

Διαστασιολόγηση και Προσομοίωση Λειτουργίας Αιολικών Πάρκων Μικρού και Μεσαίου Μεγέθους

Χατζηαγγέλου Άγγελος

Επιβλέπων καθηγητής
Δημήτριος Ιψάκης
Χανιά, 2022

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως κύριο σκοπό της την ανάπτυξη αλγορίθμου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, με στόχο τον σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου παραγωγής ενέργειας ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες. Αρχικά, παρουσιάζονται διάφορες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αναλύεται η λειτουργία των ανεμογεννητριών για την λύση των περιβαλλοντολογικών προβλημάτων αλλά και για την καλύτερη κατανόηση της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί μία ανασκόπηση σε παρόμοιες εργασίες της βιβλιογραφίας, στην οποία αναλύεται και σχολιάζεται η μοντελοποίηση, η μεθοδολογία και τα χαρακτηριστικά αποτελέσματα σε διάφορα προβλήματα διαστασιολόγησης αιολικών πάρκων, φωτοβολταϊκών σταθμών καθώς και υβριδικών συστημάτων ανεμογεννητριών-φωτοβολταϊκών.

Στη συνέχεια για την υλοποίηση του υπολογιστικού τμήματος της εργασίας, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού παραγωγής ενέργειας των ανεμογεννητριών το οποίο συγκρίνεται με τις εργοστασιακές προδιαγραφές της κάθε ανεμογεννήτριας ώστε να ελεγχθεί η εγκυρότητα του (εξακρίβωση μοντέλου). Επιπρόσθετα, αναπτύσσεται και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό του μεγέθους του αιολικού πάρκου ανάλογα με την ενεργειακή ζήτηση που έχει επιλεχθεί (σενάριο λειτουργίας/βελτιστοποίησης). Με βάση το παραπάνω μοντέλο, πραγματοποιείται η ανάπτυξη κώδικα στο περιβάλλον matlab αξιοποιώντας το πακέτο βελτιστοποίησης γενετικών αλγορίθμων που στοχεύει στην βέλτιστη διαστασιολόγηση του αιολικού πάρκου.

Στα βασικά τμήματα της εργασίας, πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση για τρία διαφορετικά ενεργειακά προφίλ: ένα σπίτι, ένα σούπερ μάρκετ και ένα νοσοκομείο. Οι ανεμογεννήτριες που θα χρησιμοποιηθούν για την μελέτη είναι της τάξης των 600W, 800W, 1000W, 1500W και 2000W. Παρατηρήθηκε όμως ότι αυτές χρειάζεται ένας πολύ μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στο σούπερ μάρκετ και στο νοσοκομείο, οπότε χρησιμοποιήθηκαν και ανεμογεννήτριες των 0.5 MW, 1 MW και 2.3 MW (καθώς και ο συνδυασμός τους).

Λέξεις κλειδιά: Ανεμογεννήτρια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), αιολική ενέργεια, αιολικό πάρκο, διαστασιολόγηση αιολικού πάρκου, προσομοίωση αιολικού πάρκου, net-metering, ενεργειακό πρόβλημα.

Abstract

The present thesis, deals with the concept of developing a simulation and optimization algorithm with aim of designing the wind farms size depending on the energy needs. First and foremost, an introduction at the general idea of Renewable energy sources is presented followed by the basic functions and types of wind generators and how they can contribute with the environmental issues that have come up.

Firstly, a review will be carried out in similar papers of studies in which the modeling, methodology and results in various problems of sizing wind farms, photovoltaic stations as well as hybrid PV/WG systems, will be analyzed and commented on. Furthermore, for the implementation of the computational part of the diplomatic assignment, the mathematical model for calculating the energy production is presented, which is compared to the factory specifications of each wind turbine to check its validity.

Based on the above model, the development of code in the matlab environment is carried out, utilizing the package of optimization of genetic algorithms that aims at the optimal sizing of the wind farm. This is being held in the main part of the assignment, the optimization will be implemented on different energy profiles, a household, a super market and a hospital. Lastly, the wind turbines that will be used for the study will be 600W , 800W, 1000W, 1500W, 2000W and if those wind generators are not enough to power the chosen energy profile or the result is unfilled, 3 more will be used at the power of 0.5MW, 1MW 2.3MW.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1°	5
1.1 Εισαγωγή	5
1.2 Ανεμογεννήτριες	6
1.3 Πρόβλημα διαστασιολόγησης ανεμογεννητριών	7
1.4 Σύντομη ανάλυση βιβλιογραφίας	8
1.4.1 Βέλτιστη διαστασιολόγηση συστήματος ανεξαρτήτου δικτύου φωτοβολταϊκής και αιολικής παραγωγή	8
1.4.2 Βέλτιστη διαστασιολόγηση ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου και μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας MILP (Mixed-Integer Linear Programming) και δυναμική αξιολόγηση μετασχηματισμού	13
1.4.3 Ένα νέο μέγεθος μεταβλητότητας της αιολικής ενέργειας με εφαρμογές στην βέλτιστη διαστασιολόγηση των αυτόνομων συστημάτων αιολικής ενέργειας	17
1.4.4 Βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ανεμογεννήτριας και υπεραγωγίμης αποθήκης μαγνητικής ενέργειας του συστήματος διανομής	21
1.4.5 Μεθοδολογία για βέλτιστη διαστασιολόγηση αυτόνομου υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών και ανεμογεννήτριας	23
1.4.6 Βέλτιστη διαστασιολόγηση συστήματος ανεμογεννήτριας-μπαταρίας ενσωματώνοντας την αβεβαιότητα των πόρων	25
1.5 Σκοπός της διπλωματικής	28
Κεφάλαιο 2ο	29
2.1 Μαθηματικό μοντέλο ανεμογεννήτριας	29
2.2 Σύγκριση θεωρητικών πειραματικών και θεωρητικών τιμών για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών	
2.3 Συμπεράσματα ακρίβειας μαθηματικού μοντέλου	35
2.4 Σύγκριση θεωρητικών πειραματικών και θεωρητικών τιμών για μεγαλύτερους τύπους ανεμογεννητριών	36
2.5 Συμπεράσματα	38
Κεφάλαιο 3°	39
3.2 Δεδομένα εισαγωγής	40
3.3 Παρουσίαση κώδικα	43
3.4 Βελτιστοποίηση	44
Κεφάλαιο 4°	46
4.1 Ενεργειακό προφίλ σπιτιού	46
4.1.2 Βελτιστοποίηση για όλους τους τύπους ανεμογεννητριών	46
4.2 Ενεργειακό προφίλ σούπερ μάρκετ	52
4.2.1 Βελτιστοποίηση για όλους τους τύπους ανεμογεννητριών	52
4.3 Ενεργειακό προφίλ νοσοκομείου	59
4.3.2 Βελτιστοποίηση για όλους τους τύπους ανεμογεννητριών	59
4.3.3 Βελτιστοποίηση για μεγαλύτερους τύπους ανεμογεννητριών	63
Κεφάλαιο 5°	67
Βιβλιογραφία	68
Παράρτημα	70

Κεφάλαιο 1°

1.1 Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ενέργεια που δημιουργείται από φυσικές πηγές όπως ο ήλιος, ο άνεμος, οι υδατοπτώσεις, η γεωθερμία και η βιομάζα, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να ανανεώνονται με φυσικό τρόπο και στον ίδιο ρυθμό με τον οποίο χρησιμοποιούνται.

Η κλιματική αλλαγή, λόγω της όξυνσης του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς και της συνεχούς αύξησης των τιμών του πετρελαίου έχουν οδηγήσει τη διεθνή κοινότητα σε αύξηση του ενδιαφέροντος της προς τις ΑΠΕ. Επομένως, έχει προωθηθεί μια σειρά κινήτρων και νόμων για την καλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ στις διεθνείς αγορές. Κάτι τέτοιο, εκτός από την παραγωγή ενέργειας, έχει πολλαπλά οφέλη όπως την αύξηση της ευελιξίας των ηλεκτρικών συστημάτων, τη δημιουργία θέσεων εργασίας, την αύξηση των εναλλακτικών λύσεων σε πηγές ενέργειας και την μείωση της εξάρτησης από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων.

Χαρακτηριστικά, οι επενδύσεις στις ΑΠΕ αυξάνονται ραγδαία κάθε χρόνο ενώ αντίστοιχη αύξηση σημειώνουν και οι τιμές της εγκατεστημένης ισχύος ανά τεχνολογία. Βέβαια η προσέγγιση του ενεργειακού προβλήματος συχνά περιορίζεται στην ανάλυση του ζητήματος της εξάντλησης των φυσικών πόρων και της ρύπανσης παραλείποντας την σύνδεση της ενέργειας με τον ανθρώπινο καταναλωτισμό τόσο σε ατομικό όσο και σε συλλογικό επίπεδο. Όμως σύμφωνα με τον Rees τα οικονομικά συστήματα είναι αυτά που κατά κανόνα δημιουργούν οικολογικά προβλήματα, αφού μέσα από τη διαδικασία της παραγωγής και της κατανάλωσης επιβάλλουν την εκμετάλλευση του φυσικού περιβάλλοντος για την άντληση πόρων και τη χρήση της βιόσφαιρας ως επιστροφής των απόβλητων.

ΜΟΡΦΕΣ ΤΩΝ Α.Π.Ε

- **Αιολική ενέργεια:** Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Σήμερα έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- **Ηλιακή ενέργεια:** Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.
- **Υδραυλική ενέργεια:** Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.
- **Βιομάζα:** Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα

παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.

- **Γεωθερμική ενέργεια:** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
- **Ενέργεια από παλίρροιες:** Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.
- **Ενέργεια από κύματα:** Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
- **Ενέργεια από τους ωκεανούς:** Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων.
- **Ωσμωτική ενέργεια:** Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

1.2 Ανεμογεννήτριες

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το καύσιμο είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μία πρακτική που βρίσκει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι τα ιστιοφόρα και οι ανεμόμυλοι. Σήμερα, για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούμε τις ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Η αιολική ενέργεια είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.


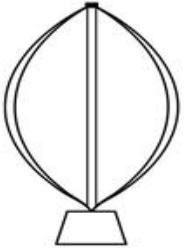


Η εκμετάλλευση του υψηλού της δυναμικού στη χώρα μας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών που ενσωματώνεται στις σύγχρονες αποδοτικές ανεμογεννήτριες, έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Η ανεμογεννήτρια είναι αιολική μηχανή που παράγει ρεύμα από την αιολική ενέργεια και μπορεί να τροφοδοτήσει με ρεύμα κατοικημένες περιοχές όπως πόλεις, κωμοπόλεις ή χωριά.

Πολλές ανεμογεννήτριες μαζί αποτελούν ένα αιολικό πάρκο. Όμως υπάρχει μεγάλο κόστος για να κατασκευαστεί και να τοποθετηθεί μία ανεμογεννήτρια και ακόμη μεγαλύτερο κόστος για να κατασκευαστεί ένα αιολικό πάρκο.

Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής και το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής, ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Υπάρχουν δύο τύποι ανεμογεννητριών, βάση γεωμετρικής διάταξης της συσκευής: Αυτές οριζόντιου και αυτές κάθετου άξονα, με αυτές του οριζόντιου άξονα να είναι οι πιο διαδεδομένες αυτή τη στιγμή στον κόσμο. Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ο δρομέας τους είναι τύπου έλικα και βρίσκεται σε θέση παράλληλη με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους. Στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα ο δρομέας τους παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.

