη ενέργεια σε ετήσια βάση, υπερκαλύπτει την ζήτηση της μονής, που ανέρχεται σε 272,37 MWh. Όσο και να αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς, ακόμα και αν η ζήτηση υπερκαλύπτεται σαν σύνολο, τα περιστατικά αστοχίας του συστήματος παραμένουν πολύ υψηλά και μάλιστα το σύστημα εμφανίζει ανεπάρκεια ικανότητας εξυπηρέτησης του φορτίου για το 57,7% τουλάχιστον του εξεταζόμενου διαστήματος.

Αυτό είναι πλήρως αναμενόμενο καθώς για την επίτευξη του στόχου της αυτονομίας ενός συστήματος, δεν απαιτείται μόνο η κάλυψη της ζήτησης σε ετήσια βάση, αλλά πρέπει να μπορεί να ανταποκρίνεται άμεσα στις ημερήσιες διακυμάνσεις της ζήτησης. Ένας φωτοβολταϊκός σταθμός είναι αδύνατον να επιτύχει το στόχο αυτό, καθώς ακόμα και αν πληρούνται οι απαιτούμενες προϋποθέσεις (εγκατεστημένη ισχύς, σωστός προσανατολισμός πλαισίων, ικανοποιητική διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία κλπ.), δεν μπορεί να εξυπηρετεί τη ζήτηση σε συνθήκες έλλειψης ή μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας (νυχτερινές ώρες, ημέρες με νεφώσεις κλπ.). Απαιτείται επομένως η παρουσία ενός σωστά διαστασιολογημένου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.



### 4.3. Σύστημα Φ/Β σταθμού και μπαταριών

Στη συνέχεια εξετάζεται το σύστημα παραγωγής μέσω Φ/Β σταθμού και αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση μπαταριών. Η διαστασιολόγηση του συστήματος γίνεται με την προϋπόθεση να ικανοποιείται το κριτήριο της αυτονομίας, δηλαδή διερευνάται η απαραίτητη εγκατεστημένη ισχύς του Φ/Β σταθμού σε συνδυασμό με την απαιτούμενη χωρητικότητα μπαταρίας, προκειμένου το σύστημα να μην εμφανίζει περιστατικά αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης, κατά το εξεταζόμενο διάστημα, να μπορεί δηλαδή να ικανοποιεί τις διακυμάνσεις της ζήτησης στο χρονικό διάστημα που μελετάται. Μέσω των ετήσιων προσομοιώσεων προκύπτουν σενάρια που πληρούν αυτή την προϋπόθεση, για τα οποία παρουσιάζονται οι δείκτες λειτουργίας του συστήματος. Τέλος για το κάθε σενάριο υπολογίζεται το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh), προκειμένου να γίνει η τελική επιλογή του βέλτιστου σεναρίου. Τα πρώτα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

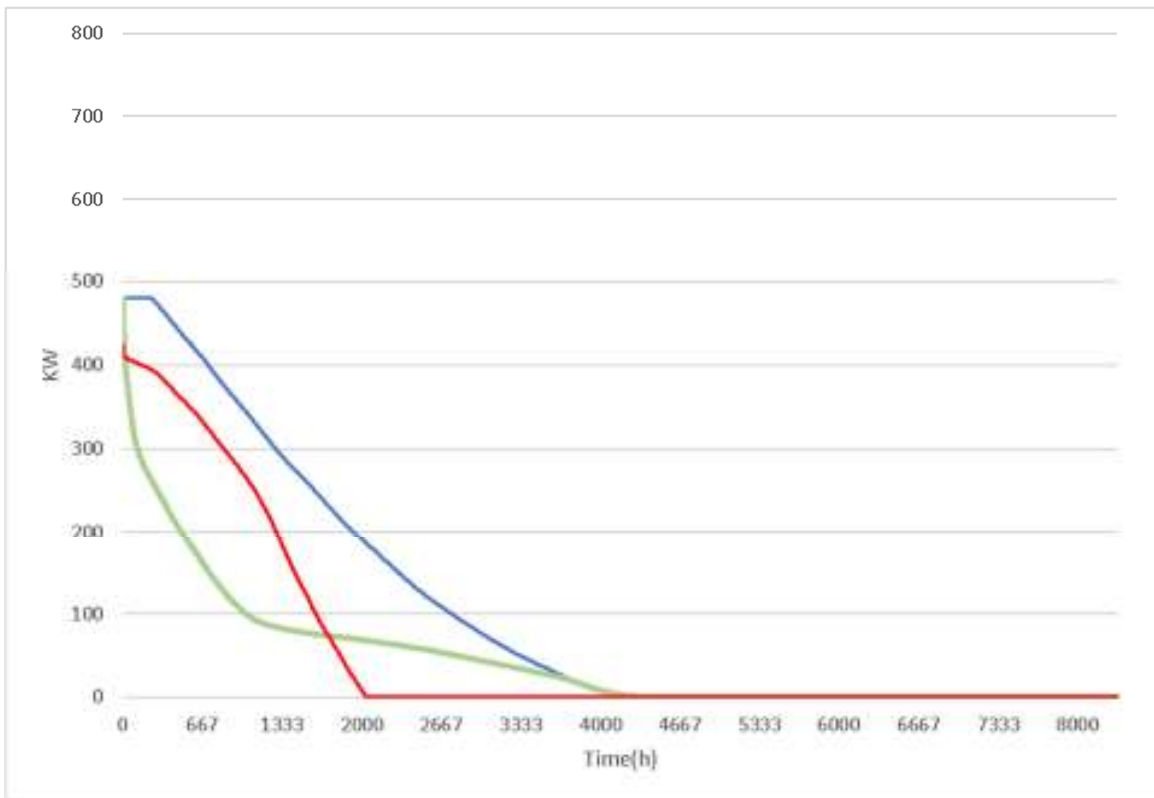
Πίνακας 4.2: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (kW)	480	540	600	660	690
Εγκατεστημένη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	9.6	6.2	4.6	3.8	3.4
Ωφέλιμη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	7.2	4.7	3.4	2.9	2.6
Ζήτηση ενέργειας (MWh)	272.4				
<b>Δείκτες λειτουργίας συστήματος</b>					
CF(%) Φ/Β	9.4	8.6	8.0	7.5	7.3
Διαθέσιμη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	867.7	976.1	1084.6	1193.0	1247.3
Παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	376.3	388.8	401.2	413.7	420.0
Ενέργεια από Φ/Β προς φορτίο (MWh)	121.2	122.5	123.6	124.5	124.9
Μέσο SoC μπαταρίας (%)	82.0	86.1	87.1	87.3	86.9
Ενέργεια από Φ/Β προς μπαταρίες (MWh)	255.1	266.2	277.7	289.3	295.1
Ενέργεια από μπαταρίες προς φορτίο (MWh)	151.1	149.9	148.8	147.9	147.5
Απορριπτόμενη ενέργεια Φ/Β (MWh)	491.3	587.4	683.3	779.3	827.3
Απορριπτόμενη ενέργεια (%)	56.6	60.2	63.0	65.3	66.3
Περιστατικά αστοχίας	0	0	0	0	0
Απαιτούμενες αντικατ. μπατ. στην 20ετία	1	1	1	1	1
<b>Οικονομικά στοιχεία</b>					
Σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh)	1.46	1.05	0.86	0.78	0.74

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ως προς τα πέντε σενάρια, η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των Φ/Β από τα 480 kW στα 690 kW, οδηγεί στη δυνατότητα μείωσης της απαιτούμενης χωρητικότητας των μπαταριών, από τις 9,6 kWh στις 3,4 kWh. Παράλληλα παρατηρείται μείωση του σταθμισμένου κόστους παραγόμενης ενέργειας από τα 1,46 €/kWh στα 0,74 €/kWh. Αυτό φανερώνει πως για το συγκεκριμένο εύρος τιμών, καθοριστικό παράγοντα στη διαμόρφωση του κόστους του συστήματος αποτελεί η χωρητικότητα των μπαταριών και κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των Φ/Β προκειμένου να μειωθεί το απαιτούμενο μέγεθος των μπαταριών.

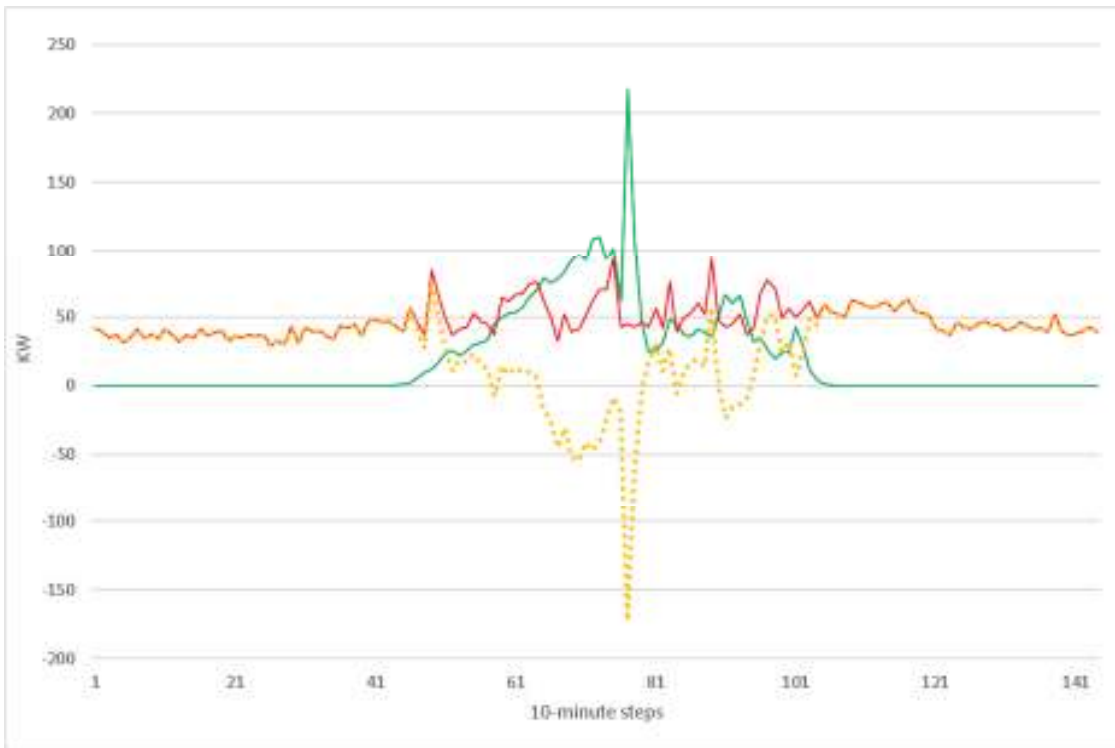
Ως προς τους δείκτες λειτουργίας είναι εμφανής η υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος, όπως αναμένεται σε ένα αυτόνομο σύστημα, μη διασυνδεδεμένου στο δίκτυο διανομής. Χαρακτηριστικό δείκτη αποτελεί η απορριπτόμενη ενέργεια, η οποία ξεπερνάει σε ετήσια βάση τη συνολική ζήτηση της μονής η οποία θα μπορούσε να παροχετευτεί «πωληθεί» στην περίπτωση δυνατότητας σύνδεσης της μονής στο δίκτυο διανομής.

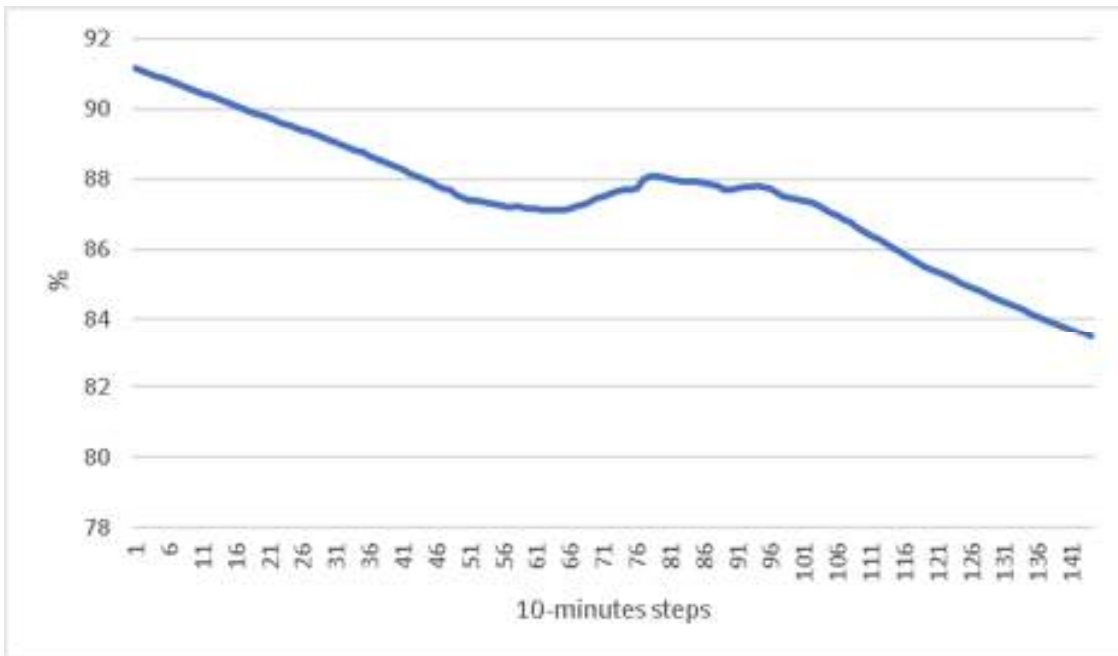
Στη συνέχεια παρουσιάζονται για το σενάριο 1, που είναι το σενάριο με την μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β, οι καμπύλες διάρκειας διαθέσιμης, παραγόμενης και απορριπτόμενης ισχύος Σχήμα 4.1, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις 23 Νοεμβρίου 2017 (ημέρα με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.2 καθώς και για τις 29 Σεπτεμβρίου 2018 (ημέρα με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία) Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.1: Καμπύλες διάρκειας: Διαθέσιμης ισχύος (μπλε), παραγόμενης ισχύος (πράσινο), απορριπτόμενης ισχύος (κόκκινο)

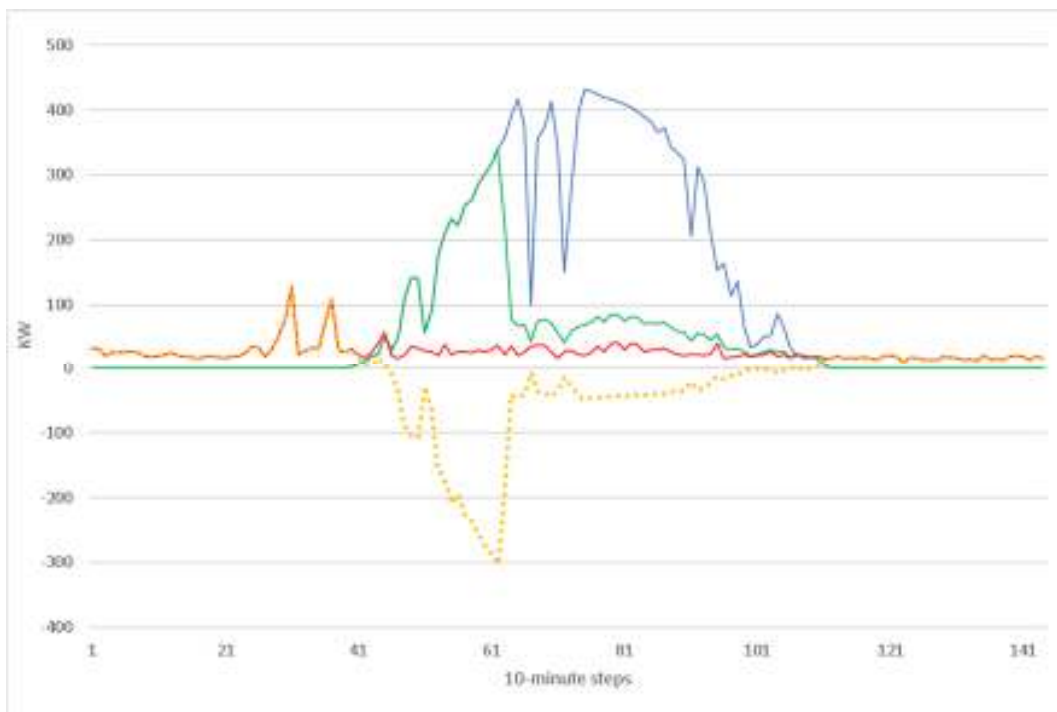
**Στηγμιότυπο 23 Νοεμβρίου 2017**

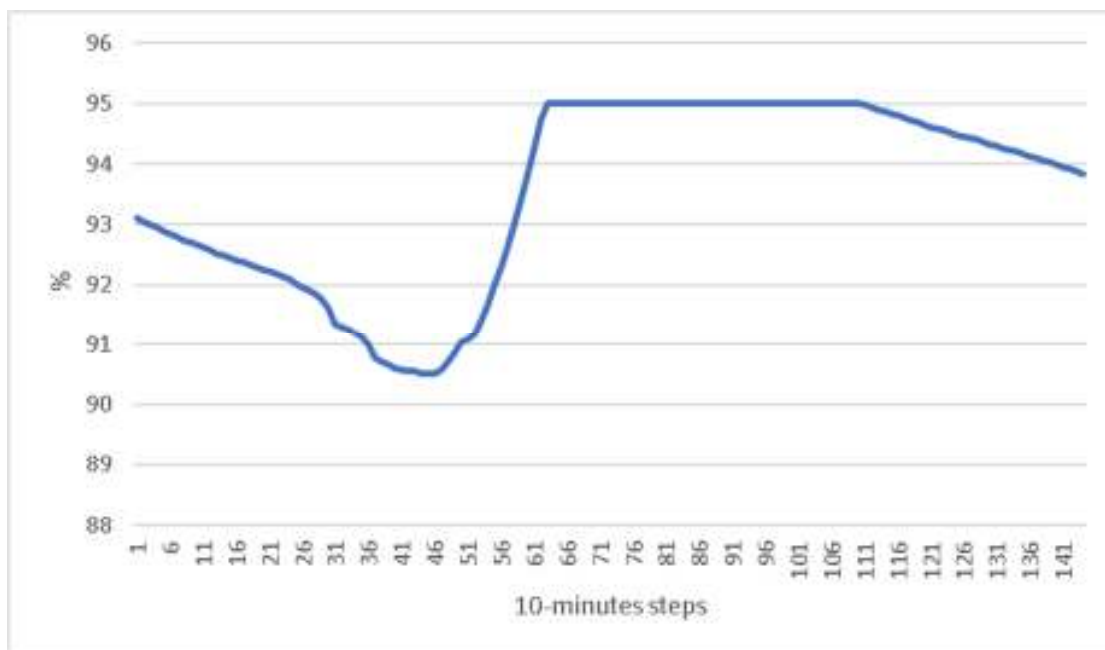




Σχήμα 4.2: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μπλε), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς μπαταρίας (διακ. πορτοκαλί), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας,

**Στιγμιότυπο 29 Σεπτεμβρίου 2018**





Σχήμα 4.3: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μπλε), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς μπαταρίας (διακ. πορτοκαλί), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας,

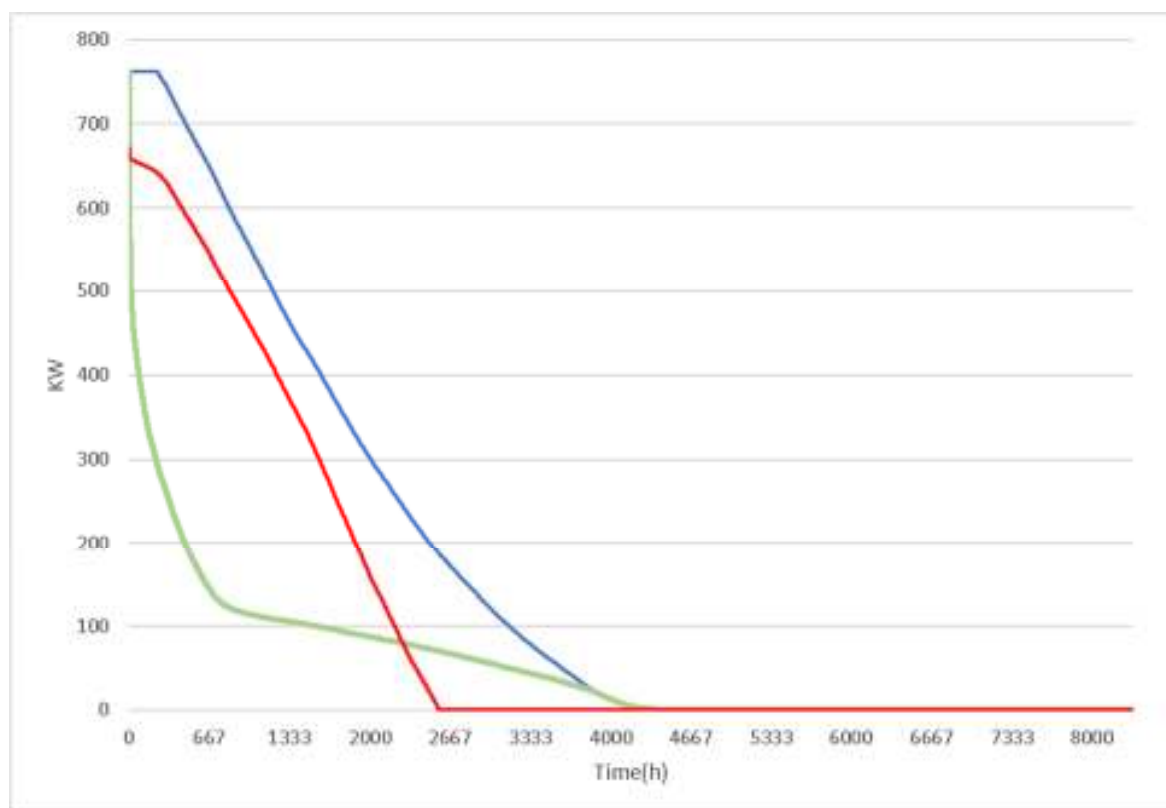
Συνεχίζεται η προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος, μειώνοντας τη χωρητικότητα της μπαταρία από 3,1 MWh σε 2.6 MWh. Αυτό οδηγεί σε αύξηση αντίστοιχα της εγκατεστημένης ισχύος του Φ/Β σταθμού από 720 kW σε 810 kW, προκειμένου να αποφεύγονται περιστατικά αστοχίας. Από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος, ο συνδυασμός αυξανόμενης ισχύος των Φ/Β και μειούμενης χωρητικότητας μπαταριών έχουν ως αποτέλεσμα μικρή αύξηση της ενέργειας από τα Φ/Β προς ικανοποίηση της ζήτησης, σημαντικότερη αύξηση της ενέργειας που αποθηκεύεται από τις μπαταρίες, καθώς η μείωση της χωρητικότητας συνεπάγεται εντονότερες διακυμάνσεις στη στάθμη της, ενώ παρατηρείται σημαντική αύξηση της απορριπτόμενης ενέργειας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος

	Σενάριο 6	Σενάριο 7	Σενάριο 8	Σενάριο 9	Σενάριο 10
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (kW)	720	750	762	780	810
Εγκατεστημένη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	3.1	2.85	2.75	2.70	2.6
Ωφέλιμη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	2.3	2.13	2.06	2.0	1.95
Ζήτηση ενέργειας (MWh)	272.4				
<b>Δείκτες λειτουργίας συστήματος</b>					
CF(%) Φ/Β	7.1	6.9	6.8	6.7	6.6
Διαθέσιμη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	1301.5	1355.7	1377.4	1409.9	1464.2
Παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	426.2	432.5	435.0	438.8	445.1
Ενέργεια από Φ/Β προς φορτίο (MWh)	125.2	125.6	125.7	125.9	126.2
Μέσο SoC μπαταρίας (%)	86.6	86.3	86.1	86.2	86.2
Ενέργεια από Φ/Β προς μπαταρίες (MWh)	301.0	306.9	309.3	312.9	318.8
Ενέργεια από μπαταρίες προς φορτίο (MWh)	147.1	146.8	146.7	146.5	146.2
Απορριπτόμενη ενέργεια Φ/Β (MWh)	875.2	923.2	942.4	971.1	1019.1
Απορριπτόμενη ενέργεια (%)	67.2	68.1	68.4	68.9	69.6
Περιστατικά αστοχίας	0	0	0	0	0
Απαιτούμενες αντικατ. μπατ. στην 20ετία	1	1	1	1	1
<b>Οικονομικά στοιχεία</b>					
Σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh)	0.71	0.69	0.66	0.67	0.68

Το ειδικό κόστος παραγόμενης ενέργειας συνεχίζει να μειώνεται (σενάρια 6-8), με την αντίστοιχη μείωση του μεγέθους της μπαταρίας και παρά την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των Φ/Β. Στο σενάριο 9 όπως και στο 10 η μείωση του κόστους παύει να υφίσταται, παρά τη μείωση του μεγέθους της μπαταρίας, αντίθετα εμφανίζει πολύ μικρή αύξηση από τα 0,67 €/kWh στα 0,68 €/kWh. Αυτό φανερώνει πως η μικρότερη δυνατή διαστασιολόγηση της μπαταρίας, πλέον δεν οδηγεί σε οικονομικότερο σύστημα, δεδομένης της αύξησης που απαιτείται στην εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β, που φαίνεται να συμβάλλει στην αύξηση του κόστους. Ακολουθεί περαιτέρω διερεύνηση για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

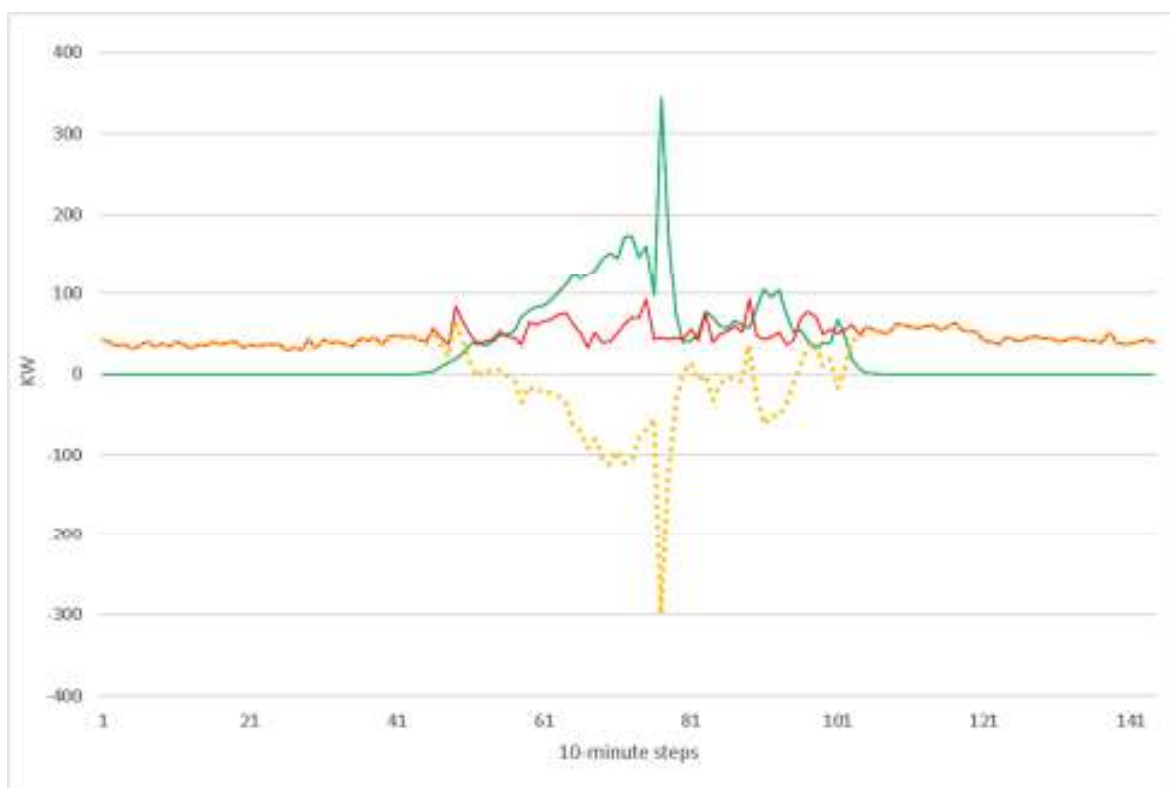
Στη συνέχεια παρουσιάζονται για το σενάριο 8, που είναι το βέλτιστο από οικονομικής άποψης, οι καμπύλες διάρκειας διαθέσιμης, παραγόμενης και απορριπτόμενης ισχύος στο Σχήμα 4.4, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις 23 Νοεμβρίου 2017 (ημέρα με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.5 καθώς και για τις 29 Σεπτεμβρίου 2018 (ημέρα με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.6.