	HAWT	VAWT
Lift Type		
Drag Type		

Εικόνα 1.1 Είδη ανεμογεννητριών

1.3 Πρόβλημα διαστασιολόγησης ανεμογεννητριών.

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή είδους και μεγέθους της ανεμογεννήτριας είναι το ποσό ενέργειας το οποίο απαιτείται να παράξει. Έχει μεγάλη διαφορά η αναγκαία ενέργεια ενός σπίτιου, με ένα νοσοκομείο ή ένα συγκρότημα κατοικιών. Γνωρίζοντας πως τα καιρικά φαινόμενα είναι ασταθή υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην κατάλληλη και συνεχής παροχή ηλεκτρισμού οπότε σύνηθες φαινόμενο είναι η συνεργασία με έναν πάροχο ενέργειας για την εξασφάλιση της σταθερής παροχής.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός πλήρους συστήματος εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει:

- Μελέτη των χαρακτηριστικών του ανέμου με σκοπό την εκλογή της *βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση του ανεμοκινητήρα και την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας.*
- Σχεδιασμός της αεροδυναμικής διάταξης, που να μετατρέπει κατά τον αποδοτικότερο τρόπο την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο.
- Μελέτη της περίπτωσης μετατροπής του μηχανικού έργου σε άλλη πιο συμφέρουσα μορφή ενέργειας και βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα.
- Εύρεση του καλύτερου τρόπου αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της ενέργειας του ανέμου.
- Μελέτη του βέλτιστου τρόπου μεταφοράς ενέργειας αν απαιτείται.
- Διερεύνηση της καλύτερης προσαρμογής της μεταβαλλόμενης παραγωγής ενέργειας του συστήματος προς την κατανάλωση.



1.4 Σύντομη ανάλυση βιβλιογραφίας.

Σκοπός είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός μίας η παραπάνω ανεμογεννητριών με στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών εγκαταστάσεων διαφόρων ειδών. Για την μοντελοποίηση και τον σχεδιασμό θα χρησιμοποιηθεί κώδικας matlab.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν διάφορες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης ανεμογεννητριών και συστημάτων ανεμογεννητριών/φωτοβολταϊκών όπως και εξαρτημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την βιβλιογραφία.

1.4.1 Βέλτιστη διαστασιολόγηση συστήματος ανεξαρτήτου δικτύου φωτοβολταϊκής και αιολικής παραγωγής

Για την εργασία με αγγλικό τίτλο " Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system " μελετήθηκαν ο σκοπός της εργασίας, η μεθοδολογία, καθώς και η σχετική περιγραφή του συστήματος με τα αποτελέσματα της έρευνας τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. (Kaabeche et al., 2011) [1]

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα υπάρχουν διάφοροι τρόποι αξιολόγησης του συστήματος ανεξαρτήτου δικτύου φωτοβολταϊκής και αιολικής παραγωγής όπως η αναλογία ενέργειας και φορτίου, μπαταρίας και φορτίου καθώς και της μη-διαθεσιμότητας της ενέργειας. Προκειμένου να επιλεγεί ο βέλτιστος συνδυασμός του συστήματος για να ικανοποιηθεί η ζήτηση του φορτίου η αξιολόγηση μπορεί να γίνει με βάση την αξιοπιστία και την οικονομία της ενεργειακής τροφοδοσίας όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.(Diaf et al., 2008)[2]

Κριτήρια αξιοπιστίας βάση μεθοδολογίας DPSP (Deferred Profit Sharing Plan).

Σε αυτή τη μελέτη, η αξιοπιστία του συστήματος εκφράζεται με την πιθανότητα έλλειψης τροφοδοσίας (DPSP) που είναι η πιθανότητα να προκύπτει ανεπαρκής τροφοδοσία όταν το υβριδικό σύστημα δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσει τη ζήτηση φορτίου. Η τεχνική DPSP

θεωρείται ότι είναι τεχνικά εφαρμοσμένα κριτήρια για το μέγεθος και την αξιολόγηση ενός Φ/Β/αιολικού συστήματος που χρησιμοποιεί μπαταρίες.

Το τεχνικό μοντέλο για το υβριδικό σύστημα διαστασιολόγησης ανατύσσεται με την μέθοδο DPSP. Η μεθοδολογία αυτή θα αναλυθεί συνοπτικά παρακάτω:

- Εάν η ισχύς που παράγεται από το Φ/Β/αιολικό σύστημα είναι μεγαλύτερη από την αναγκαία για μια συγκεκριμένη στιγμή τότε το πλεόνασμα ενέργειας αποθηκεύεται στην μπαταρία και υπολογίζεται η νέα κατάσταση φόρτισης.
- Όταν η ενεργειακή ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την διαθέσιμη ενέργεια που παράγεται από το Φ/Β/αιολικό σύστημα, η μπαταρία θα χρησιμοποιηθεί για τη εξασφάλιση της ζήτησης φορτίου.

Στην πρώτη περίπτωση όταν η μπαταρία φτάσει τη μέγιστη φόρτιση (SOC_{max}) το σύστημα ελέγχου σταματάει την διαδικασία της φόρτισης. Η περίσσεια ισχύς που παράγεται είναι σημαντική παράμετρος η οποία δίνει το ποσό ενέργειας που δεν χρησιμοποιείται από το σύστημα. Αυτή η τιμή μπορεί να ποικίλλει λόγω της διακύμανσης της ωριαίας ζήτησης, της ταχύτητας του αέρα όπως και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Στην περίπτωση 2 αν η κατάσταση της μπαταρίας μειωθεί στο ελάχιστο, SOC_{min} , το σύστημα ελέγχου αποσυνδέεται από το φορτίο και αυτό το έλλειμμα ονομάζεται ανεπάρκεια τροφοδοσίας (DPS).

Η πιθανότητα έλλειψης τροφοδοσίας (DPSP), για μια θεωρούμενη περίοδο T (1 έτος σε αυτή τη μελέτη), μπορεί να οριστεί ως η αναλογία όλων των τιμών ($DPS(t)$) για εκείνη την περίοδο ως προς το άθροισμα του φορτίου ζήτησης και εκφράζεται ως εξής:

$$DPSP = (\sum_{t=1}^T DPS(t)) / \sum_{t=1}^T EL(t) \text{ (Εξ.1.1)}$$

(Prasad & Natarajan, 2006)[3]

Όταν η τιμή του DPSP είναι 1, αυτό σημαίνει πως το φορτίο δεν θα ικανοποιηθεί ποτέ, ενώ όταν είναι 0 τότε το φορτίο θα είναι πάντα ικανοποιημένο. Αναπτύχθηκε παράλληλα ο κώδικας των παραπάνω εξισώσεων σε περιβάλλον Matlab για να διαστασιολογηθούν τα εξαρτήματα.

Τα δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα αποτελούνται από ωριαίες μετρήσεις τις ηλιακής ακτινοβολίας, ωριαίες μέσες τιμές της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου, την επιθυμητή DPSP καθώς και τις απαιτήσεις ισχύος φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο οι απαιτήσεις τις ενέργειας που ικανοποιούν το σύστημα μπορούν να υπολογιστούν και το βέλτιστο υπολογίζεται από το ελάχιστο LUEC το οποίο εμφανίζεται παρακάτω.

Οικονομικά κριτήρια βάση LUEC μοντέλου:

Levelized Unit Electricity Cost η αλλιώς σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής μονάδας εκφράζεται ως:

$$LUEC = \frac{LCC * CRF}{\sum_{t=1}^{8760} E_{gen}(t)} \quad (\text{Εξ. 1.2})$$

Όπου LCC είναι το κόστος κύκλου ζωής του συστήματος CRF είναι το Capital Recovery Factor το οποίο είναι ο αριθμός ετήσιων καταθέσεων.

Αποτελέσματα – Συμπεράσματα:

Έτσι για τα εξής χαρακτηριστικά έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας:

- $P=400W$
- $\text{Ταχύτητα περικοπής} = 3 \text{ m/s}$
- $\text{Rated speed} = 12 \text{ m/s}$
- $\text{Cut- off speed} = 25 \text{ m/s}$
- $\text{Height} = 10 \text{ m}$

Χαρακτηριστικά μπαταρίας:

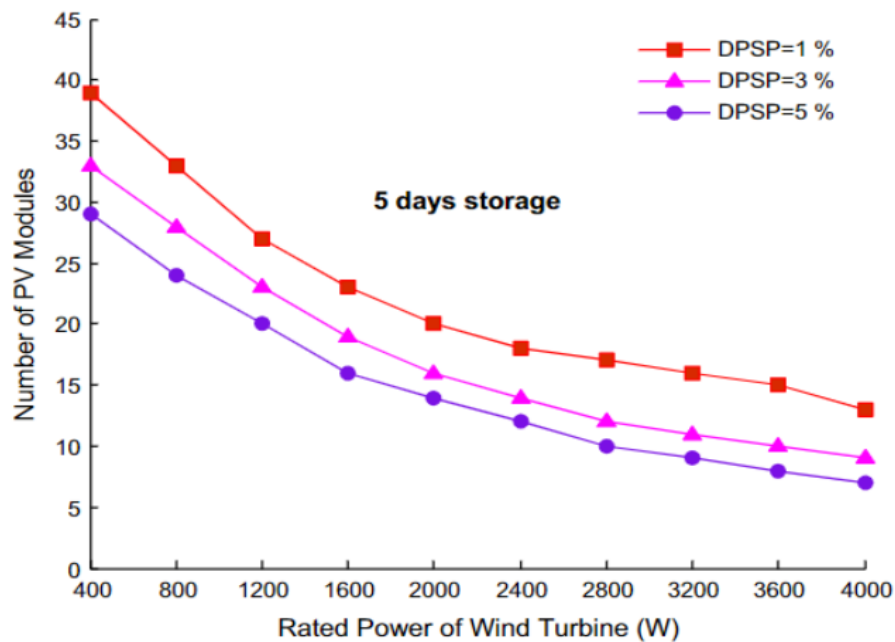
- $\text{Nominal capacity} = 100Ah$
- $\text{Voltage} = 12 \text{ V}$
- $\text{Round-trip efficiency} = 0.85$
- $\text{DOD} = 50\%$

Στο διάγραμμα 1.1 φαίνεται η σχέση μεταξύ των τιμών του DPSP και τα χαρακτηριστικά του συστήματος για διάφορες μέρες αυτονομίας της μπαταρίας. Στο διάγραμμα 1.1 φαίνεται η σχέση μεταξύ των τιμών του DPSP και τα χαρακτηριστικά του συστήματος για διάφορες μέρες αυτονομίας της μπαταρίας. Ενώ στα 1.2, 1.3 και 1.4 εμφανίζεται σχεδιαστικά η σχέση μεταξύ LUEC και των χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων του συστήματος, για 1% για 3% και για 5% DPSP ανάλογα. Στο υβριδικό αυτό σύστημα παρατηρούμε πώς εφαρμόζοντας τα μοντέλα DPSP και LUEC βρίσκουμε αξιοπιστία παροχής ρεύματος καθώς και το κόστος του συστήματος.

Το συνιστόμενο μοντέλο αποτελείται από τρία κομμάτια:

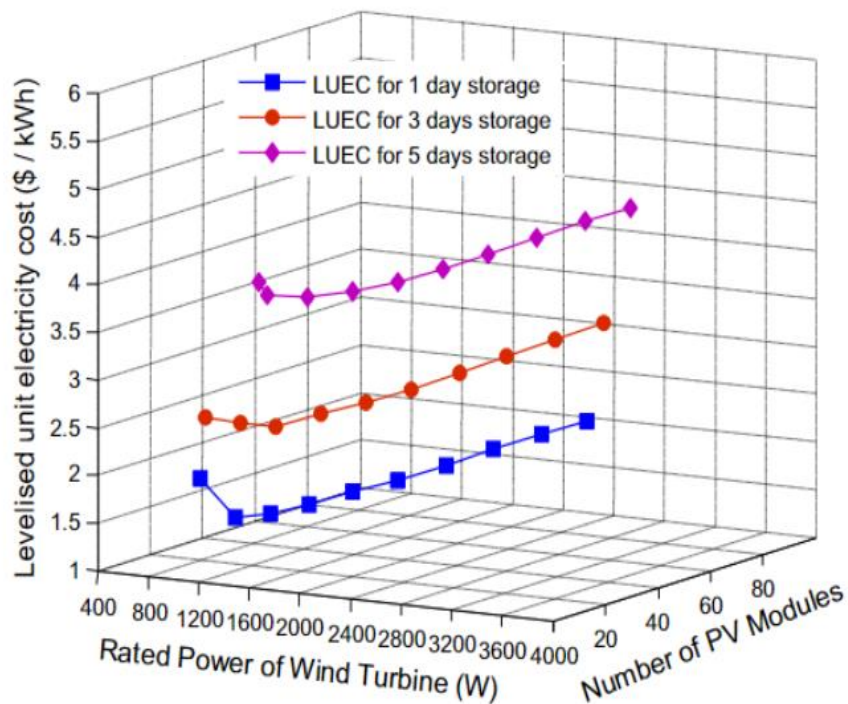
- το υπομοντέλο του υβριδικού συστήματος

- ο *το τεχνικό υπομοντέλο που αναπτυχθηκε βάση του dsps*
- ο *καθώς και το LUEC το οποίο θεωρείται αξιόπιστος δείκτης οικονομικού κέρδους.*



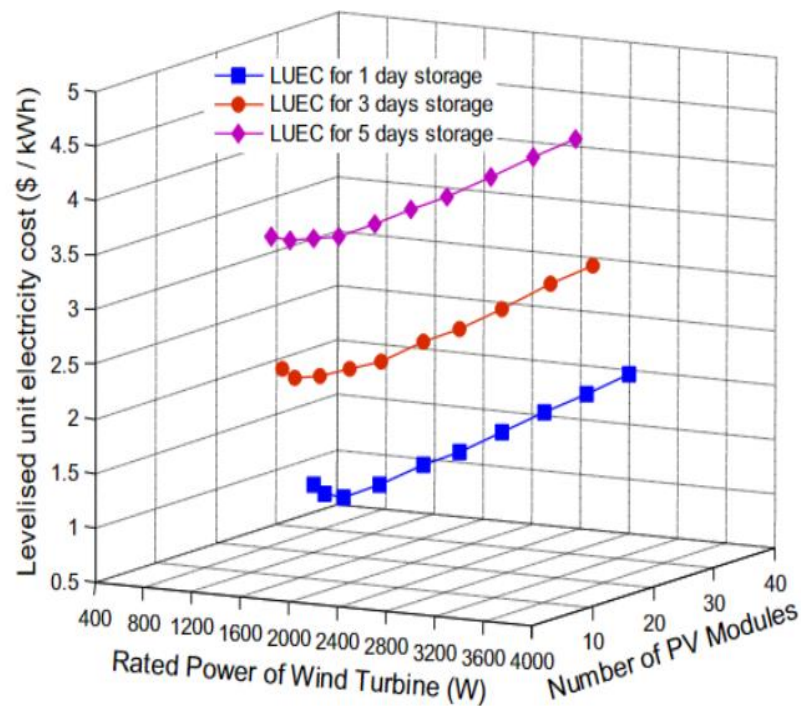
Διάγραμμα 1.1 Διαμόρφωση συστήματος για διαφορετικά DPSP για 6 μέρες αυτονομίας της μπαταρίας.

Πηγή: Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system



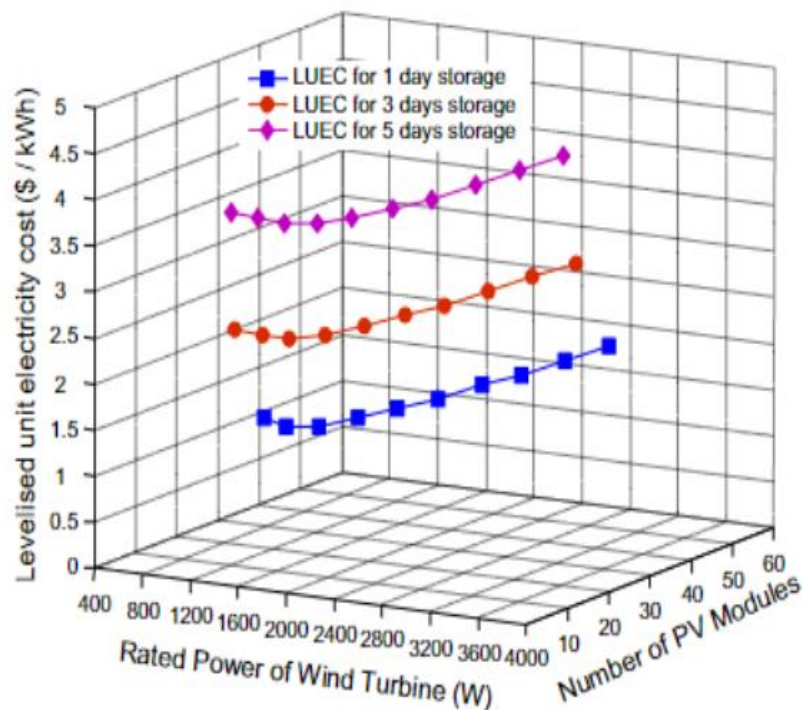
Διάγραμμα 1.2 Διαμόρφωση συστήματος και LUEC για DPSP = 3%

Πηγή: Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system



Διάγραμμα 1.3 Διαμόρφωση συστήματος και LUEC για DPSP=1%

Πηγή: Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system



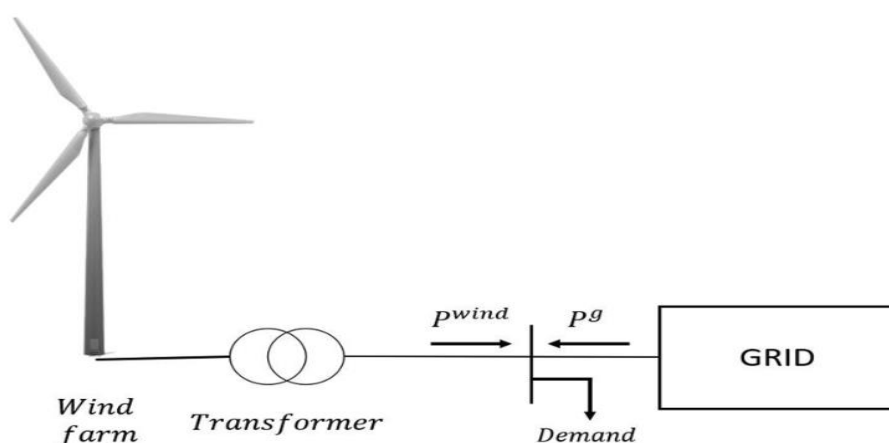
Διάγραμμα 1.4 Διαμόρφωση συστήματος και LUEC για DPSP = 5%

Πηγή: Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation sstem

1.4.2 Βέλτιστη διαστασιολόγηση ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου και μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας MILP (Mixed-Integer Linear Programming) και δυναμική αξιολόγηση μετασχηματισμού.

Για την εργασία με αγγλικό τίτλο "Optimal sizing of the wind farm and wind farm transformer using MILP and dynamic transformer rating" μελετήθηκαν ο σκοπός της εργασίας, η μεθοδολογία, καθώς και η σχετική περιγραφή του συστήματος με τα αποτελέσματα της έρευνας τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. (Molina Gómez et al., 2022)[4].

Ένα από τα μειονεκτήματα της διακοπτόμενης φόρτισης είναι η μη ενιαία φόρτιση των κατασκευαστικών στοιχείων μεταφοράς, τα οποία έχει ως αποτέλεσμα πολλά και μεγάλα εξαρτήματα, όπως μετασχηματιστές ισχύος να υποχρησιμοποιούνται όταν πλησιάζουν στο χρόνο του παροπλισμού. Όμως, με την λειτουργία "έξυπνου πλέγματος" και άλλες μεθόδους μπορούν αυτά τα προβλήματα να μετατραπούν σε όφελος προς το σύστημα.



Εικόνα 1.2 Σύστημα αιολικού πάρκου

Η **δυναμική αξιολόγηση** είναι μια λειτουργική στρατηγική που επιτρέπει την εναλλαγή των ορίων φόρτισης των εξαρτημάτων του συστήματος ισχύος ανάλογα με τη θερμική ανταπόκριση στις συνθήκες συστήματος και καιρού

Μεθοδολογία:

Σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του NPV του συμπλέγματος ανεμογεννητριών.

Η **αντικειμενική συνάρτηση** είναι η παρακάτω:

$$\max NPV = \sum_{i=1}^n \left(\frac{CashFlow_i}{(1+r)^i} \right) - InitialInvestment \quad [€] \quad (Εξ. 1.3)$$

όπου:

$$Cashflow_i = Benefits_i - Costs_i + Certificate_i \quad (Εξ. 1.4)$$

Και

$$Benefits_i = \sum_{t=1}^T P_{wind} * 1h * Elprice \quad (Εξ. 1.5)$$

$$Certificate = \sum_{t=1}^T (P_{wind} * Cprice) \quad (Εξ. 1.6)$$

Ο συνολικός αριθμός ανεμογεννητριών αποφασίζεται από την μεταβλητή $num_{turbine}$, όπως και η παράμετρος Cap_{tur} αντιπροσωπεύει την ισχύ μίας ανεμογεννήτριας και r τα 25 χρόνια ζωής της ανεμογεννήτριας [5], με $C_{price} = 0.305 [€/MWh]$ [6].

$$Cap_{wind} = Num_{tur} * Cap_{tur} \quad (Εξ. 1.7)$$

Τα παρακάτω αποτελέσματα έχουν ληφθεί από την Πηγή: "*Optimal sizing of the wind farm and wind farm transformer using MILP and dynamic transformer rating*"

Για τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

Rated power	5 MW
Cut-in wind speed	2 m/s
Rated wind speed	14 m/s
Cut-out wind speed	27 m/s
Wind class (IEC)	Ia
Rotor diameter	128 m
Swept area	12,868.0 m ²
N° of blades	3
Hub height	81/95/120/140 m

Και κόστη:

Πίνακας 1.2 Κόστη αιολικού πάρκου .