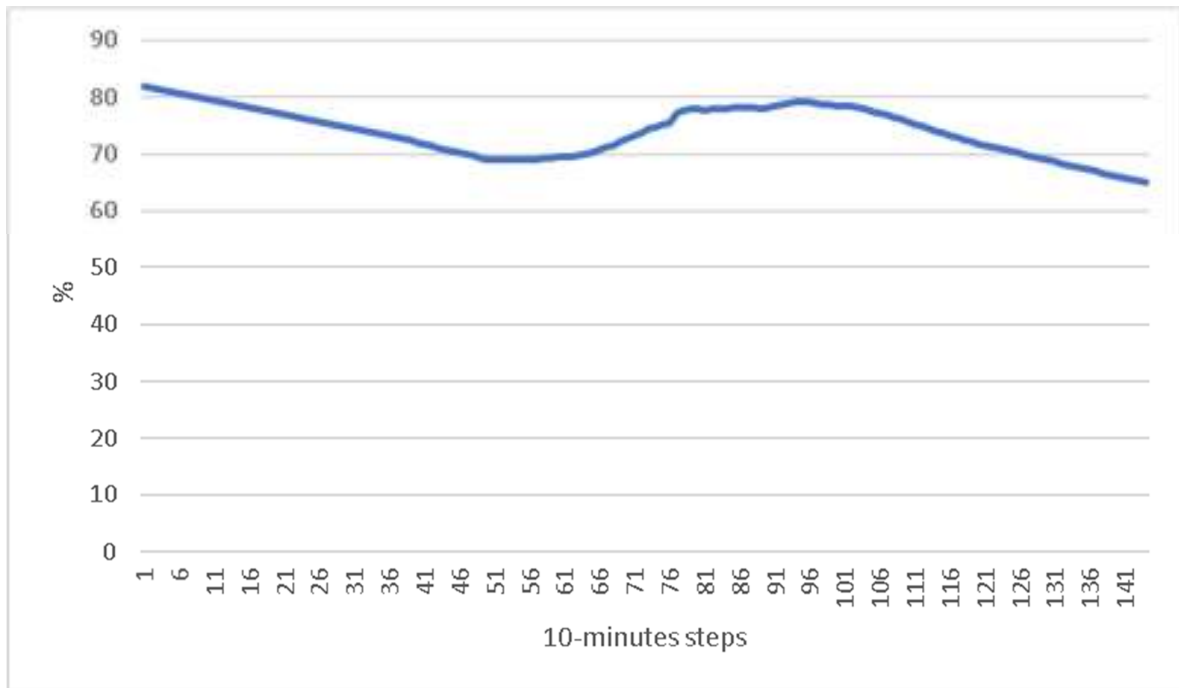


Σχήμα 4.4: Καμπύλες διάρκειας: Διαθέσιμης ισχύος (μπλε), παραγόμενης ισχύος (πράσινο), απορριπτόμενης ισχύος (κόκκινο)



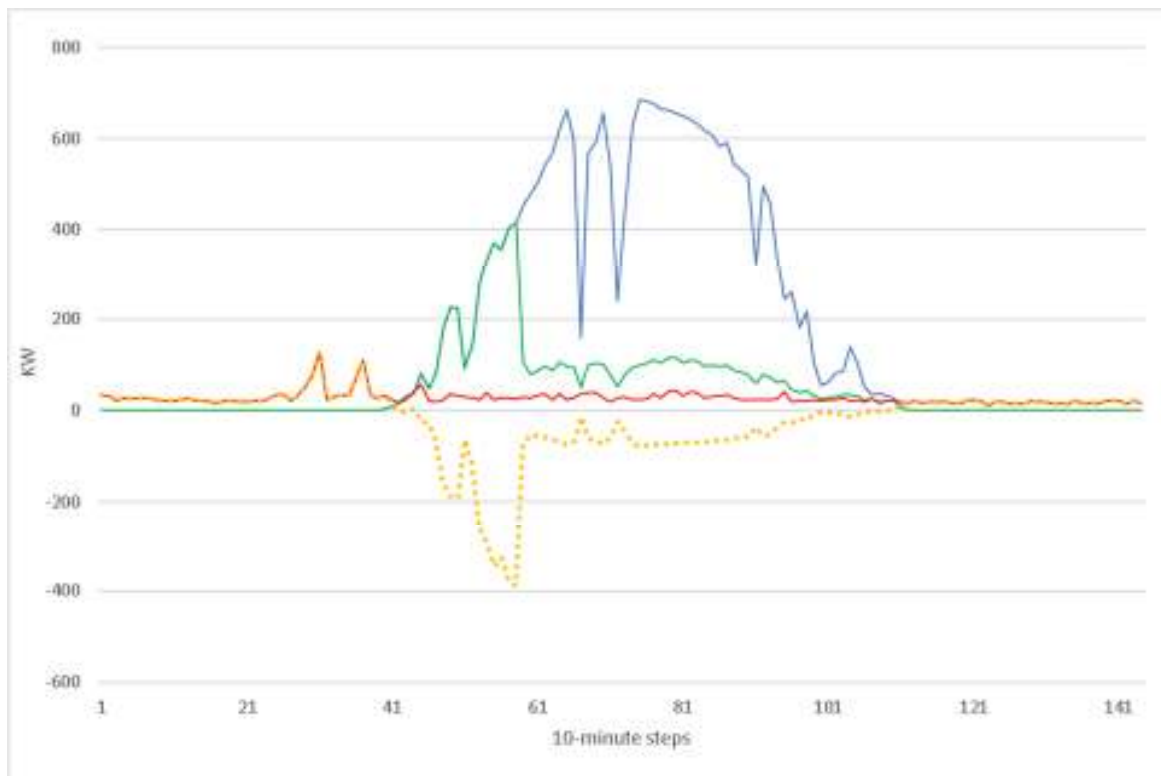
Στιγμιότυπο 23 Νοεμβρίου 2017

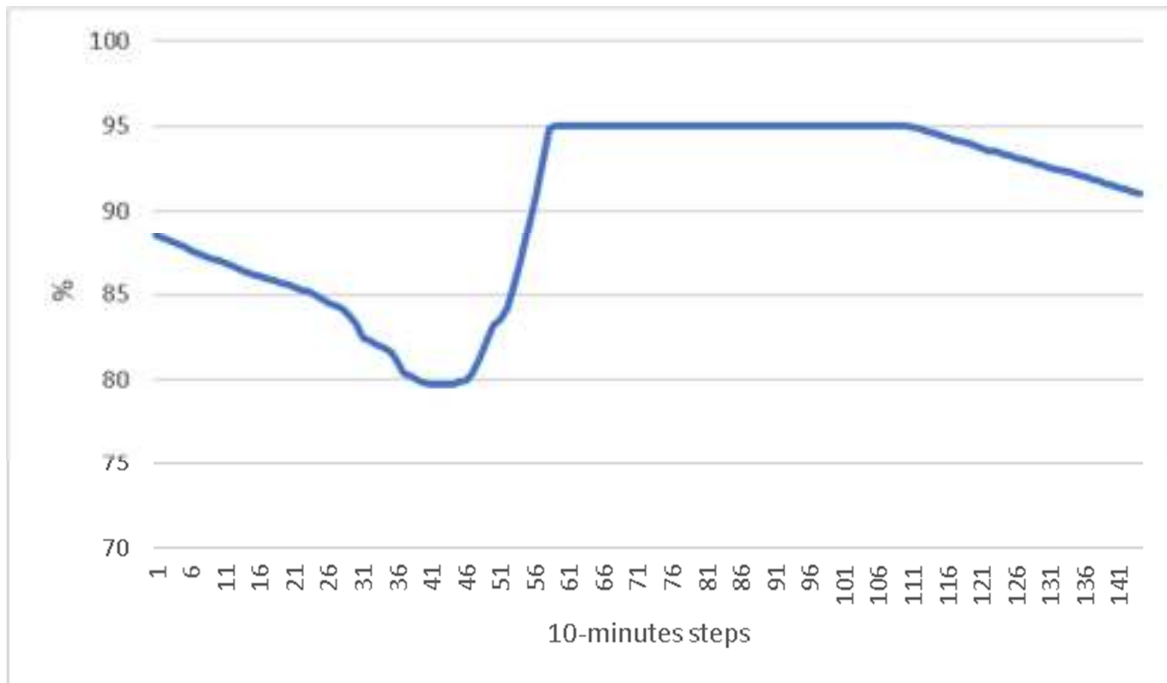




Σχήμα 4.5: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μπλε), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς μπαταρίας (διακ. πορτοκαλί), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας,

### Στιγμιότυπο 29 Σεπτεμβρίου 2018





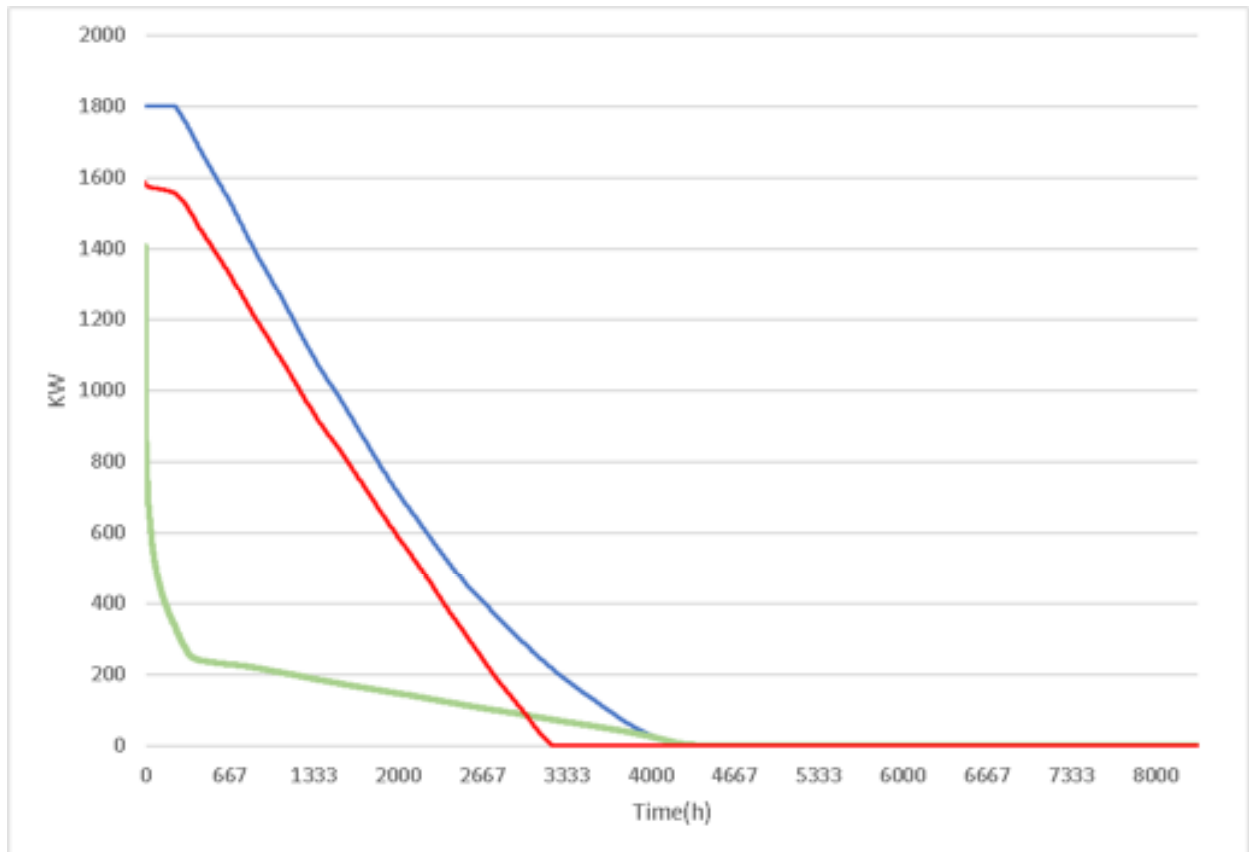
Σχήμα 4.6: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή  $\Phi/B$  (μπλε), παραγωγή  $\Phi/B$  (πράσινο), ισχύς μπαταρίας (διακ. πορτοκαλί), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας,

Οι προσομοιώσεις του συστήματος συνεχίζονται, προκειμένου να προκύψει το ελάχιστο δυνατό μέγεθος μπαταρίας, καθώς και να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις στον οικονομικό τομέα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος

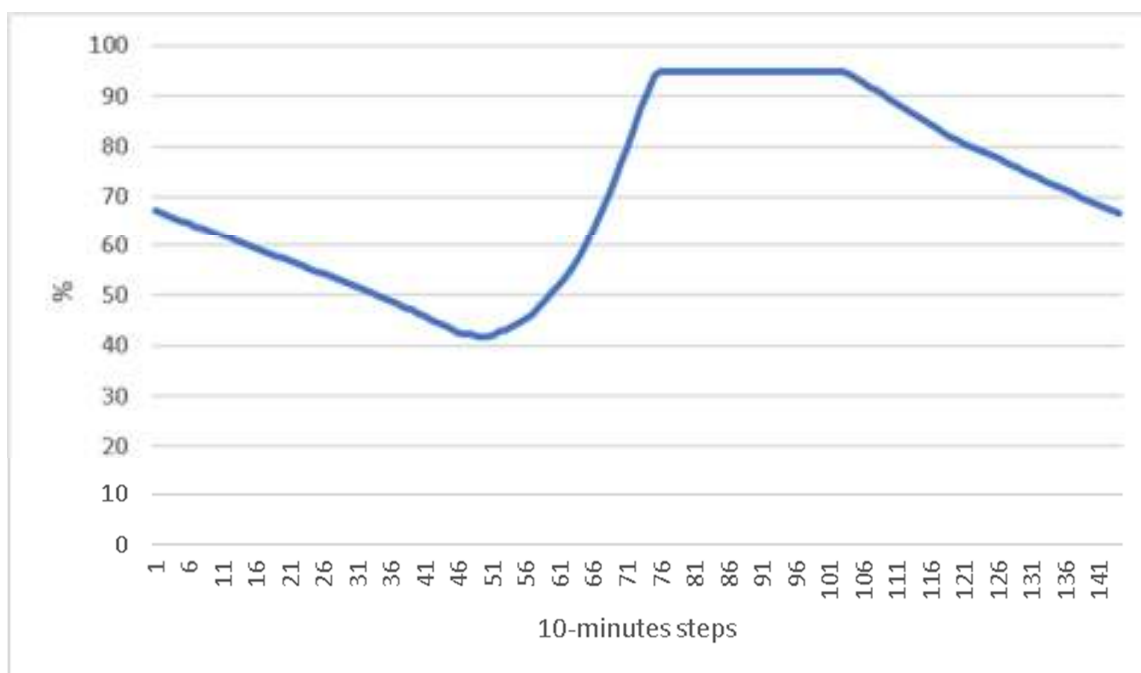
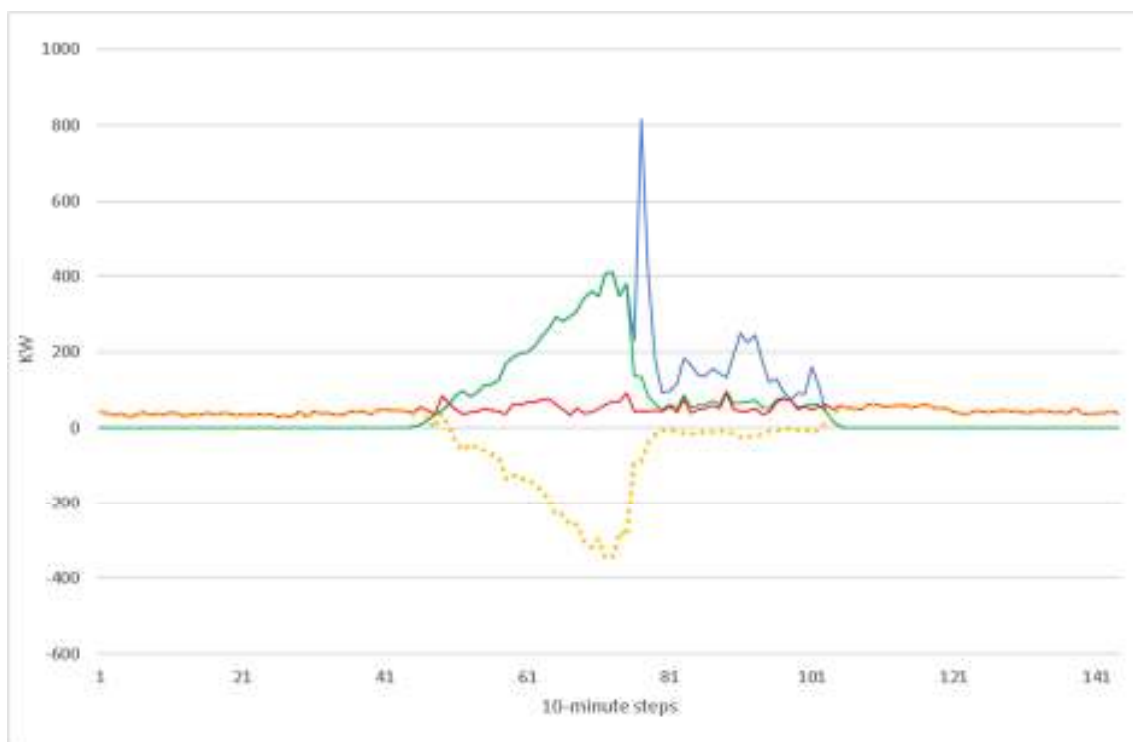
	Σενάριο 11	Σενάριο 12	Σενάριο 13	Σενάριο 14	Σενάριο 15
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (kW)	990	1140	1350	1650	1800
Εγκατεστημένη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	2.1	1.7	1.33	1.29	1.285
Ωφέλιμη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	1.6	1.3	1.00	0.97	0.96
Ζήτηση ενέργειας (MWh)	272.4				
<b>Δείκτες λειτουργίας συστήματος</b>					
CF(%) Φ/Β	5.8	5.4	5.0	4.5	4.4
Διαθέσιμη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	1789.5	2060.7	2440.3	2982.6	3253.7
Παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	482.8	514.3	558.5	621.7	653.4
Ενέργεια από Φ/Β προς φορτίο (MWh)	127.8	128.8	129.9	131.2	131.7
Μέσο SoC μπαταρίας (%)	85.5	84.3	82.3	82.7	82.9
Ενέργεια από Φ/Β προς μπαταρίες (MWh)	355.0	385.6	428.6	490.6	521.7
Ενέργεια από μπαταρίες προς φορτίο (MWh)	144.6	143.6	142.5	141.2	140.7
Απορριπτόμενη ενέργεια Φ/Β (MWh)	1306.7	1546.3	1881.7	2360.8	2600.3
Απορριπτόμενη ενέργεια (%)	73.0	75.0	77.1	79.2	79.9
Περιστατικά αστοχίας	0	0	0	0	0
Απαιτούμενες αντικατ. μπατ. στην 20ετία	1	1	1	1	1
<b>Οικονομικά στοιχεία</b>					
Σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh)	0.69	0.70	0.73	0.85	0.91