Investment cost	1000 k€/installed MW
Investment cost per turbine	5000 k€
Turbine cost	3200 k€
Civil works cost	650 k€
Electrical infrastructure cost	400 k€
Grid connection	300 k€
Planning & Miscellaneous	450 k€
Fixed O&M cost	75 k€
Variable O&M cost	9.3€/MWh

Καθώς και η ζήτηση :

Πίνακας 1.3 Ανάλυση ηλεκτρικής ζήτησης

Year	Average [MWh]	Maximum [MWh]	Minimum [MWh]
2013	994	1747	506
2014	961	1591	522
2015	973	1513	547
2016	994	1768	521
2017	996	1661	551
2018	1000	1709	547
2019	983	1631	545
2013–2019	986	1768	506

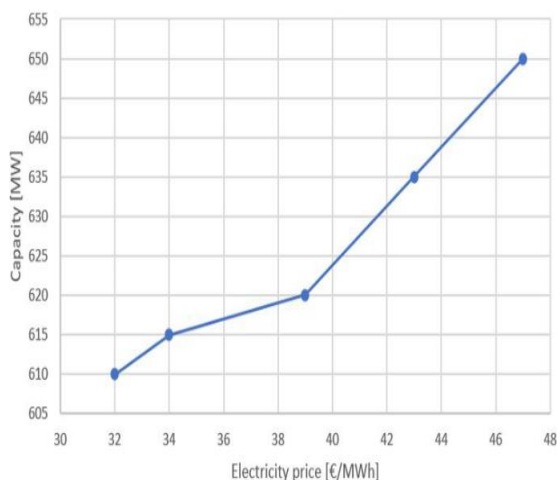
Αποτελέσματα:

Η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης για διάφορους τύπους μετασχηματιστών και η ανάλυση ευαισθησίας διαφόρων παραμέτρων εισαγωγής παρουσιάζεται παρακάτω.

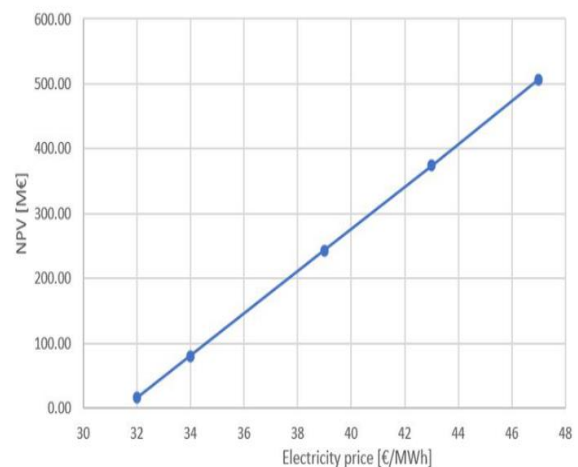
Πίνακας 1.4 Βέλτιστη διαστασιολόγηση αιολικού πάρκου και NPV για διαφορετικούς μετασχηματιστές , για κόστος 100 ευρώ/MWh

Electricity price [€/MWh]	Capacity [MW]	N° turbines	LOL	NPV [Μ€]
32	610	122	7200.72	16.2
34	615	123	7200.72	80.6
39	620	124	7200.72	243
43	635	127	7200.72	374
47	650	130	7200.72	507

Καθώς ο μετασχηματιστής 400 MVA είναι αυτός με την υψηλότερη NPV, αυτός ο μετασχηματιστής επιλέγεται για να μελετηθεί η επίδραση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Εξετάζονται πέντε τιμές ηλεκτρικής ενέργειας: 32 €/MWh, 34 €/MWh, 39€/MWh, 43 €/MWh και 47 €/MWh. Το πρόβλημα καθίσταται ανέφικτο για χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας



Διάγραμμα 1.5 Σύγκριση δυναμικότητας όταν μεταβάλλεται η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας



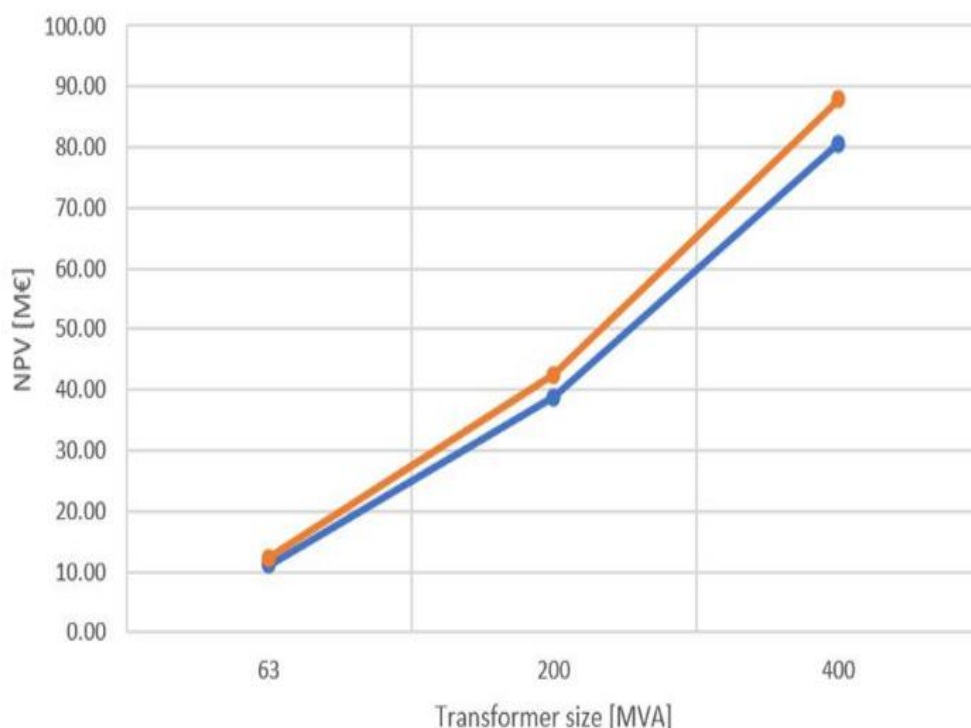
Διάγραμμα 1.6 Σύγκριση NPV όταν μεταβάλλεται η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας

Πίνακας 1.5 Σύγκριση μεταξύ των αρχικών παραμέτρων του μετασχηματιστή (υποδεικνύονται με 1) και των τροποποιημένων παραμέτρων (υποδεικνύονται με 2)

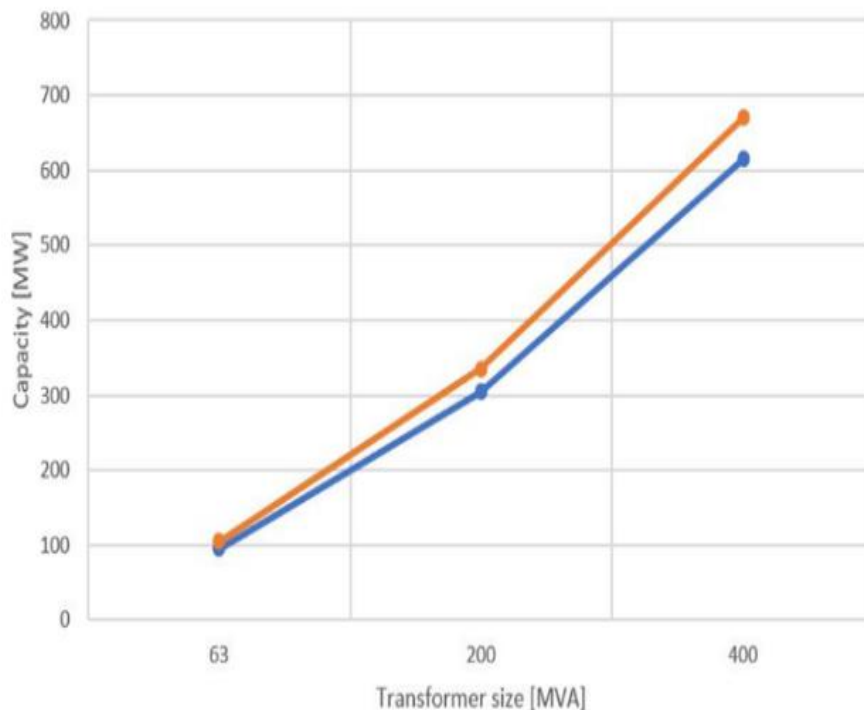
Trans [MVA]	Cap.1 [MW]	Cap.2 [MW]	Tur.1	Tur.2	NPV1 [Μ€]	NPV2 [Μ€]
63	95	105	19	21	11.2	12.4
200	305	335	61	67	38.8	42.5
400	615	670	123	134	80.8	87.9

Στο παρακάτω διάγραμμα πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αρχικού μετασχηματιστή και τα αποτελέσματα με διαφορετικές παραμέτρους αλλάζοντας το R και το T_0 .

Σχεδιαστικά εμφανίζονται παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 1.7 Σύγκριση χωρητικότητας όταν μεταβάλλεται η παράμετρος του μετασχηματιστή.



Διάγραμμα 1.8 Σύγκριση του NPV όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι του μετασχηματιστή.

Στα παραπάνω διαγράμματα με μπλέ χρώμα εμφανίζεται ο αρχικός μετασχηματιστής ενώ με πορτοκαλί ο τροποποιημένος. Παρατηρείται πώς όσο μεγαλύτερος ο μετασχηματιστής τόσο αυξάνεται και η ανταπόκριση. Ακόμα, στο διάγραμμα 1.5, αναλύοντας τον μετασχηματιστή των 400MVA είναι πιθανό να αυξηθεί η χωρητικότητα κατά 9 %.

Συμπεράσματα:

Η μέθοδος που παρουσιάζεται σε αυτή τη μελέτη μπορεί να βοηθήσει στο βέλτιστο σχεδιασμό του αιολικού πάρκου καθώς και στην επιλογή μετασχηματιστή κατάλληλου μεγέθους. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα, ένας μεγαλύτερος μετασχηματιστής παράγει υψηλότερα οφέλη και απαιτεί μεγαλύτερο αιολικό πάρκο. Ως εκ τούτου, ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέξει τη διαστασιολόγηση του αιολικού πάρκου ανάλογα με περισσότερους παράγοντες όπως τον διαθέσιμο χώρο για την κατασκευή του αιολικού πάρκου, την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, κλπ. Σε όλες τις περιπτώσεις, η εξέλιξη της NPV και της παραγωγικής ικανότητας είναι γραμμικές. Με λίγα λόγια, όσο μεγαλύτερος ο μετασχηματιστής τόσο μεγαλύτερο και το επιθυμητό μέγεθος του αιολικού πάρκου, οπότε αυξάνονται και τα οφέλη.

1.4.3 Ένα νέο μέγεθος μεταβλητότητας της αιολικής ενέργειας με εφαρμογές στην βέλτιστη διαστασιολόγηση των αυτόνομων συστημάτων αιολικής ενέργειας.