Στη συνέχεια παρουσιάζονται για το σενάριο 15, που είναι το σενάριο με την ελάχιστη δυνατή χωρητικότητα μπαταρίας, βάσει των ενεργειακών απαιτήσεων της μονής, οι καμπύλες διάρκειας διαθέσιμης, παραγόμενης και απορριπτόμενης ισχύος στο Σχήμα 4.7, τα στιγμιότυπα λειτουργίας του συστήματος για τις 23 Νοεμβρίου 2017 (ημέρα με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.8 καθώς και για τις 29 Σεπτεμβρίου 2018 (ημέρα με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.9.



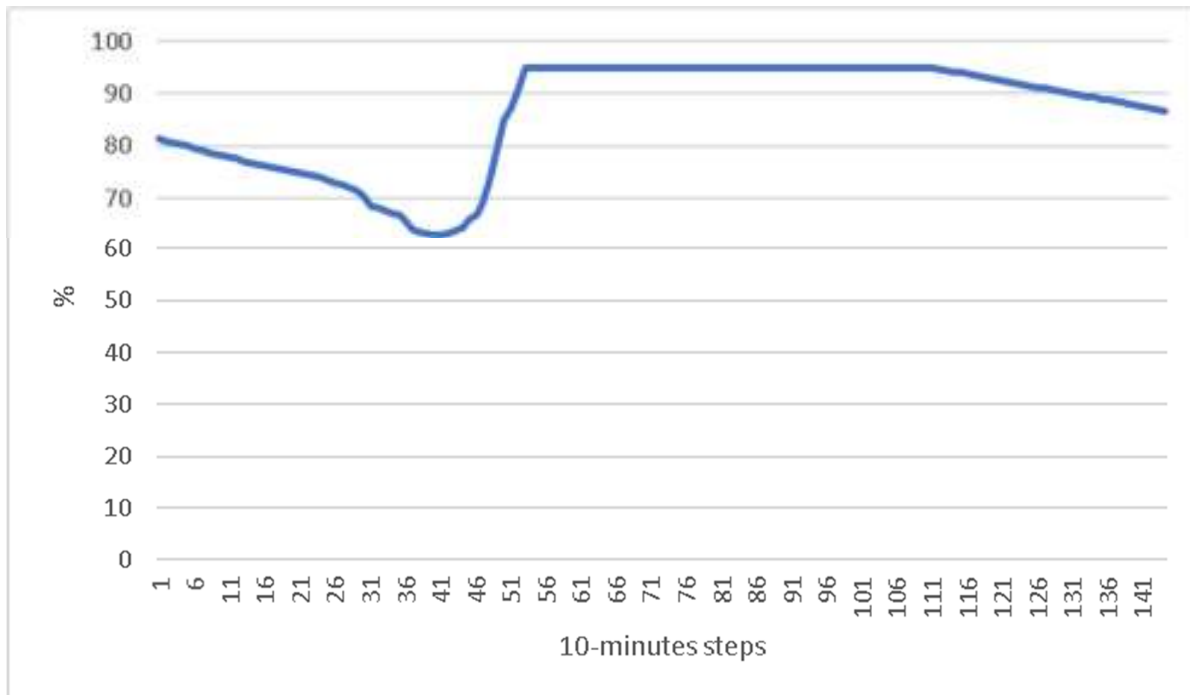
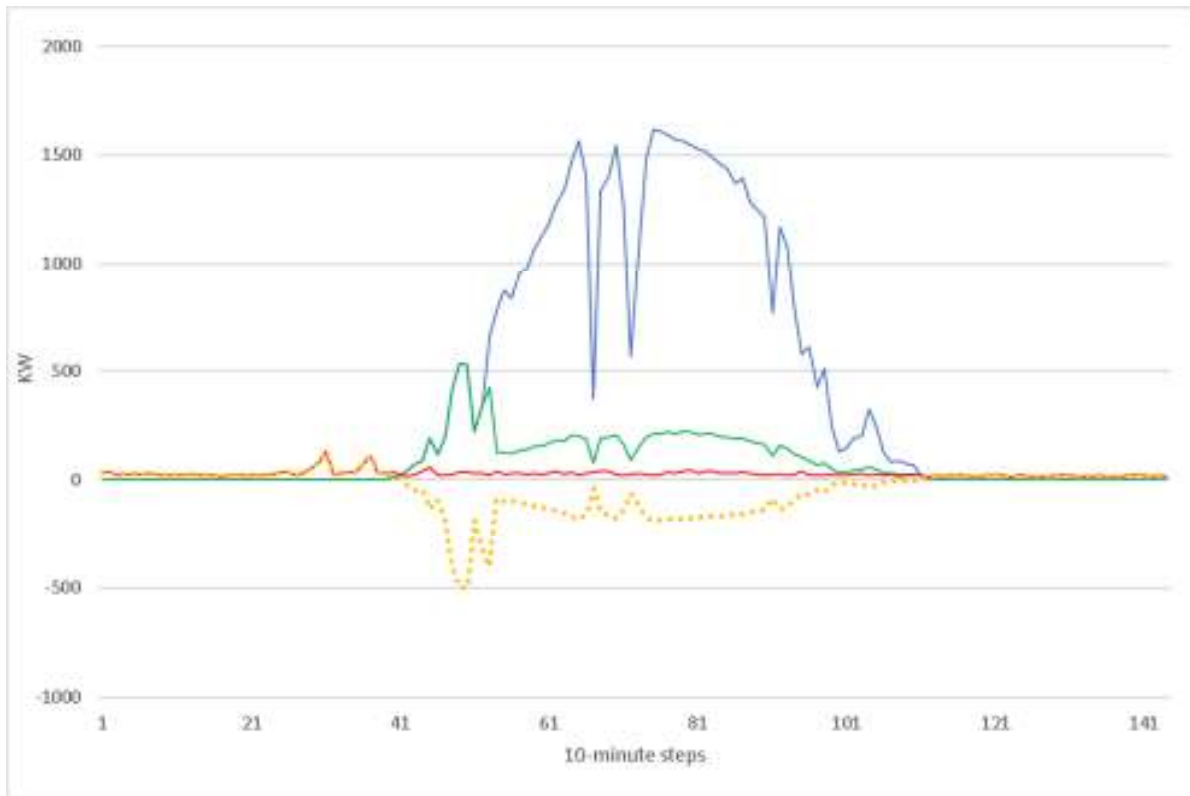
Σχήμα 4.7: Καμπύλες διάρκειας: Διαθέσιμης ισχύος (μπλε), παραγόμενης ισχύος (πράσινο), απορριπτόμενης ισχύος (κόκκινο)

### Στιγμιότυπο 23 Νοεμβρίου 2017



Σχήμα 4.8: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μπλε), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς μπαταρίας (διακ. πορτοκαλί), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας,

### Στιγμιότυπο 29 Σεπτεμβρίου 2018



Σχήμα 4.9: **Πάνω**: μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μπλε), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς μπαταρίας (διακ. πορτοκαλί), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω**: κατάσταση (soc) μπαταρίας,

Συγκρίνονται το σενάριο 1, που αποτελεί το σενάριο λειτουργίας του συστήματος με τη χαμηλότερη εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β και παρουσιάζει υπερδιαστασιολόγηση στο μέγεθος της μπαταρίας, με το σενάριο 15 που είναι το σενάριο λειτουργίας του συστήματος με την ελάχιστη δυνατή χωρητικότητα μπαταρίας και παρουσιάζει υπερδιαστασιολόγηση στην εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β. Το σταθμισμένο κόστος του σεναρίου 1 αντιστοιχεί 1,46 €/kWh ενώ το αντίστοιχο του σεναρίου 15, ανέρχεται σε 0,91 €/kWh . Αυτό φανερώνει πως η υπερδιαστασιολόγηση από την πλευρά της εγκατεστημένης ισχύος των Φ/Β κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα έναντι της υπερδιαστασιολόγησης του μεγέθους της μπαταρίας. Όμως κανένα από αυτά τα σενάρια δεν δίνει τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του συστήματος που απαιτείται με τις δεδομένες ενεργειακές απαιτήσεις της μονής και την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος επιλέγεται βάσει του σεναρίου 8. Η εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β επιλέγεται στα 762 kW, η απαιτούμενη χωρητικότητα μπαταρίας ανέρχεται σε 2,7 MWh, ενώ το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας ανέρχεται σε 0,66 €/kWh που είναι και το χαμηλότερο δυνατό.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στο γεγονός πως η ανάγκη διαστασιολόγησης ενός πλήρους αυτόνομου συστήματος, που καλύπτει δηλαδή τη ζήτηση της μονής κατά τη διάρκεια του εξεταζόμενου διαστήματος χωρίς την εμφάνιση περιστατικών αστοχίας, οδηγεί αναγκαστικά σε υπερδιαστασιολόγηση των συνιστωσών και κατά συνέπεια στην αύξηση του σταθμισμένου κόστους παραγόμενης ενέργειας. Συγκριτικά, παρατίθεται για το σενάριο 8, που είναι το βέλτιστο οικονομικά, το σταθμισμένο κόστος που προκύπτει με την εγκατάσταση μικρότερης μπαταρίας που έχει σαν συνέπεια την εμφάνιση 72 περιστατικών αστοχίας, που ισοδυναμεί σε 12 ώρες αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης της μονής στο εξεταζόμενο διάστημα. Το αποτέλεσμα παρατίθεται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος

	Σενάριο 8	
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (kW)	762	762
Εγκατεστημένη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	2.75	2.4
Ωφέλιμη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	2.06	1.8
Ζήτηση ενέργειας (MWh)	272.4	
<b>Δείκτες λειτουργίας συστήματος</b>		
Περιστατικά αστοχίας	0	72
<b>Οικονομικά στοιχεία</b>		
Σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh)	0.66	0.64



Τέλος, διατηρώντας σταθερή τη χωρητικότητα της μπαταρίας, όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση του σεναρίου 8, μειώνεται αντίστοιχα η εγκατεστημένη ισχύς του Φ/Β και ακολουθούν νέες προσομοιώσεις, ώστε να καθοριστεί η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς, που σε συνδυασμό με την υφιστάμενη χωρητικότητα μπαταρίας θα έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση 72 περιστατικών αστοχίας. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος

	Σενάριο 8	
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (kW)	762	730
Εγκατεστημένη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	2.75	2.75
Ωφέλιμη χωρητικότητα μπαταρίας (MWh)	2.06	2.06
Ζήτηση ενέργειας (MWh)	272.4	
<b>Δείκτες λειτουργίας συστήματος</b>		
Περιστατικά αστοχίας	0	72
<b>Οικονομικά στοιχεία</b>		
Σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh)	0.66	0.66

Το σταθμισμένο κόστος που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση, κινείται στα ίδια επίπεδα με αυτό της περίπτωσης κατά την οποία δεν παρουσιάζονται περιστατικά αστοχίας. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.5 και του Πίνακα 4.6, επιβεβαιώνεται η εκτίμηση ότι η υπερδιαστασιολόγηση της μπαταρίας, οδηγεί σε ακριβότερο σύστημα, έναντι της υπερδιαστασιολόγησης των Φ/Β.