Για την εργασία με αγγλικό τίτλο "A new measure of wind power variability with implications for the optimal sizing of standalone wind power systems" μελετήθηκαν ο σκοπός της

εργασίας, η μεθοδολογία, καθώς και η σχετική περιγραφή του συστήματος με τα αποτελέσματα της έρευνας τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω . (Yuan et al., 2020)[7]

Το πρωταρχικό μέλημα των περισσότερων χρηστών συστημάτων αιολικού πάρκου, είναι να διασφαλίσουν ότι θα παρέχουν αξιόπιστη ισχύ, ενώ παράλληλα να επιβαρύνονται με μικρότερο συνολικό κόστος. Η διαστασιολόγηση θα καθορίσει το κατάλληλο μέγεθος ανεμογεννήτριας και τη χωρητικότητα της μπαταρίας ώστε να επιτραπεί στα συστήματα να παρέχουν αξιόπιστη και οικονομική ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη της ζήτησης του φορτίου(Li et al., 2018; Lujano-Rojas et al., 2012; Zhao et al., 2014)[8-10]

Για την ισχύ της ανεμογεννήτριας έχουμε [11]:

$$\begin{array}{ll} \text{Για } v < v_i \text{ ή } v > v_o & P_w = 0 \\ \text{Για } V_i < V < V_r & P_w = 0.5 * \rho * A_w * V^3 * C_p * \eta_w \\ \text{Για } V_r < V < V_o & P_w = 0.5 * \rho * A_w * V_r^3 * C_p * \eta_w \end{array} \quad (\text{Εξ. 1.8})$$

Όπου V είναι ταχύτητα ανέμου και V_i η ταχύτητα περικοπής , V_r η V_{rated} βαθμολογημένη ταχύτητα και τέλος η ταχύτητα αποκοπής v_o .

Οπότε για να καταφέρει η ανεμογεννήτρια να τροφοδοτήσει το απαιτούμενο ποσό ενέργειας για μια περίοδο T στο σύστημα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνάρτηση:

$$P_w(\text{μέσος όρος}) = \frac{1}{T} * \int_0^T P_w * dt = m_w * \alpha * \gamma * P_L(\text{μέσος όρος}) = \frac{1}{T} * \int_0^T P_L * dt \quad (\text{Εξ. 1.9})$$

Όπου P_w η ισχύς που παράγει ο άνεμος και P_L η ζητούμενη ισχύς.

Άρα με τις δύο αυτές εξισώσεις (1.8 , 1.9), δεδομένου τη ζήτηση της ενέργειας, μπορούν να υπολογιστούν οι διαστάσεις της ανεμογεννήτριας. Οι μετρήσεις του αέρα είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας όσον αφορά τον προσδιορισμό των διαστάσεων του αιολικού πάρκου.

Για την ανάλυση της μεταβλητότητας του αέρα, η συλογή των μετρήσεων έγινε για περίοδο 5 λεπτών από τον οργανισμό WIND (Wind Integration National Dataset) ο οποίος περιέχει τις μετεωρολογικές συνθήκες από 126.000 τοποθεσίες των Ηνωμένων πολιτειών.

Η αντίστοιχη ισχύς που παρέχει η ανεμογεννήτρια με αυτά τα δεδομένα ανέμου και τα παρακάτω χαρακτηριστικά μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 1.8.

- $V_i = 2 \text{ m/s}$
- $V_o = 25 \text{ m/s}$
- $V_r = 14 \text{ m/s}$
- $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

- $C_p = 0.59$

Για περαιτέρω ανάλυση, η σταθερή ενέργεια που παράγει το σύστημα με τα παραπάνω δεδομένα στην διάρκεια ενός έτους υπολογίζεται ως εξής:

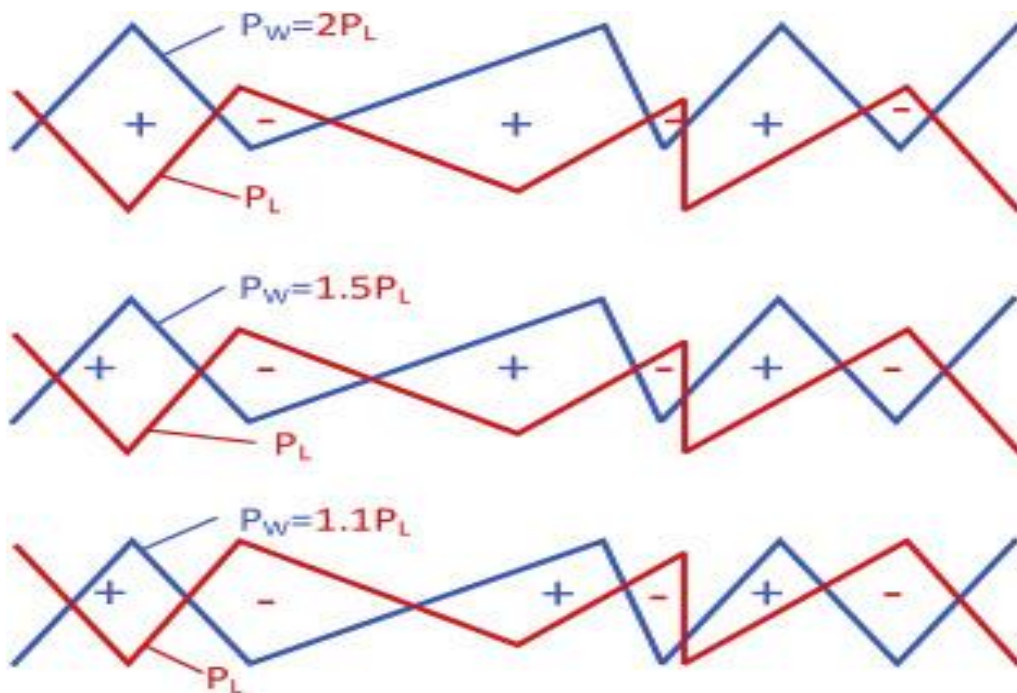
$$PN(n)(i) = Pw(n)(i) * \frac{Ts}{\sum_{i=1}^{105120} Pw(n)(i) * Ts} = \frac{Pw(n)(i)}{\sum_{i=1}^{105120} Pw(n)(i)}$$

(Εξ. 1.10)

Πάρα το γεγονός ότι τα P_w και P_h παρουσιάζονται ως στοχαστικές διαδικασίες έχουν περιοδικά χαρακτηριστικά σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Για παράδειγμα οι υψηλότερες τιμές παραγωγής ενέργειας λόγω υψηλού φορτίου αέρα παρατηρείται σε συγκεκριμένη περίοδο σε όλες της πόλεις.

Το καινούριο μέγεθος που θα λαμβάνεται υπ' όψιν είναι η συχνότητα, άρα λαμβάνοντας υπ' όψιν τα σχεδόν περιοδικά χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας, η ετήσια διακύμανση της αιολικής ενέργειας μπορεί να αναπαρασταθεί ως συνδυασμός ημιτονοειδούς ισχύος και συνιστώσα DC ισχύος του συστήματος

Διαστάσεις ανεμογεννήτριας-Αποτελέσματα:



Διάγραμμα 1.9 Διαφορά της παραγωγής ενεργειακού φορτίου του αιολικού πάρκου σε αντίθεση με ζήτηση της ισχύς.

Το μέγεθος της ανεμογεννήτριας αναφέρεται ουσιαστικά στην ικανότητα παραγωγής της ισχύος. Οπότε, φαίνεται απο το Διάγραμμα 1.9 ότι η αύξηση των διαστάσεων της ανεμογεννήτριας μπορεί να ελαττώσει τις περιοχές με αρνητική τιμή λ , αυτό σημαίνει πως με μεγαλύτερες διαστάσεις θα επιτρέψει την ελαχιστοποίηση της διαφοράς $P_w - P_L$ καθώς και τις διακοπές λειτουργίας..

Σε αυτή τη μελέτη έγινε μία προσπάθεια στην μέτρηση της μεταβλητότητας της ισχύος του ανέμου, ενώ παράλληλα εξετάζονται οι επιπτώσεις της μεταβλητότητας της Α/Γ στην βέλτιστη διαστασιολόγηση του αιολικού πάρκου. Η καινούρια παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι η συχνότητα η οποία περιέχει έναν δείκτη διανομής της ενέργειας και έναν συντελεστή διακύμανσης που εφαρμόζονται για να αξιολογήσουν τα δεδομένα μέτρησης ταχύτητας του αέρα.

Βάση των αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων και των δεδομένων εισαγωγής έχουμε τα παρακάτω:

Πίνακας 1.6 Μέγεθος ανεμογεννήτριας και μέση ταχύτητα αέρα.

Πηγή: A new measure of wind power variability with implications for the optimal sizing of standalone wind power systems

Location Name	Swept Area of Wind Turbine A_w (m ²)	Average Wind Speed v_{avg} (m/s)
San Francisco	3.80	7.91
Los Angeles	21.65	4.72
Denver	6.74	6.75
Houston	8.40	6.51
Chicago	3.87	7.71
New York	4.56	7.31

Πίνακας 1.7 Μέση αξιοπιστία τροφοδοσίας.

Πηγή: A new measure of wind power variability with implications for the optimal sizing of standalone wind power systems

Size factor	$\alpha = 1.0$			$\alpha = 1.5$			$\alpha = 2.0$		
$R_{Wavg}(\%)$	B_{ac} (Hours)								
	10^0	10^1	10^2	10^0	10^1	10^2	10^0	10^1	10^2
San Francisco	56	68	78	64	76	88	69	81	92
Los Angeles	41	51	63	46	60	75	50	67	85
Denver	47	62	76	54	72	90	59	78	94
Houston	60	71	84	69	80	95	74	86	98
Chicago	55	65	78	64	74	90	69	80	96
New York	55	65	78	64	75	91	69	81	97

Έχουμε τα αποτελέσματα σε μορφή πίνακα :

Πίνακας 1.8 Κόστος ενέργειας με διαφορετικό συντελεστή μεγέθους ανεμογεννήτριας (α) και ενεργή χωρητικότητα μπαταρίας.

Battery Capacity		COE (\$/kWh)										
DoD (%)	B _{ac} (hours)	$\alpha = 1.0$	$\alpha = 1.1$	$\alpha = 1.2$	$\alpha = 1.3$	$\alpha = 1.4$	$\alpha = 1.5$	$\alpha = 1.6$	$\alpha = 1.7$	$\alpha = 1.8$	$\alpha = 1.9$	$\alpha = 2.0$
50	≤10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.027
50	11	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.028
100	12	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.028	0.028
100	13	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.029	0.029
100	14	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.029	0.029	0.030
100	15	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.030	0.030	0.030
100	16	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.030	0.030	0.031	0.031
100	17	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.031	0.031	0.031	0.032
100	18	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.031	0.032	0.032	0.033
100	19	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.032	0.033	0.033	0.033
80	20	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	<u>0.026</u>	0.027	0.027	0.027	0.028
80	21	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.027	0.027	0.027	0.028	0.028
80	22	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.027	0.027	0.028	0.028	0.028
80	23	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.027	0.028	0.028	0.028	0.029
80	24	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.027	0.028	0.028	0.028	0.029	0.029
80	25	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.028	0.028	0.028	0.029	0.029	0.030
80	26	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.028	0.029	0.029	0.029	0.030	0.030
80	27	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.029	0.029	0.029	0.030	0.030	0.030
80	28	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.029	0.029	0.030	0.030	0.031	0.031
80	29	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.030	0.030	0.030	0.031	0.031	0.031
80	30	n/a	n/a	n/a	n/a	0.030	0.030	0.030	0.031	0.031	0.031	0.032
≥80	≥31	≥0.105	≥0.048	≥0.036	≥0.030	≥0.030	≥0.031	≥0.031	≥0.031	≥0.031	≥0.032	≥0.032

Πηγή: A new measure of wind power variability with implications for the optimal sizing of standalone wind power systems

Το ελάχιστο λοιπόν κόστος της ενέργειας για $0.026 \$\cdot\text{Kwh}^{-1}$ εμφανίζεται για συγκεκριμένη χωρητικότητα μπαταρίας και $\alpha = 1.6$ βάση του πίνακα 1.8. Άκόμα το εμβαδόν κύκλου της ανεμογεννήτριας πρέπει να είναι $\alpha \cdot A_w = 1.6 \cdot 3.87 = 6.19 \text{ m}^2$, όπου A_w το εμβαδόν του πτερυγίου.

1.4.4 Βέλτιστη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση ανεμογεννήτριας και υπεραγωγίμης αποθήκης μαγνητικής ενέργειας του συστήματος διανομής.

Για την εργασία με αγγλικό τίτλο "*Optimal Placement and Sizing of Wind Turbine Generators and Superconducting Magnetic Energy Storages in a Distribution System*" μελετήθηκαν ο σκοπός της εργασίας, η μεθοδολογία, καθώς και η σχετική περιγραφή του συστήματος με τα αποτελέσματα της έρευνας τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω (Hashem et al., 2021)[12].

Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας

Η ισχύς η οποία παράγεται από την ανεμογεννήτρια P_{wt} σε ταχύτητα αέρα V_w υπολογίζεται με την παρακάτω συνάρτηση (Sfikas et al., 2015)[13]:

0,

εάν $V_w < V_{ci}$ και $V_w > V_{co}$

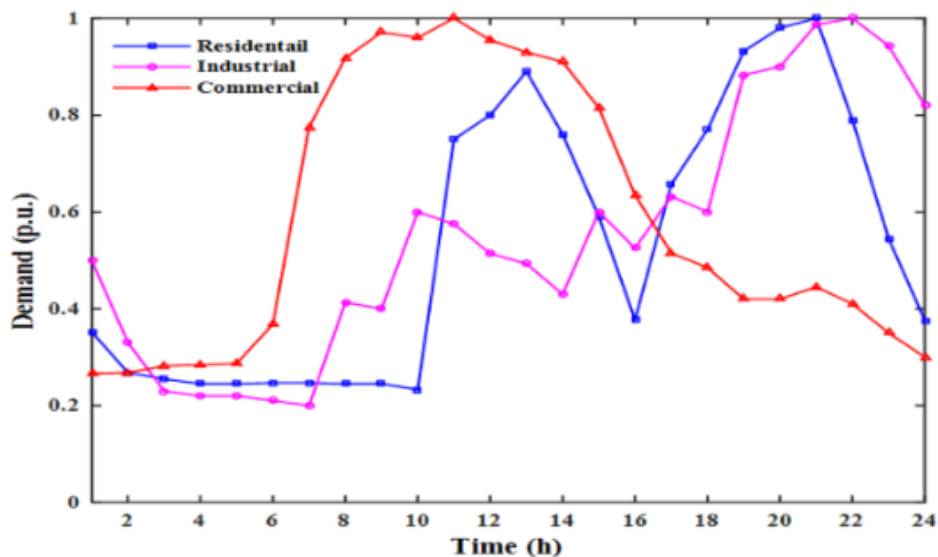
$$P_w = \begin{cases} P_{w,r} * \frac{V_w - V_{ci}}{V_{w,r} - V_{ci}} \end{cases}$$

εάν $V_{ci} \leq V_w \leq V_{w,r}$ (Εξίσωση 1.11)

$P_{w,r}$

εάν $V_{w,r} < V_w \leq V_{co}$

Όπου V_{ci} είναι η cut-in speed και $V_{w,r}$ είναι η cut-out speed, καθώς και $P_{w,r}$ η ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια δεδομένα από. Η παραπάνω εξίσωση διαγραμματικά εμφανίζει την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας η οποία δεν παράγει σταθερό έργο εκτός των ορίων ταχύτητας V_{ci} και $V_{w,r}$.



Διάγραμμα 1.10 Κανονικοποιημένο διάγραμμα ωριαίας ζήτησης φορτίου για τρία διαφορετικά μοντέλα.

Πηγή: *Optimal Placement and Sizing of Wind Turbine Generators and Superconducting Magnetic Energy Storages in a Distribution System*

Επίσης η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα σε συγκεκριμένο ύψος, το οποίο ύψος εκφράζεται (Ahmed et al., 2020)[14]:

$$V_w(h) = V_w(h) * \left(\frac{h}{h_s} \right)^\alpha \quad (\text{Εξ.1.12})$$

Όπου το $V_w(h)$ είναι η ταχύτητα του αέρα υπό την μέτρηση του ανεμόμετρου σε συγκεκριμένο ύψος h_g και το α ο δείκτης σκληρότητας που ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή. Το α εξαρτάται από την υγρασία της περιοχής αλλά οι περισσότεροι ερευνητές προτείνουν την τιμή $\alpha=1/7$.

Ένας δείκτης αποτελεσματικότητας είναι ο WTG penetration (%) ο οποίος ισούται με τη συνολική ενέργεια του συστήματος προς την ενεργειακή ζήτηση του συστήματος (Hung et al., 2013)[15]:

$$WTG \text{ penetration } (\%) = \frac{\sum_{t=1}^{24} P_{wr}(t)}{\sum_{t=1}^{24} P_L(t)} \quad (\text{Εξ.1.13})$$

Αφού έχει γίνει η μοντελοποίηση και τα στοιχεία του αέρα, της ζήτησης της ενέργειας καθώς και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του συστήματος έχουν υπολογιστεί, τα αποτελέσματα για τη διαστασιολόγηση βρίσκονται παρακάτω στον πίνακα 1.10 :

Πίνακας 1.9 Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

Πηγή: *Optimal Placement and Sizing of Wind Turbine Generators and Superconducting Magnetic Energy Storages in a Distribution System*

Parameters	Value
Cut-in speed (m/s)	4
Rated speed (m/s)	14
Cut-out speed (m/s)	24
Rated output power (MW)	1.1

Πίνακας 1.10 Βέλτιστες τοποθεσίες και διαστασιολόγηση

Πηγή: *Optimal Placement and Sizing of Wind Turbine Generators and Superconducting Magnetic Energy Storages in a Distribution System*

Items	Residential	Industrial	Commercial	Mixed
1 st WTG (KW /@ Bus)	2132 / @ 28	1528 / @ 10	2200 / @ 28	1117 / @ 13
1 st SMES (KW/ KWh)	1100/4738	809/5000	1095/4737	937/1875
2 nd WTG (KW/@ Bus)	1699 / @ 9	2200 / @ 28	1633 / @ 10	2200 / @ 28
2 nd SMES (KW/ KWh)	1100/4356	793/4993	768/4726	930/4923

Ο Πίνακας 1.10 δείχνει τα αποτελέσματα για τις βέλτιστες τοποθεσίες και μεγέθη ανεμογεννητριών στο παρόν σύστημα διανομής ενέργειας για διαφορετικά μοντέλα φορτίου. Είναι προφανές πως τα αποτελέσματα για διαφορετικά μοντέλα και φορτία είναι διαφορετικά ,αλλα προσαρμοσμένα στις συνθήκες του κάθε προβλήματος, αναλόγως την ωριαία ζήτηση.

1.4.5 Μεθοδολογία για βέλτιστη διαστασιολόγηση αυτόνομου υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών και ανεμογεννήτριας.

Για την εργασία με αγγλικό τίτλο " A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system " μελετήθηκαν ο σκοπός της εργασίας, η μεθοδολογία, καθώς και η σχετική περιγραφή του συστήματος με τα αποτελέσματα της έρευνας τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω (Diaf et al., 2007)[16].

Σκοπός της παρακάτω εργασίας είναι η εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για την πλήρωση της ζήτησης απαιτείται ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας το οποίο θα υπολογιστεί από το μοντέλο βελτιστοποίησης βάση της αντικειμενικής συνάρτησης και κάποιους περιορισμούς. Το ενεργειακό ποσό αυτό θα πρέπει να υποστηρίζει ένα νοικοκυριό στην τοποθετημένο στην Κορσική Νήσος χρησιμοποιώντας μελέτες από (Kellogg et al., 1996)[17] και (Chedid and Saliba, 1996) [18].

Μοντελοποίηση

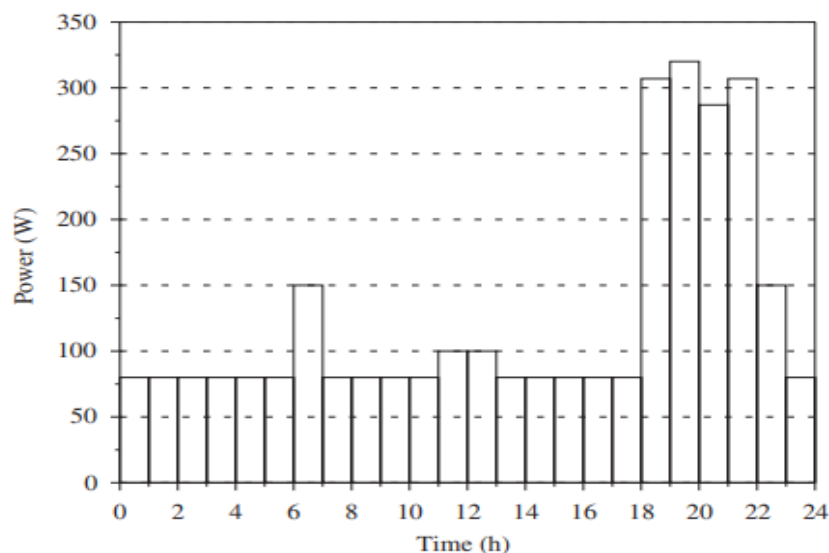
Η ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια εκτιμάται από τους κατασκευαστές. Όμως επειδή οι καμπύλες ισχύος της ανεμογεννήτριας είναι ομαλές μπορούν να προσεγγιστούν χρησιμοποιώντας την παρεμβολή κυβικού spline. Η αντικειμενική συνάρτηση για τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται παρακάτω (Akai 1994)[19]:

$$P_{WG}(V) = \begin{cases} 0 & V \leq V_{ci} \text{ or } V \geq V_{co} \\ a_1 V^3 + b_1 V^2 + c_1 V + d_1 & V_{ci} < V < V_1 \\ a_2 V^3 + b_2 V^2 + c_2 V + d_2 & V_1 < V < V_2 \\ \dots & \\ a_n V^3 + b_n V^2 + c_n V + d_n & V_{n-1} < V < V_r \\ P_r & V_r \leq V < V_{co} \end{cases},$$

(Εξίσωση 1.14)

Όπου $P_{WG}(V)$ είναι η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας για ταχύτητα ανέμου V , V η ταχύτητα του αέρα, P_r η ισχύς που εκτιμάται από τους κατασκευαστές, V_{ci} η ταχύτητα αέρα στο ύψος της ανεμογεννήτριας και τέλος V_r και V_{co} η cut-in ταχύτητα και cut-out ταχύτητα αντίστοιχα. N είναι ο αριθμός της κυβικής spline και a , b , c , d είναι οι πολυωνυμικοί συντελεστές της παρεμβολής κυβικού spline, οι οποίες εξαρτώνται από τον τύπο ανεμογεννήτριας

Αποτελέσματα:



Διάγραμμα 1.11 Ωριαίο ενεργειακό προφίλ.