#### **4.4.Σύστημα αντλησιοταμίευσης με Φ/Β σταθμό**

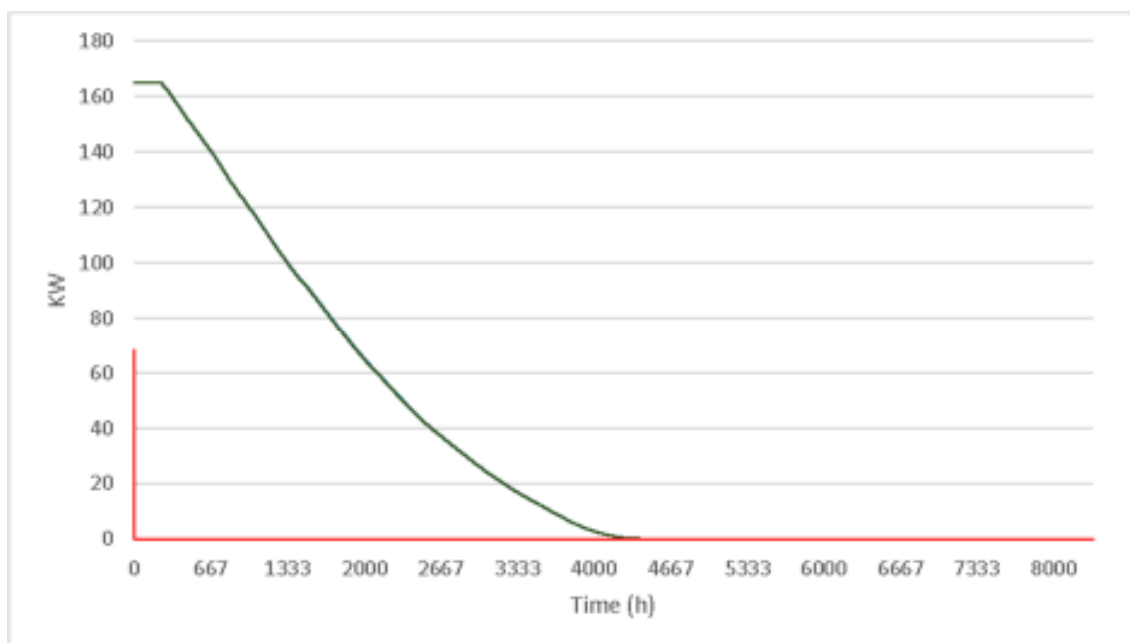
Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται η διαστασιολόγηση των συνιστωσών του συστήματος αντλησιοταμίευσης με Φ/Β σταθμό. Όπως και στην περίπτωση του συστήματος Φ/Β και μπαταριών, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, η διαστασιολόγηση του συστήματος γίνεται με σκοπό καταρχήν να ικανοποιείται το κριτήριο της αυτονομίας. Βάσει των παραδοχών που έχουν γίνει και που περιγράφονται στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κρίσιμο παράγοντα για τη διαστασιολόγηση του συστήματος, αποτελεί και ο όγκος του ταμιευτήρα, εκτός του οικονομικού. Δεν μελετάται απλά το σενάριο που οδηγεί στο μικρότερο δυνατό σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας, αλλά και αυτό κατά το οποίο προκύπτει ο μικρότερος δυνατός όγκος ταμιευτήρα που απαιτείται για την ενεργειακή αυτονομία της μονής, χωρίς δηλαδή την εμφάνιση περιστατικών αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης. Στη συνέχεια παρατίθενται τα πρώτα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (kW)	165	180	195	210	240
Εγκατεστημένη ισχύς υδροστροβίλου (kW)	240	240	240	240	240
Εγκατεστημένη ισχύς αντλίας (kW)	186	203	220	238	272
Όγκος ταμιευτήρα (m <sup>3</sup> )	350323	329436	308800	288200	252100
Ζήτηση ενέργειας (MWh)	272.4				
Δείκτες λειτουργίας συστήματος					
CF(%) Φ/Β	21.7	21.7	20.7	19.3	16.9
CF(%) Υδροστροβίλου	12.2	11.1	10.1	9.3	8.1
Διαθέσιμη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	298.3	325.4	352.5	379.6	433.8
Παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	298.0	325.1	337.2	338.0	338.6
Ενέργεια από Φ/Β προς φορτίο (MWh)	103.8	105.7	107.3	108.8	111.2
Παραγόμενη ενέργεια από τον υδροστρόβιλο (MWh)	168.6	166.7	165.1	163.6	161.1
Μέσο sos δεξαμενής (%)	42.0	49.6	56.0	59.4	64.5
Ενέργεια από Φ/Β προς αντλία (MWh)	194.2	219.4	229.9	229.2	227.4
Όγκος αντλούμενου νερού (m <sup>3</sup> )	597278.7	674838.4	706955.8	705071.6	699409.4
Απορριπτόμενη ενέργεια Φ/Β (MWh)	0.3	0.3	15.3	41.6	95.2
Απορριπτόμενη ενέργεια (%)	0.1	0.1	4.3	11.0	21.9
Περιστατικά αστοχίας	0	0	0	0	0
Εκκινήσεις Υδροστροβίλου	816	798	801	776	743
Σβέσεις Υδροστροβίλου	815	797	800	775	742
Οικονομικά στοιχεία					
Σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh)	0.38	0.37	0.36	0.35	0.33

Από τα σενάρια που παρουσιάζονται, το σενάριο 1 αποτελεί αυτό κατά το οποίο εμφανίζεται η μικρότερη δυνατή διαστασιολόγηση του Φ/Β σταθμού, ο οποίος έχει εγκατεστημένη ισχύ 165 kW. Ο όγκος του ταμιευτήρα προκύπτει 350323 m<sup>3</sup>, ενώ το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας ανέρχεται σε 0,38 €/kWh. Οικονομικά βέλτιστο εκ των εξεταζόμενων σεναρίων παρουσιάζεται το σενάριο 5, με σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας 0,33 €/kWh. Η εγκατεστημένη ισχύς του Φ/Β σταθμού είναι 240 kW, ενώ ο όγκος του ταμιευτήρα ανέρχεται σε 252100 m<sup>3</sup>.

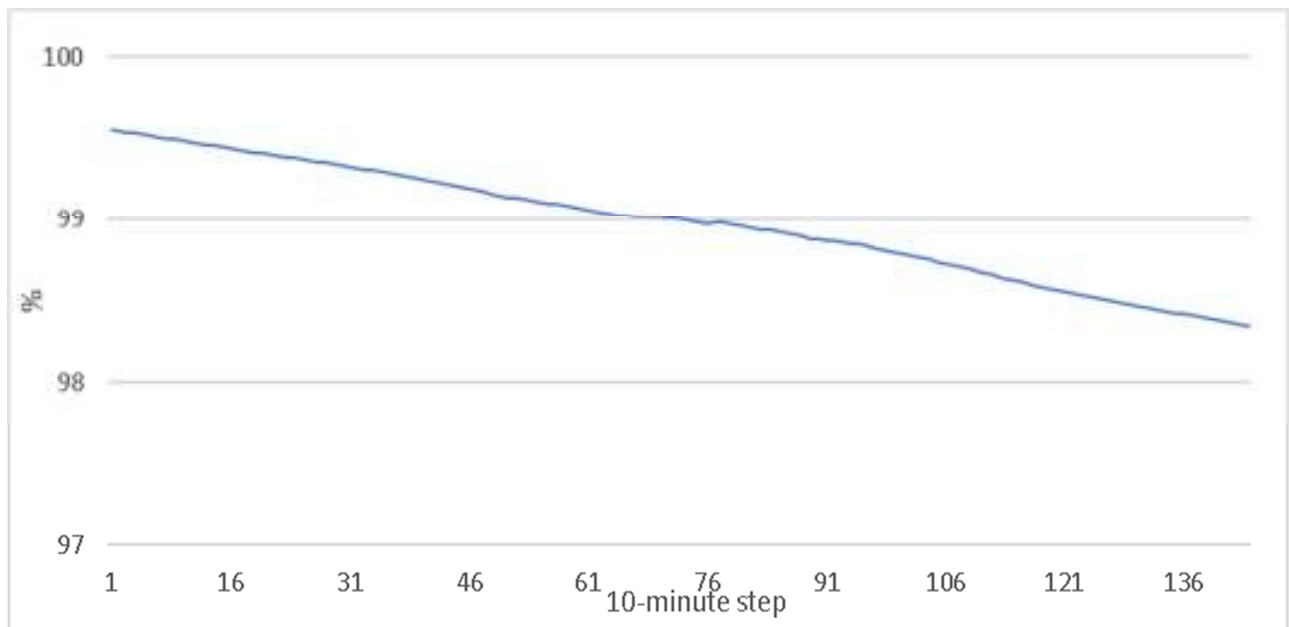
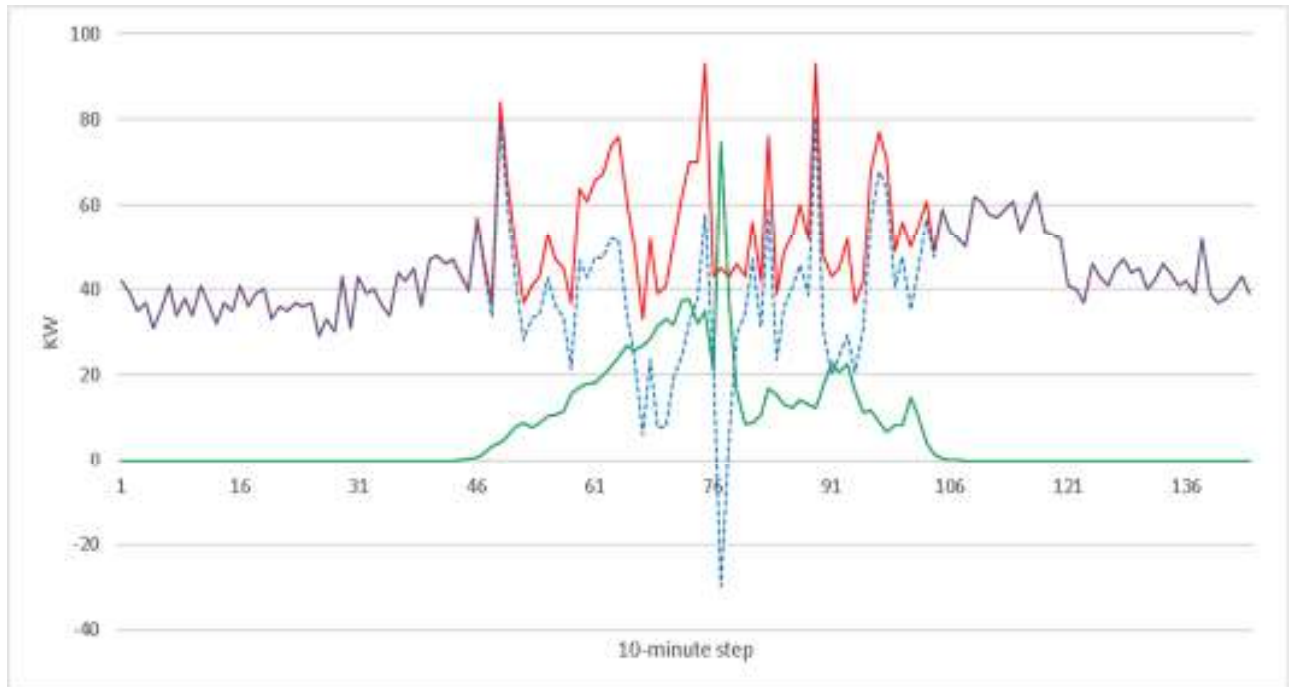
Για το σενάριο 1, παρουσιάζονται οι καμπύλες διάρκειας διαθέσιμης, παραγόμενης και απορριπτόμενης ισχύος στο Σχήμα 4.10, το στιγμιότυπο λειτουργίας του συστήματος για τις 23 Νοεμβρίου 2017 (ημέρα με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία) Σχήμα 4.11 καθώς και για τις 29 Σεπτεμβρίου 2018 (ημέρα με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.10: **Καμπύλες διάρκειας:** Διαθέσιμης ισχύος (μπλε), παραγόμενης ισχύος (πράσινο), απορριπτόμενης ισχύος (κόκκινο)

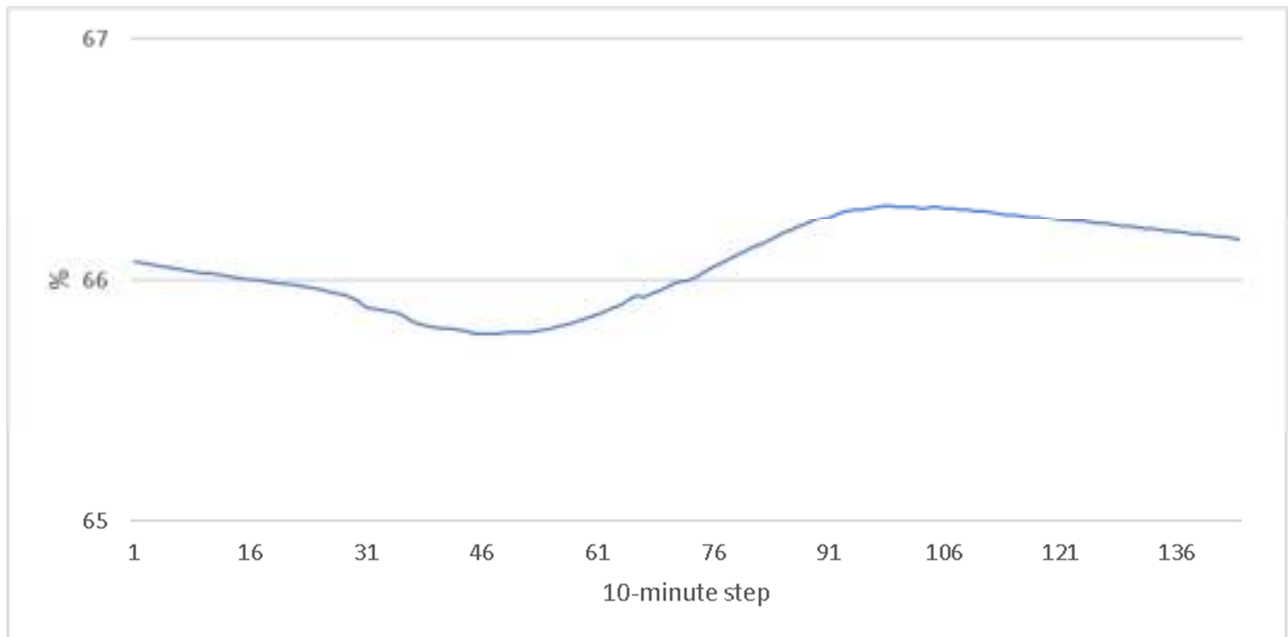
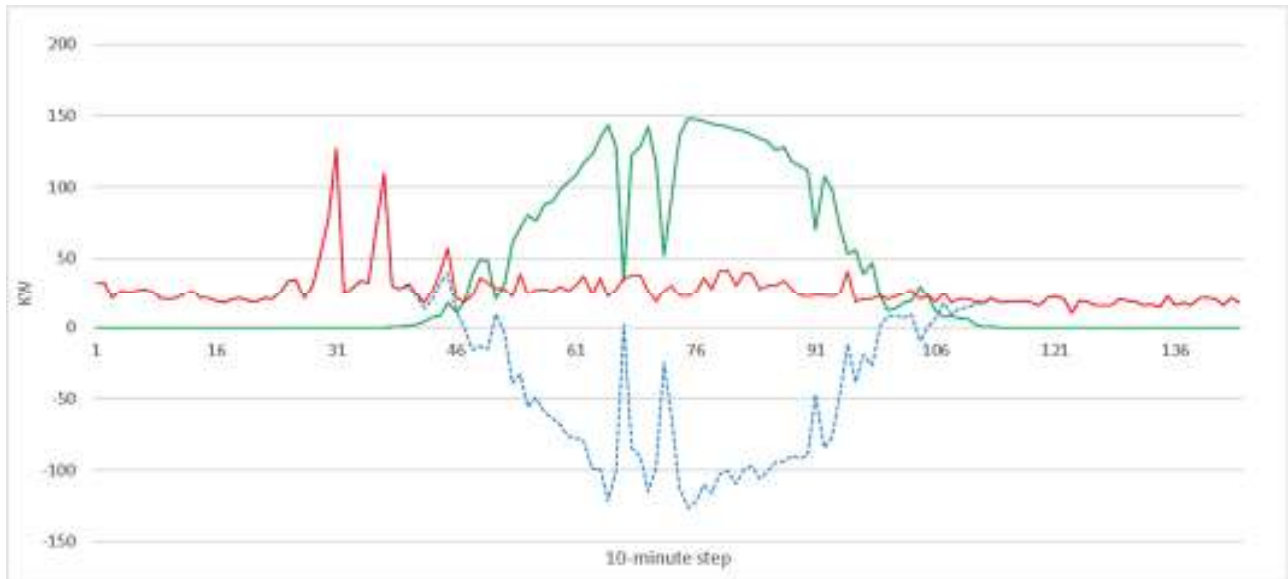
Παρατηρείται ότι η καμπύλη διάρκειας της διαθέσιμης ισχύος ταυτίζεται με αυτή της παραγόμενης, καθώς και ότι η καμπύλη διάρκειας της απορριπτόμενης ισχύος προκύπτει μηδενική σχεδόν σε όλο το εξεταζόμενο διάστημα. Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται αναμενόμενο, λόγω της μικρής εγκατεστημένης ισχύος του Φ/Β σταθμού.