Πηγή: A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system

Οι παράμετροι της ανεμογεννήτριας είναι οι εξής:

Πίνακας 1.11 *Παράμετροι ανεμογεννήτριας*

Πηγή: A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system

Type	Power rated (W)	V_{cl} (m/s)	V_r (m/s)	V_{co} (m/s)	Price \$	BOS \$
WT 600	600	2.5	12	25	1500	25% of cost
BWCXL1000	1000	2.5	11	25	2500	25% of cost

Και ο βέλτιστος συνδυασμός για το υβριδικό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας :

Πίνακας 1.12 *Βέλτιστα αποτελέσματα διαστασιολόγησης (PV 125W/Battery 253Ah)*

Πηγή: A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system

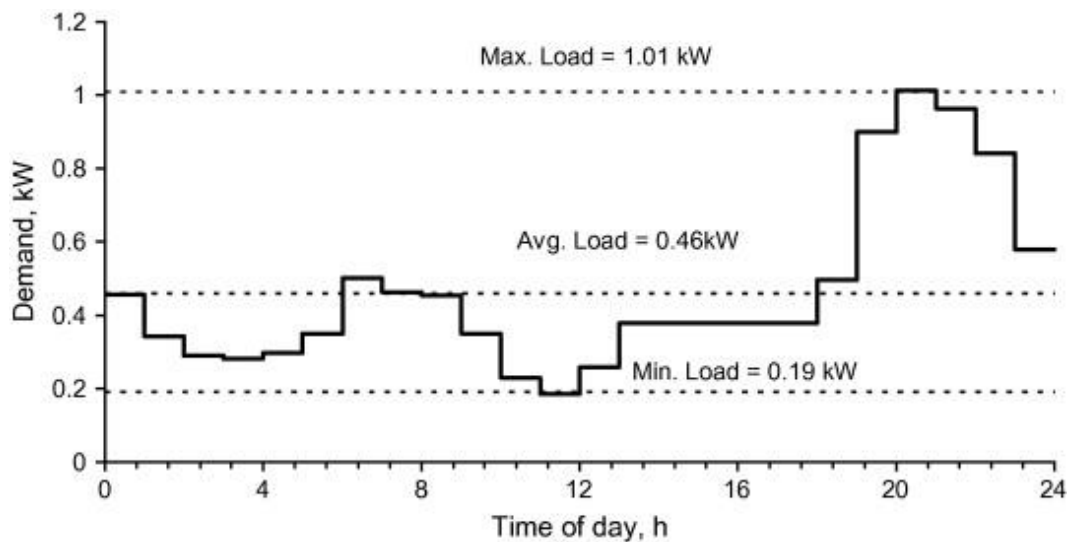
No. of wind turbine (W)	600 × 1	600 × 2	600 × 3	1000 × 1	1000 × 2
PV generator power (W)	1375	1125	875	1500	1250
Battery capacity (Ah)	506	759	759	759	759
LCE (kWh cost) (\$/kWh)	1.46	1.51	1.59	1.70	1.95

Άρα όπως φαίνεται από την πρώτη γραμμή του πίνακα 1.11 φαίνονται οι συνδυασμοί που μπορούν να προκύψουν από τις ανεμογεννήτριες με τα χαρακτηριστικά του 1.10. Ο καλύτερος συνδυασμός βάση οικονομικών αλλά και διαστασιολογικών παραμέτρων είναι ανεμογεννήτρια 600 W, φωτοβολταϊκά 125W με μπαταρία 253Ah.

1.4.6 Βέλτιστη διαστασιολόγηση συστήματος ανεμογεννήτριας-μπαταρίας ενσωματώνοντας την αβεβαιότητα των πόρων.

Για την εργασία με αγγλικό τίτλο " Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty" μελετήθηκαν ο σκοπός της εργασίας , η μεθοδολογία, καθώς και η σχετική περιγραφή του συστήματος με τα αποτελέσματα της έρευνας τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω(Roy et al., 2010) [20].

Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση της ανεμογεννήτριας και της μπαταρίας που αποθηκεύει την ενέργεια που παράγεται. Μοτελοποιώντας το πρόβλημα και μελετώντας τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης θα βρεθεί το κατάλληλο μέγεθος ανεμογεννήτριας για τις παρακάτω τις ενεργειακές απαιτήσεις .



Διάγραμμα 1.12 Ημερήσιες ενεργειακές απαιτήσεις ενός χωριού στην Ινδία [21].

Πηγή: Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty

Μοντελοποίηση:

Η παραγόμενη ισχύς του συστήματος εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση (Powell, 1981)[22] :

$$P_w = P_r * (V^{k_w} - V_c^{k_w}) / (V_r^{k_w} - V_c^{k_w})$$

$$\text{για } V_c \leq V \leq V_r$$

$$P_w = P_r$$

$$\text{για } V_r \leq V \leq V_f$$

$$P_w = 0$$

αλλιώς.

(Εξίσωση 1.16)

Η μέση ταχύτητα ανέμου για 10 μέτρα πάνω από το έδαφος είναι 3,7 m/s, το k_w είναι η παράμετρος Weibull το οποίο είναι 2.17 και η C_w η παράμετρος διάστασης 4.13 m/s. Η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι P_r για ταχύτητα V , καθώς το C_p είναι ο συντελεστής ισχύος των πτερυγίων, τέλος το η_o η απόδοση του κιβωτίου και της ηλεκτρικής μηχανής. Ο συντελεστής ισχύος σε σχέση με τον λόγο ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου ως προς την ταχύτητα ανέμου (λ) του πτερυγίου υπολογίζεται για να βρεθεί η απόδοση του ρότορα η οποία μπορεί να υπολογιστεί από την θεωρία BEM (Blade Element Momentum Theory)[23]. Γνωρίζοντας τις γεωμετρικές παραμέτρους όπως η διάμετρος των πτερυγίων η γωνία περιστροφής των πτερυγίων (β), τα χαρακτηριστικά C_p - λ μπορούν να βρεθούν. Όταν το C_p μεγιστοποιείται για $\lambda = \lambda_{opt}$, $\beta = \beta_{opt}$ η μέγιστη ισχύς $P_{rot}(V)$ για κάθε V μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P_{rot} = P_{rot,r}$$

$$\text{για } V_r \leq V \leq V_f$$

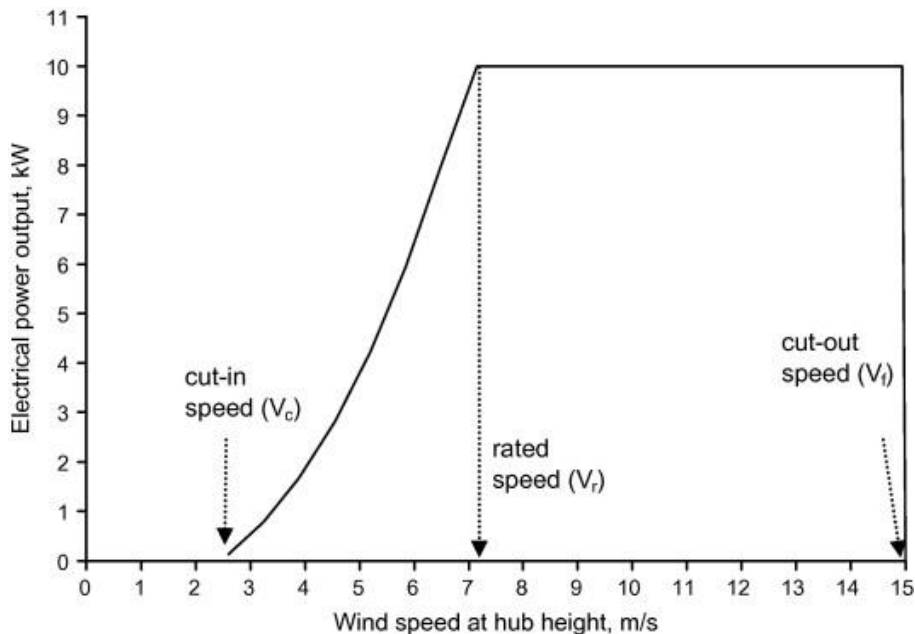
$$P_{rot} = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 * C_{p,max}$$

$$\text{για } V_c \leq V \leq V_r \quad (\text{Εξίσωση 1.17})$$

$$P_{rot} = 0$$

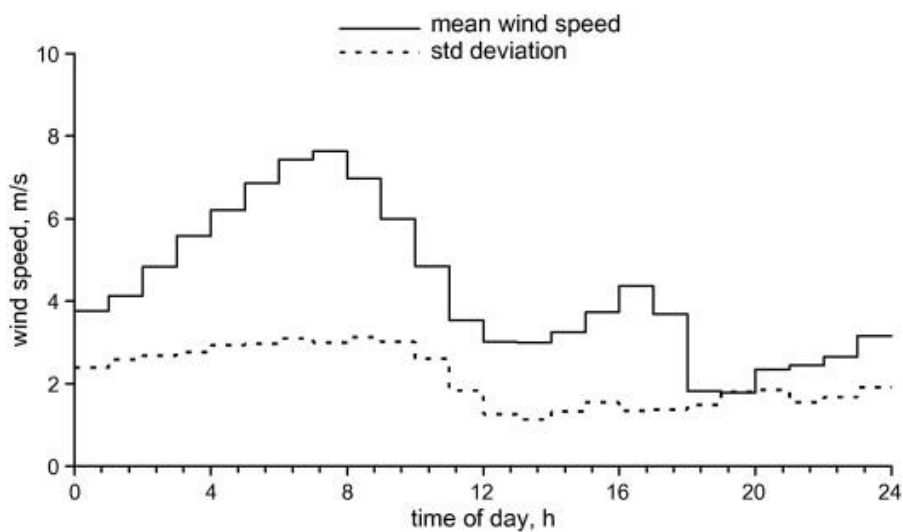
αλλιώς

Όπου $P_{rot,t}$ είναι η ισχύς για άνεμο ταχύτητας V_t στον οποίο μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 1.13 Καμπύλη ισχύος για ανεμογεννήτρια διαμέτρου 10 μετρα και μέγεθος 10 Kw και ύψος 30 μέτρων.

Πηγή: Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty



Διάγραμμα 1.14 Ημερίσια ταχύτητα ανέμου σε ύψος 20 μέτρων.

Πηγή: Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty

Αποτελέσματα

Δεδομένου της διαμέτρου D και της ισχύς P_r της ανεμογεννήτριας το αντίστοιχο ελάχιστο μέγεθος της μπαταρίας μπορεί να καθοριστεί απο την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος. Σκοπός είναι η παραγωγή ισχύος να μην έχει μεγάλη απόκλιση από την ενεργειακή ζήτηση έτσι ώστε να μην χρειάζεται η αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρία. Οπότε, η βέλτιστη διαστασιολόγηση για την ανεμογεννήτρια καθώς και το μέγεθος της μπαταρίας παρουσιάζεται παρακάτω στον πίνακα 1.13.

Πίνακας 1.13 Βέλτιστη διαστασιολόγηση για διαφορετικά επίπεδα εμπιστοσύνης.

Πηγή: Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty

Design confidence level (χ)	Rated power (P_r), kW	Rotor diameter (D), m	Battery size (B_r), kWh	COE (US\$/kWh)
0.6	1.23	7.50	8.45	0.28
0.7	1.43	9.00	9.32	0.35
0.8	1.5	12.4	9.34	0.53
0.9	3	17.7	12.1	1.08
0.94	3	24.5	11.57	2.12

Η στήλη Rated power δείχνει την προτεινόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας, αμέσως δεξιά την προτεινόμενη διάμετρο και στην τελευταία στήλη εμφανίζονται τα κόστη ανά kWh. Φαίνεται πώς το ελάχιστο κόστος ενέργειας για την ανεμογεννήτρια θα είναι 0.28 \$/kWh το οποίο συμπίπτει με 1.23 kW ανεμογεννήτρια και 8.45 kWh χωρητικότητα μπαταρίας.