### Στιγμιότυπο 23 Νοεμβρίου 2017



Σχήμα 4.11: **Πάνω**: μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μωβ), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς που παράγεται από τον υδ/λο (διακ. μπλε, θετικός κλάδος), ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία (διακ. μπλε, αρνητικός κλάδος), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω**: κατάσταση (sos) ταμιευτήρα

## Στιγμιότυπο 29 Σεπτεμβρίου 2018



Σχήμα 4.12: **Πάνω**: μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μωβ), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς που παράγεται από τον υδ/λο (διακ. μπλε, θετικός κλάδος), ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία (διακ. μπλε, αρνητικός κλάδος), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω**: κατάσταση (sos) ταμιευτήρα

Ο όγκος του ταμιευτήρα που προκύπτει από το σενάριο 5 ανέρχεται σε 252100 m<sup>3</sup> και θεωρείται ιδιαίτερα μεγάλος δεδομένης της γεωγραφικής θέσης της μονής. Συνεχίζονται οι προσπάθειες διαστασιολόγησης των παραμέτρων του συστήματος, δίνοντας έμφαση στο μέγεθος του ταμιευτήρα που προκύπτει αλλά ταυτόχρονα και στο πως διαμορφώνεται το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας.

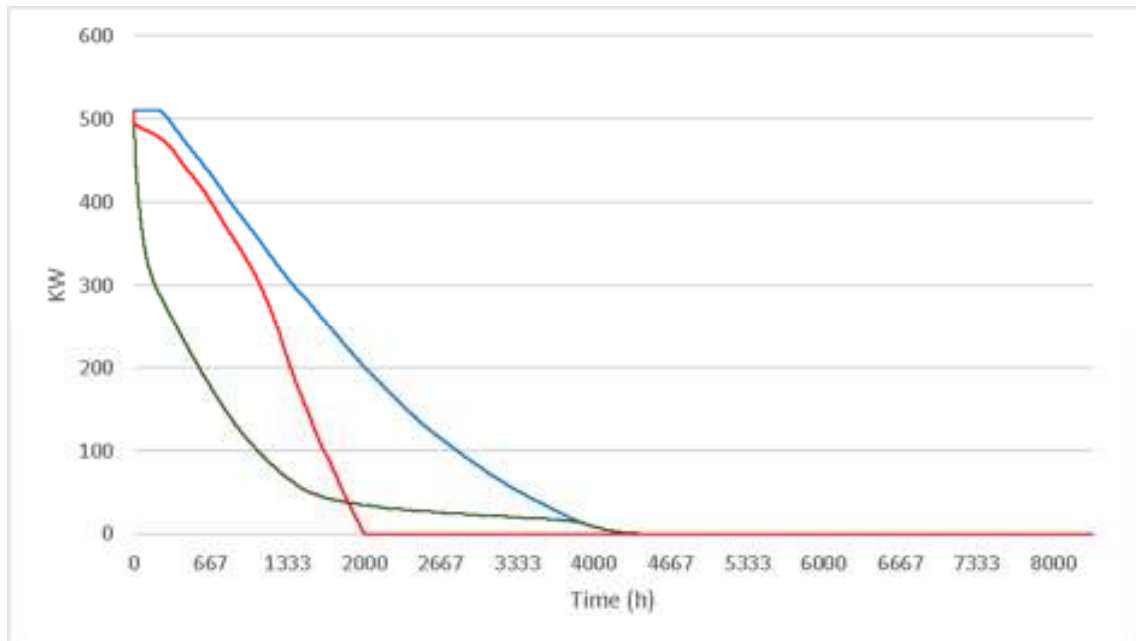
Από τα επόμενα 5 σενάρια, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8, το σενάριο 8 εμφανίζει το ελάχιστο δυνατό σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας, που διαμορφώνεται στα 0,25 €/kWh . Η εγκατεστημένη ισχύς του ΦΒ σταθμού ανέρχεται σε 510 kW ενώ ο όγκος του ταμιευτήρα που προκύπτει, είναι 31800 m<sup>3</sup>. Τα σενάρια 9 και 10 του ίδιου πίνακα φανερώνουν τη δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του όγκου του ταμιευτήρα αλλά ταυτόχρονα παρατηρείται αύξηση του σταθμισμένου κόστους. Αυτό φανερώνει πως πρέπει να καθοριστεί ποιος εκ των δύο θεωρείται κρίσιμος παράγοντας (σταθμισμένο κόστος, μέγεθος ταμιευτήρα) καθώς η επιλογή του ελάχιστου δυνατού κόστους δεν θα έχει ως αποτέλεσμα και την ελάχιστη δυνατή διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα.

Πίνακας 4.8: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος

	Σενάριο 6	Σενάριο 7	Σενάριο 8	Σενάριο 9	Σενάριο 10
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (kW)	270	360	510	570	660
Εγκατεστημένη ισχύς υδροστροβίλου (kW)	240	240	240	240	240
Εγκατεστημένη ισχύς αντλίας (kW)	292	392	548	616	718
Όγκος ταμιευτήρα (m <sup>3</sup> )	218000	130700	31800	20900	13100
Ζήτηση ενέργειας (MWh)	272.4				
<b>Δείκτες λειτουργίας συστήματος</b>					
CF(%) Φ/Β	15.1	11.3	7.9	7.1	6.1
CF(%) Υδροστροβίλου	7.1	5.2	3.5	3.1	2.7
Διαθέσιμη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	488.1	650.7	921.9	1030.3	1193.0
Παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	339.3	338.2	336.4	335.9	335.3
Ενέργεια από Φ/Β προς φορτίο (MWh)	113.2	117.6	121.9	123.1	124.5
Παραγόμενη ενέργεια από τον υδροστρόβιλο (MWh)	159.1	154.7	150.5	149.3	147.9
Μέσο sos δεξαμενής (%)	67.9	73.2	80.4	87.3	89.5
Ενέργεια από Φ/Β προς αντλία (MWh)	194.2	220.6	214.5	212.8	210.8
Όγκος αντλούμενου νερού (m <sup>3</sup> )	695196.8	678334.8	659588.6	654531.1	648414.3
Απορριπτόμενη ενέργεια Φ/Β (MWh)	148.8	312.5	585.5	694.5	857.7
Απορριπτόμενη ενέργεια (%)	30.5	48.0	63.5	67.4	71.9
Περιστατικά αστοχίας	0	0	0	0	0
Εκκινήσεις Υδροστροβίλου	712	639	556	528	519
Σβέσεις Υδροστροβίλου	711	638	555	527	518
<b>Οικονομικά στοιχεία</b>					
Σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh)	0.31	0.28	0.25	0.27	0.29

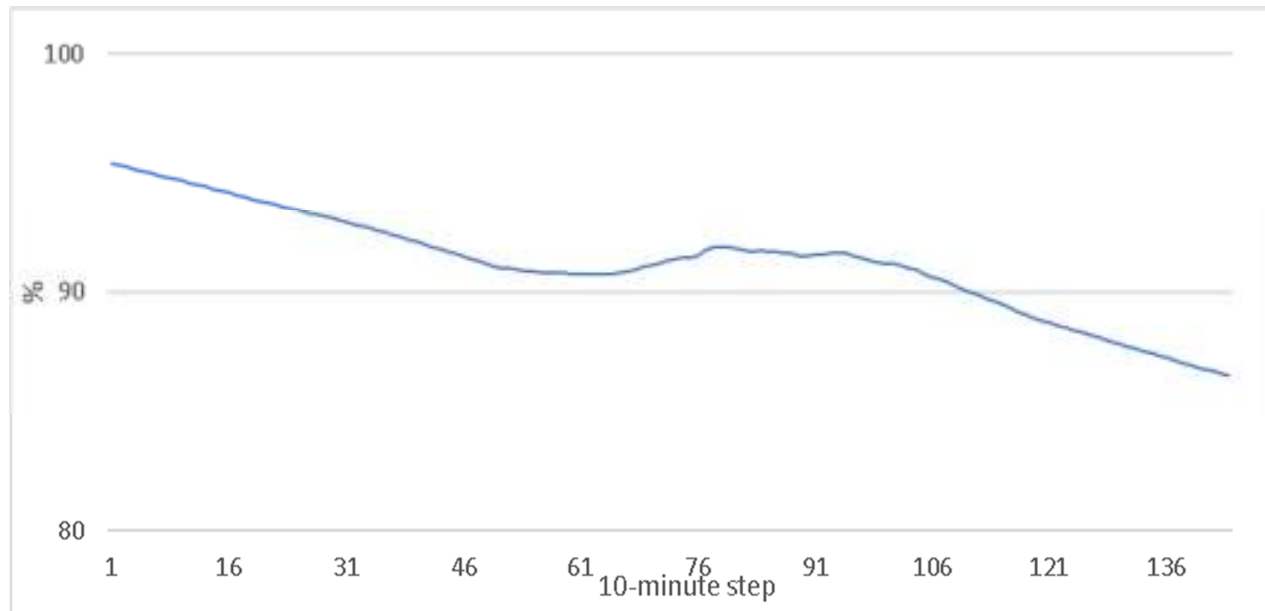
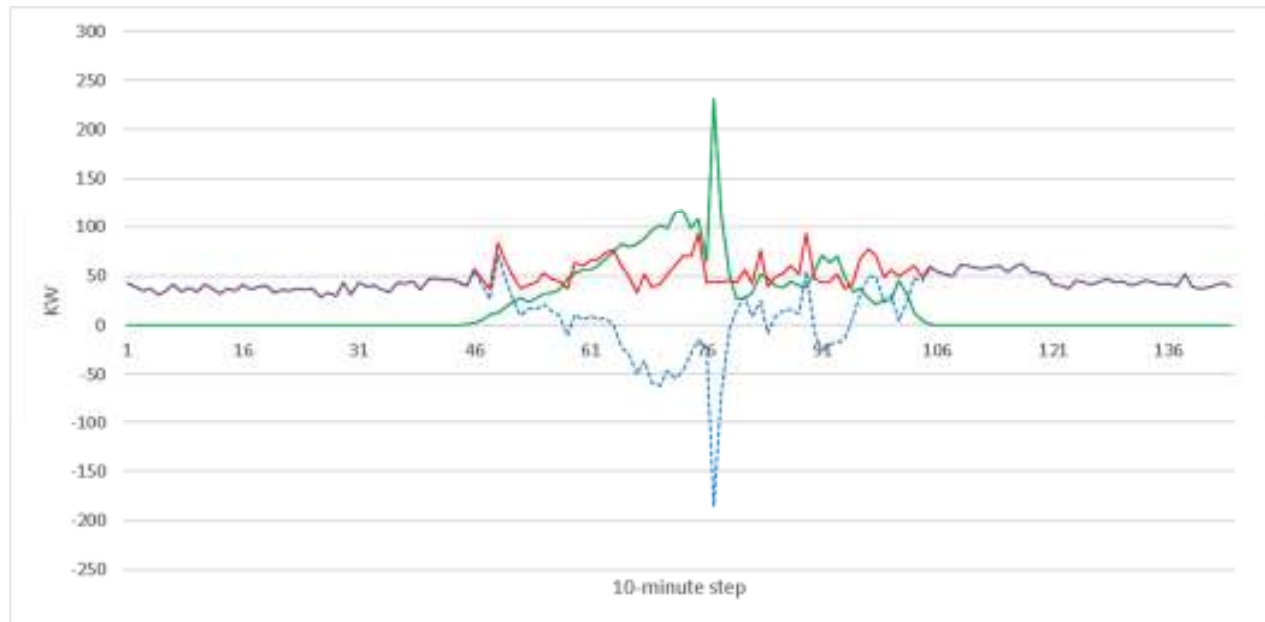


Για το σενάριο 8, το οικονομικότερο δηλαδή σενάριο που προκύπτει παρουσιάζονται οι καμπύλες διάρκειας διαθέσιμης, παραγόμενης και απορριπτόμενης ισχύος στο Σχήμα 4.13, το στιγμιότυπο λειτουργίας του συστήματος για τις 23 Νοεμβρίου 2017 (ημέρα με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.14 καθώς και για τις 29 Σεπτεμβρίου 2018 (ημέρα με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.15.



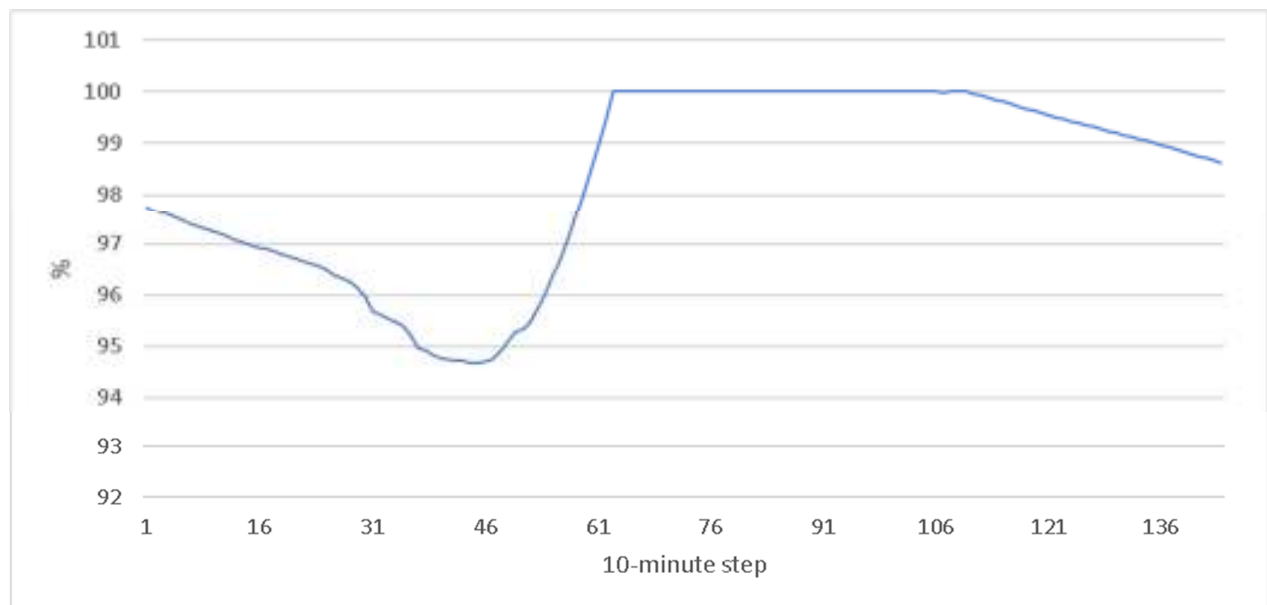
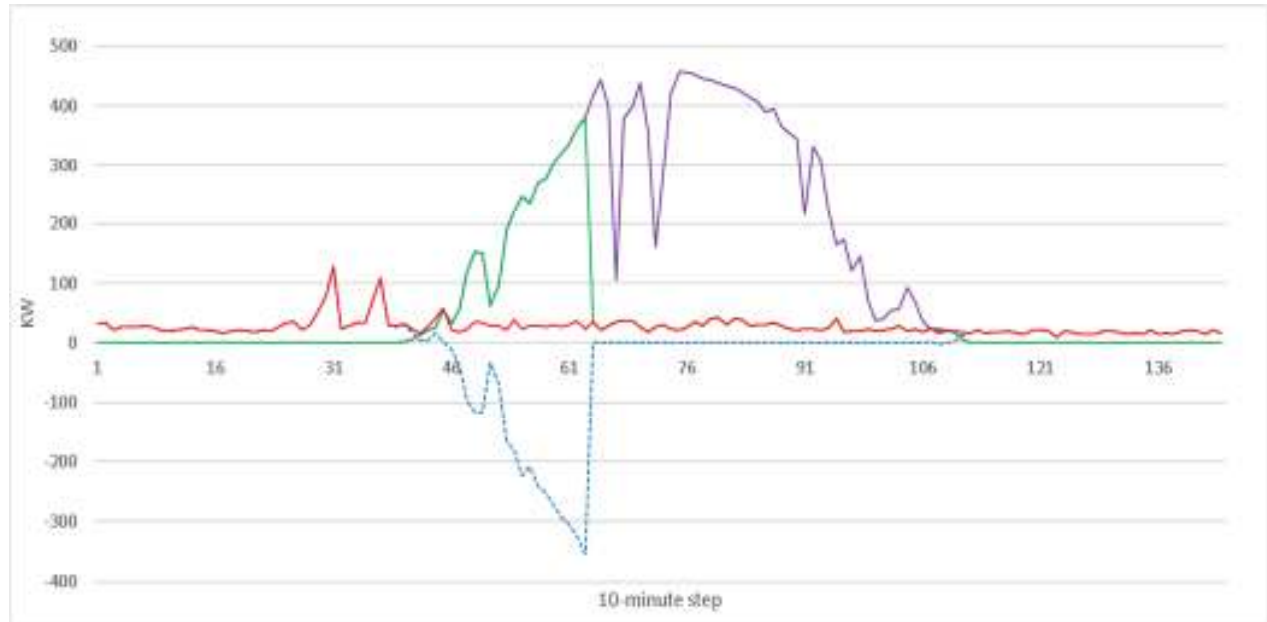
Σχήμα 4.13: **Καμπύλες διάρκειας:** Διαθέσιμης ισχύος (μπλε), παραγόμενης ισχύος (πράσινο), απορριπτόμενης ισχύος (κόκκινο)

## Στιγμιότυπο 23 Νοεμβρίου 2017



Σχήμα 4.14: **Πάνω**: μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μωβ), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς που παράγεται από τον υδ/λο (διακ. μπλε, θετικός κλάδος), ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία (διακ. μπλε, αρνητικός κλάδος), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω**: κατάσταση (sos) ταμιευτήρα

### Στιγμιότυπο 29 Σεπτεμβρίου 2018



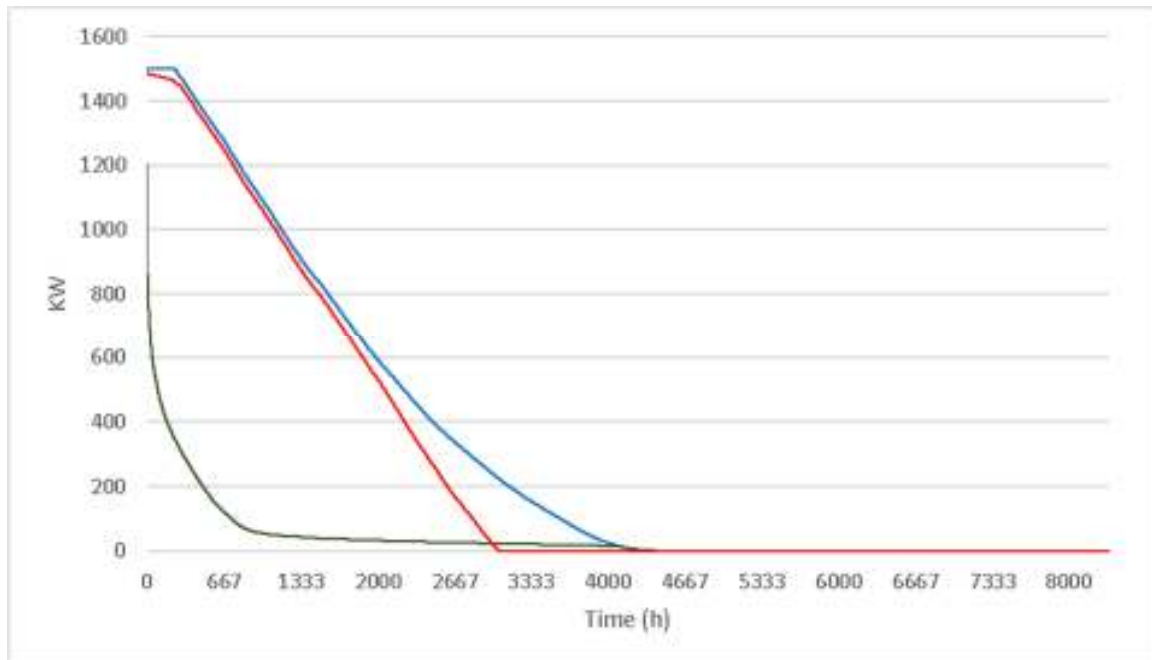
Σχήμα 4.15: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μωβ), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς που παράγεται από τον υδ/λο (διακ. μπλε, θετικός κλάδος), ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία (διακ. μπλε, αρνητικός κλάδος), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω:** κατάσταση (sos) ταμιευτήρα

Επιλέγοντας το μέγεθος του ταμιευτήρα ως κρίσιμο παράγοντα διαστασιολόγησης, λόγω της γεωγραφικής θέσης της μονής και των περιορισμών που αυτή δημιουργεί, αναζητείται η διαστασιολόγηση του συστήματος που έχει ως αποτέλεσμα τον μικρότερο δυνατό όγκο αυτού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην αύξηση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας, το οποίο λαμβάνει τη μικρότερη τιμή του με βάση τη διαστασιολόγηση που προκύπτει από το σενάριο 8 όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω. Το σενάριο 15, του Πίνακα 4.9 που παρουσιάζεται στη συνέχεια, δίνει την ελάχιστη δυνατή διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα, που αντιστοιχεί σε 3900 m<sup>3</sup>. Η εγκατεστημένη ισχύς του ΦΒ σταθμού είναι 1500 kW, ενώ το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας που προκύπτει ανέρχεται σε 0,57 €/kWh, σημαντικά αυξημένου έναντι του αντίστοιχου του σεναρίου 8.

Πίνακας 4.9: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος.

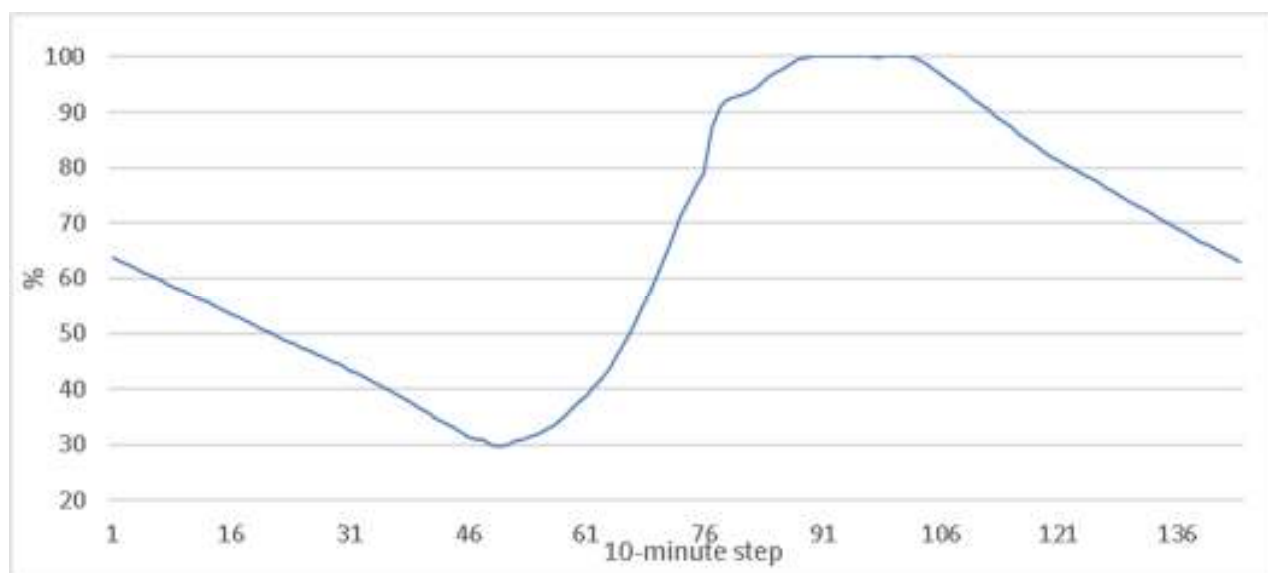
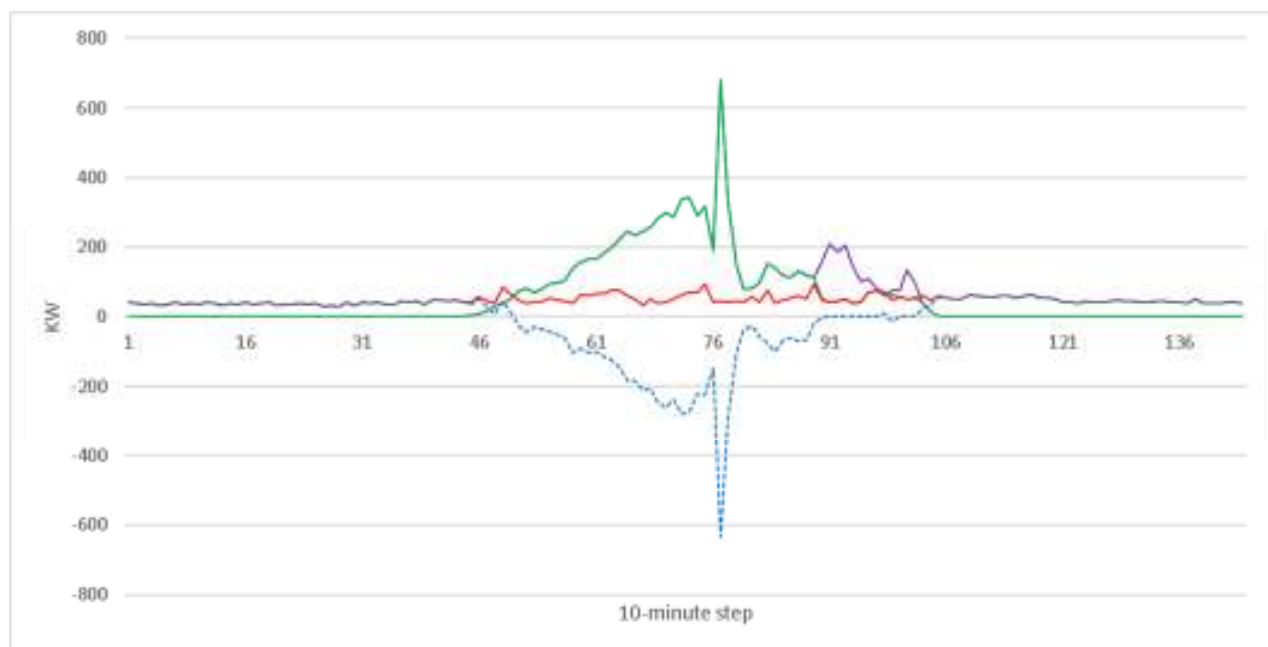
	Σενάριο 11	Σενάριο 12	Σενάριο 13	Σενάριο 14	Σενάριο 15
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β (kW)	750	810	900	1140	1500
Εγκατεστημένη ισχύς υδροστροβίλου (kW)	240	240	240	240	240
Εγκατεστημένη ισχύς αντλίας (kW)	820	890	990	1250	1320
Όγκος ταμιευτήρα (m <sup>3</sup> )	10100	8500	7500	5700	3900
Ζήτηση ενέργειας (MWh)	272.4				
<b>Δείκτες λειτουργίας συστήματος</b>					
CF(%) Φ/Β	5.4	5.0	4.5	3.5	2.7
CF(%) Υδροστροβίλου	2.3	2.2	1.9	1.5	1.1
Διαθέσιμη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	1355.7	1464.2	1626.9	2060.7	2711.4
Παραγόμενη ενέργεια από το Φ/Β (MWh)	334.8	334.5	334.2	333.4	332.7
Ενέργεια από Φ/Β προς φορτίο (MWh)	125.6	126.2	127.1	128.8	130.6
Παραγόμενη ενέργεια από τον υδροστρόβιλο (MWh)	146.8	146.2	145.3	143.6	141.8
Μέσο sos δεξαμενής (%)	89.2	88.5	88.2	86.9	83.1
Ενέργεια από Φ/Β προς αντλία (MWh)	209.2	208.3	207.1	204.7	202.1
Όγκος αντλούμενου νερού (m <sup>3</sup> )	643503.7	640691.0	637011.3	629515.9	621555.5
Απορριπτόμενη ενέργεια Φ/Β (MWh)	1020.9	1129.6	1292.7	1727.2	2378.7
Απορριπτόμενη ενέργεια (%)	75.3	77.2	79.5	83.8	87.7
Περιστατικά αστοχίας	0	0	0	0	0
Εκκινήσεις Υδροστροβίλου	497	483	460	439	421
Σβέσεις Υδροστροβίλου	496	482	459	438	420
<b>Οικονομικά στοιχεία</b>					
Σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (€/kWh)	0.32	0.34	0.37	0.45	0.57

Για το σενάριο 15, το σενάριο δηλαδή που προκύπτει η μικρότερη δυνατή διαστασιολόγηση του ταμειυτήρα, παρουσιάζονται οι καμπύλες διάρκειας διαθέσιμης, παραγόμενης και απορριπτόμενης ισχύος στο Σχήμα 4.16, το στιγμιότυπο λειτουργίας του συστήματος για τις 23 Νοεμβρίου 2017 (ημέρα με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.17 καθώς και για τις 29 Σεπτεμβρίου 2018 (ημέρα με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία) στο Σχήμα 4.18.



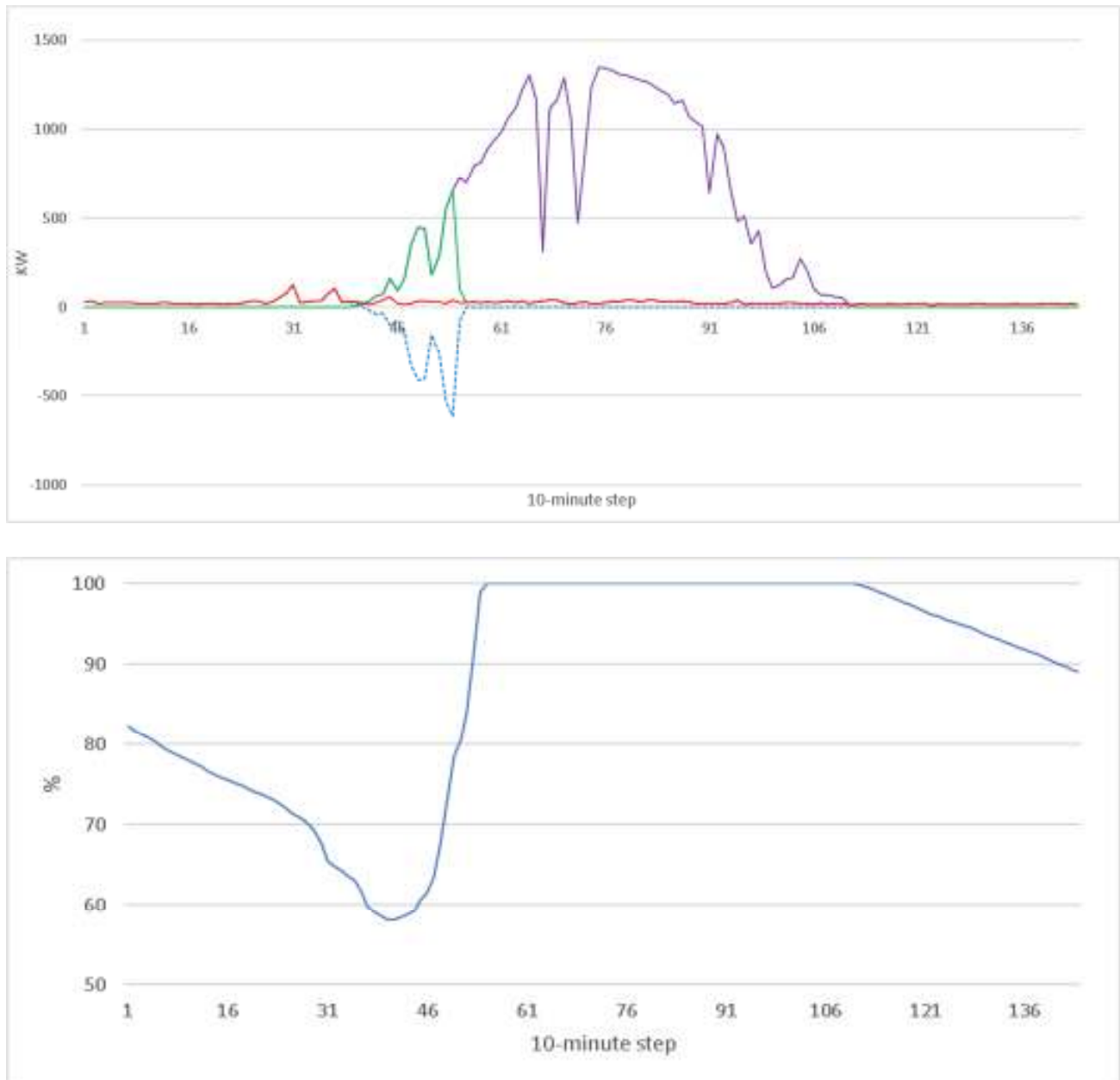
Σχήμα 4.16: Καμπύλες διάρκειας: Διαθέσιμης ισχύος (μπλε), παραγόμενης ισχύος (πράσινο), απορριπτόμενης ισχύος (κόκκινο)

## Στιγμιότυπο 23 Νοεμβρίου 2017



Σχήμα 4.17: **Πάνω**: μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μωβ), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς που παράγεται από τον υδ/λο (διακ. μπλε, θετικός κλάδος), ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία (διακ. μπλε, αρνητικός κλάδος), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω**: κατάσταση (sos) ταμιευτήρα

### Στιγμιότυπο 29 Σεπτεμβρίου 2018



Σχήμα 4.18: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Φ/Β (μωβ), παραγωγή Φ/Β (πράσινο), ισχύς που παράγεται από τον υδ/λο (διακ. μπλε, θετικός κλάδος), ισχύς που καταναλώνεται από την αντλία (διακ. μπλε, αρνητικός κλάδος), φορτίο (κόκκινο). **Κάτω:** κατάσταση (sos) ταμιευτήρα



## Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1. Συγκεντρωτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας

Η παρούσα προπτυχιακή διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη διαστασιολόγηση δύο αυτόνομων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την πλήρη κάλυψη της ζήτησης της μονής Διονυσίου σε ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς την εμφάνιση περιστατικών αστοχίας, καθιστώντας την ενεργειακά αυτόνομη. Τα δύο συστήματα που επιλέχθηκαν να διαστασιολογηθούν και να συγκριθούν είναι τα εξής:

- ΦΒ με αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες
- Σύστημα αντλησιοταμίευσης με ΑΠΕ (ΦΒ σταθμό)

Το αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ΦΒ σταθμού με παράλληλη χρήση μπαταριών ως αποθηκευτικό μέσο, διαστασιολογήθηκε με στόχο να επιλεγεί η κατάλληλη εγκατεστημένη ισχύς του ΦΒ σταθμού που σε συνδυασμό με την κατάλληλη διαστασιολόγηση της χωρητικότητας της μπαταρίας θα έχουν ως αποτέλεσμα τόσο το μικρότερο δυνατό σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας, όσο και την μηδενική εμφάνιση περιστατικών αδυναμίας του συστήματος να αναλάβει το φορτίο της μονής, επιτυγχάνοντας δηλαδή την πλήρη ενεργειακή αυτονομία της.

Για το αυτόνομο σύστημα αντλησιοταμίευσης, εκτός του περιορισμού της αυτονομίας, τίθεται και ο περιορισμός της διαστασιολόγησης του όγκου του ταμιευτήρα. Λόγω της γεωγραφικής θέσης της μονής και της μορφολογίας του εδάφους, αναζητούνται τα σενάρια διαστασιολόγησης που θα έχουν αποτέλεσμα το μικρότερο δυνατό ταμιευτήρα, για να μπορεί η λύση που προκύπτει να έχει και πρακτική εφαρμογή. Παράλληλα βέβαια υπολογίζεται και το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας έτσι ώστε να αποτελεί παράγοντα σύγκρισης μεταξύ των δύο εξεταζόμενων συστημάτων.

Από τις προσομοιώσεις λειτουργίας του συστήματος ΦΒ σταθμού με μπαταρίες, η οικονομικότερη λύση προκύπτει για ΦΒ σταθμό εγκατεστημένης ισχύος 768 kW και εγκατεστημένη χωρητικότητα μπαταρίας που ανέρχεται σε 2,75 MWh. Το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας από αυτή τη διαστασιολόγηση του συστήματος ανέρχεται σε 0,66 €/kWh που είναι και το χαμηλότερο δυνατό που προέκυψε από όλες τις πιθανές διαστασιολογήσεις που μελετήθηκαν.

Ως προς το σύστημα αντλησιοταμίευσης το βέλτιστο σενάριο ως προς το μικρότερο δυνατό σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας, απαιτεί ΦΒ σταθμό εγκατεστημένης ισχύος 510 kW ενώ απαιτείται ταμιευτήρας χωρητικότητας 31800 m<sup>3</sup>. Το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας που προκύπτει από αυτή τη διαστασιολόγηση, ανέρχεται σε 0,25 €/kWh, συντριπτικά

χαμηλότερο σε σχέση με την αντίστοιχη βέλτιστη οικονομικά διαστασιολόγηση του συστήματος ΦΒ σταθμού με μπαταρίες. Με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις της μονής η λύση του συστήματος αντλησιοταμίευσης μπορεί να αποτελέσει σημαντικά οικονομικότερη λύση σε σχέση με το σύστημα ΦΒ σταθμού με μπαταρίες.

Λόγω αδυναμίας επίσκεψης στη μονή Διονυσίου αλλά και έλλειψης αναλυτικότερων πληροφοριών για τη μορφολογία του εδάφους, εμφανίζεται το ενδεχόμενο να μην μπορεί να κατασκευαστεί ταμιευτήρας 31800 m<sup>3</sup> που απαιτείται, προκειμένου να μπορεί να προκριθεί σαν λύση το σύστημα αντλησιοταμίευσης. Για το λόγο αυτό, έγινε διερεύνηση ως προς τη διαστασιολόγηση των παραμέτρων του συστήματος, ώστε να υπολογιστεί ο μικρότερος δυνατός ταμιευτήρας που μπορεί να κατασκευαστεί με τις αντίστοιχες βέβαια επιπτώσεις στο σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας.

Από τις προσομοιώσεις λειτουργίας του συστήματος προκύπτει ότι η ελάχιστη δυνατή χωρητικότητα του ταμιευτήρα που προκύπτει, ανέρχεται σε 3900 m<sup>3</sup> και απαιτεί ΦΒ σταθμό εγκατεστημένης ισχύος 1,5 MW. Το σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας αυξάνεται κατά πολύ και ανέρχεται σε 0,57 €/kWh έναντι του 0,25€/kWh που αναφέρθηκε. Όμως παραμένει χαμηλότερο του ελάχιστου δυνατού σταθμισμένου κόστους παραγόμενης ενέργειας που υπολογίστηκε για το σύστημα ΦΒ σταθμού με μπαταρίες. Η λύση δηλαδή της αντλησιοταμίευσης, ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση παραμένει οικονομικότερη.

Ως προς τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των συστημάτων που παρουσιάστηκαν, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ποσό της απορριπτόμενης ενέργειας. Βάσει της ανάλυσης που έγινε στα διαθέσιμα στοιχεία της ζήτησης της μονής σε ηλεκτρική ενέργεια, αυτή υπολογίστηκε σε 272,4 MWh ετησίως. Η λύση που προκρίθηκε τελικά για το σύστημα ΦΒ σταθμού με μπαταρίες έχει ως αποτέλεσμα η απορριπτόμενη ενέργεια να ανέρχεται σε 942,4 MWh, προσεγγίζει δηλαδή το τετραπλάσιο της απαίτησης της μονής.

Αντίστοιχα για το σύστημα αντλησιοταμίευσης, η λύση με το μικρότερο δυνατό σταθμισμένο κόστος, που απαιτεί δηλαδή ταμιευτήρα χωρητικότητας 31800 m<sup>3</sup> και ΦΒ σταθμό εγκατεστημένης ισχύος 510 kW, έχει ως αποτέλεσμα την απόρριψη ενέργειας ύψους 585,5 MWh άνω δηλαδή του διπλάσιου της ζήτησης της μονής σε ετήσια βάση. Παραμένει όμως συντριπτικά μικρότερη της αντίστοιχης που προκύπτει από το σύστημα ΦΒ σταθμού με μπαταρίες. Στην περίπτωση που απαιτηθεί η λύση του συστήματος της αντλησιοταμίευσης με ταμιευτήρα χωρητικότητας 3900 m<sup>3</sup> και ΦΒ σταθμό εγκατεστημένης ισχύος 1,5 MW η απορριπτόμενη ενέργεια ανέρχεται σε 2,38 GWh.

Τα ποσά αυτά της απορριπτόμενης ενέργειας φανερώνουν το πρόβλημα υπερδιαστασιολόγησης που αντιμετωπίζουν τα πλήρως αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως απαιτείται δηλαδή στη περίπτωση της μονής Διονυσίου καθώς δεν είναι διασυνδεδεμένη στο κεντρικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να μην υπάρξει περιστατικό αστοχίας, δηλαδή να μπορεί να εξυπηρετηθεί η διακύμανση του φορτίου της μονής οποιαδήποτε

στιγμή του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος που μελετάται, απαιτείται η υπερδιαστασιολόγηση των παραμέτρων των συστημάτων που προτείνονται.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΣΕ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

- [1] [www.rae.gr](http://www.rae.gr)
- [2] Ν. Μαμάσης, και Α. Ευστρατιάδης, Σημειώσεις μαθήματος: Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2018.
- [3] Κ. Θ. Δέρβος, “Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και στις φωτοβολταϊκές διατάξεις”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2009.
- [4] Κ. Θ. Δέρβος, “Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2013.
- [5] [www.selasenergy.gr](http://www.selasenergy.gr)
- [6] David Linden, Thomas B. Reddy, “Handbook of Batteries”, McGraw-Hill, 3rd ed., New York, 2002.
- [7] Ναταλία Η. Ιγγλέζου, “Ανάλυση Λειτουργίας και Μοντελοποίησης Συσσωρευτών”, διπλωματική εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2013.
- [8] [www.dei.gr](http://www.dei.gr)
- [9] [www.ypethe.gr](http://www.ypethe.gr)
- [10] [www.ppcr.gr](http://www.ppcr.gr)
- [11] Αγγελική Χ. Λουκάτου, “Τεχνολογίες Αποθήκευσης Αιολικής Ενέργειας με Αντλησιοταμίευση”, διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα 2013.
- [12] Αγγελική Σαγάνη, “Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας –Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές”, διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα 2009.
- [13] Άννα Κατσανεβάκη, “ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ (ΛΙΜΝΗ ΠΛΑΣΤΗΡΑ)”, διπλωματική εργασία. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2018.
- [14] Καλλιόπη Νατούδη, “ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΑΠΕ”, μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ “Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας”, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017.
- [15] [www.lazards.com](http://www.lazards.com)
- [16] [www.irena.org](http://www.irena.org)

- [17] IRENA, “Future Of Solar Photovoltaic – A Global Energy Transformation paper”, November 2019
- [18] LAZARD, “Lazard’s levelized cost of energy analysis-version 13.0”, November 2019
- [19] Δημήτριος Παπαντώνης, “Νέες προοπτικές για την Ανάπτυξη της αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα Τεχνολογία και Τεχνολογικοί Περιορισμοί”.
- [20] Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές μηχανές-αντλίες-υδροστρόβιλοι-Υδροδυναμικές μεταδόσεις”, Αθήνα 2015
- [21] Π. Κάπρος, Κ. Ντελκής, “Οικονομική ανάλυση επιχειρήσεων”. Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2014.