1.5 Σκοπός της διπλωματικής

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η έρευνα για την βέλτιστη διαστασιολόγηση και προσομοίωση λειτουργίας μίας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου, ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες που θα κληθούμε να αντιμετωπίσουμε. Συνολικά τα βήματα για την επίτευξη του σκοπού της παρούσας διπλωματικής είναι:

- *Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου με το οποίο θα γίνει η προσομοίωση της ανεμογεννήτριας και της αποδιδόμενης ισχύος (σύγκριση με διαθέσιμα δεδομένα).*
- *Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την επίλυση του προβλήματος διαστασιολόγησης και βελτιστοποίησης λειτουργίας.*
- *Συλλογή δεδομένων από διάφορες ανεμογεννήτριες με σκοπό την βέλτιστη επιλογή για το κάθε σενάριο ενεργειακής ζήτησης.*
- *Συλλογή στοιχείων για διαφορετικά σενάρια διαστασιολόγησης βάση της ενεργειακής ζήτησης που χρειάζεται για να λειτουργήσει μία οικία, ένα νοσοκομείο, ένα εστιατόριο κτλ. άλλα.*
- *Προκαταρκτική –οικονομική ανάλυση μελέτη για κάθε σενάριο που πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση.*

Κεφάλαιο 2°

2.1 Μαθηματικό μοντέλο ανεμογεννήτριας

Η βασική λειτουργία της ανεμογεννήτριας έγκειται στην αξιοποίηση και μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου πρωτίστως σε μηχανική ενέργεια και έπειτα σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα, ο αέρας περιστρέφει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε έναν περιστρεφόμενο άξονα που καταλήγει σε κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής, παράγεται ολοένα και αυξανόμενη ηλεκτρική ενέργεια από μία γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη με τα μηχανικά μέρη του κιβωτίου μετάδοσης της κίνησης. Δύο είναι οι διαθέσιμοι τύποι και αφορούν ανεμογεννήτριες με οριζόντιο και κάθετο άξονα περιστροφής (ως προς την φορά του ανέμου) με την πρώτη κατηγορία να είναι η περισσότερο διαδεδομένη. Τα κύρια χαρακτηριστικά που χρήζουν προσοχής κατά την λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας, αναφέρονται στο υψόμετρο εγκατάστασης της και φυσικά στο αιολικό δυναμικό της περιοχής.

Βάσει λοιπόν της φυσικής περιγραφής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης θα αναφέρεται στην συσχέτιση της ταχύτητας ανέμου με την αποδιδόμενη μηχανική και μετέπειτα ηλεκτρική ισχύ. Η αποδιδόμενη μηχανική ισχύς εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, την πυκνότητα του αέρα (σχετίζεται με το ύψος εγκατάστασης) καθώς και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Σε αντίθεση με την περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, το μαθηματικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει μικρό αριθμό εξισώσεων με κυριότερη την (2.1) σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης [24]:

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot A_w}{2} v_{wind}^3 \quad (2.1)$$

$$P_{el} = P_m \cdot n_w \quad (2.2)$$

όπου P_m δηλώνεται η μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας σε W, c_p ο συντελεστής απόδοσης της ανεμογεννήτριας που περιλαμβάνει τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά, ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3 , A_w η επιφάνεια σάρωσης της ανεμογεννήτριας σε m^2 , v_{wind} η ταχύτητα του ανέμου σε m/s , λ ο λόγος ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου ως προς την ταχύτητα ανέμου, β η γωνία κλίσης της ανεμογεννήτριας σε deg° , P_{el} η ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας σε W και n_w η απόδοση της ανεμογεννήτριας. Στην απόδοση, n_w εμπεριέχονται όλες οι ηλεκτρικές απώλειες κατά την παραγωγή ρεύματος και συνήθως αντιστοιχεί σε μία τιμή κοντά στο 85-90%.

Ο συντελεστής c_p βασίζεται σε μία σειρά γεωμετρικών παραμέτρων και εξαρτάται τόσο από την κλίση β όσο και από τον λόγο λ της ανεμογεννήτριας [24]:

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \cdot \beta - c_4 \right) \cdot e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \cdot \lambda \quad (2.3)$$

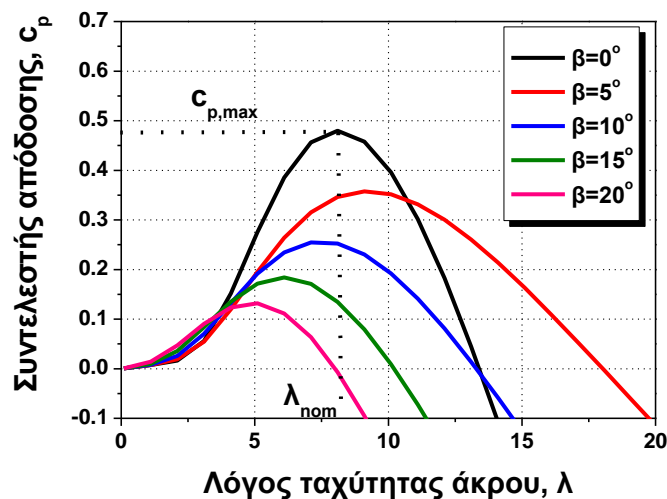
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.4)$$

Οι σταθερές c_i παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1 [7].

Πίνακας 2.1 Σταθερές c_i που περιλαμβάνονται στην σχέση (2.3)

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
0.517 6	116	0.4	5	21	0.0068

Η συσχέτιση μεταξύ β , λ και c_p παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1 όπου και παρατηρείται πως η ανεμογεννήτρια πρέπει να λειτουργεί στο μέγιστο σημείο του συντελεστή c_p επιλέγοντας κατάλληλα την κλίση των πτερυγίων για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης.

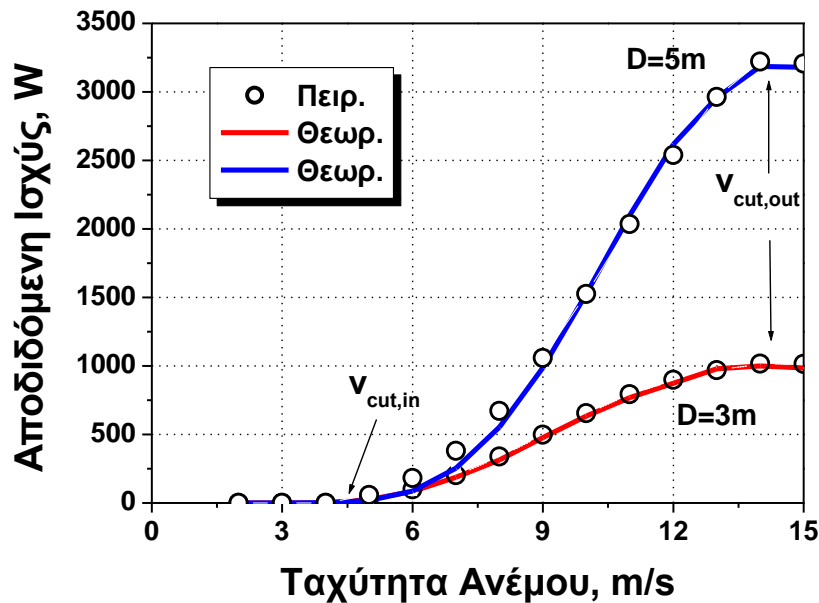


Διάγραμμα 2.1 Επίδραση των μεταβλητών β , λ στον συντελεστή απόδοσης της ανεμογεννήτριας C_p .

Συνήθως, οι κατασκευαστικές εταιρίες περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά μέρη εύρεσης βελτίστου σημείου λειτουργίας της κάθε ανεμογεννήτριας για την εκάστοτε εγκατάσταση. Με στόχο όμως την απλοποίηση των υπολογισμών, εισάγεται στο παραπάνω μοντέλο μία εντολή εύρεσης της μέγιστης τιμής του συντελεστή c_p για τα εκάστοτε δεδομένα της ταχύτητας ανέμου. Η απλοποίηση αυτή, καταλήγει με μεγάλη ακρίβεια στην τιμή που θα έδιναν οι εξειδικευμένοι και ιδιαίτερα πολύπλοκοι αλγόριθμοι ανίχνευσης μεγίστου [25].

Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει την βασική καμπύλη λειτουργίας δύο τύπων ανεμογεννητριών με διαφορετική διάμετρο για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Όπως παρατηρείται, διακρίνονται δύο σημεία ακραίας λειτουργίας που αντιστοιχούν στην ταχύτητα περικοπής ανέμου (*cut-in speed*), που προκαλεί την έναρξη παραγωγή ισχύος και στην ταχύτητα αποκοπής ανέμου (*cut-out speed*), πέρα από την οποία δεν δύναται αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος και

διατηρείται μία σταθερή παραγωγή. Όσον αφορά την σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών, διακρίνεται μία ιδιαίτερα υψηλή συμφωνία όπου η αυξημένη διάμετρος του ρότορα της ανεμογεννήτριας προκαλεί και μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος λόγω φυσικά της αυξημένης επιφάνειας σάρωσης. Τα μοναδικά δεδομένα που απαιτούνται για την πλήρη περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης είναι η διάμετρος των πτερυγίων, η κλίση τους κατά την εγκατάσταση, η ονομαστική χωρητικότητα και τα όρια ταχύτητας ανέμου.



Διάγραμμα 2.2 Σύγκριση μεταξύ θεωρητικού μοντέλου και πειραματικών αποτελεσμάτων για δύο τύπους ανεμογεννητριών.

Για την επίτευξη σταθερής απόδοσης ισχύος στο σημείο της ταχύτητας αποκοπής ανέμου, απαιτείται κατάλληλο σύστημα ελέγχου που θα προκαλεί την μείωση των στροφών του ρότορα της ανεμογεννήτριας έτσι ώστε να μην καταπονείται με ανεπιθύμητη λειτουργία [26].. Καθότι όμως, τα μηχανολογικά μέρη και η περιγραφή τους είναι πέραν των σκοπών και του αντικείμενου της παρούσης διατριβής, το σύστημα ελέγχου υλοποιείται ουσιαστικά με την επιβολή ενός διακόπτη που ενεργοποιείται στο σημείο ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας ανέμου ως εξής:

$$\left. \begin{aligned}
 P_m &= 0, & v_{wind} &< v_{cut,in} \\
 P_m &= c_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot A_w}{2} v_{wind}^3, & v_{cut,in} &\leq v_{wind} \leq v_{cut,out} \\
 P_m &= P_{max}, & v_{wind} &> v_{cut,out}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

όπου P_{max} δηλώνεται η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας σε W.

2.2 Σύγκριση θεωρητικών πειραματικών και Θεωρητικών τιμών για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών.

Στο παρακάτω τμήμα θα ακολουθήσει η σύγκριση της ισχύος από διάφορους τύπους ανεμογεννητριών με τα αποτελέσματα που αποδίδει το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο. Τα τεχνικά στοιχεία που απαιτούνται για την υλοποίηση του μοντέλου είναι η διάμετρος της ανεμογεννήτριας, η πυκνότητα του αέρα, η ταχύτητα περικοπής και αποκοπής ανέμου και τέλος η γωνία κλίσης.

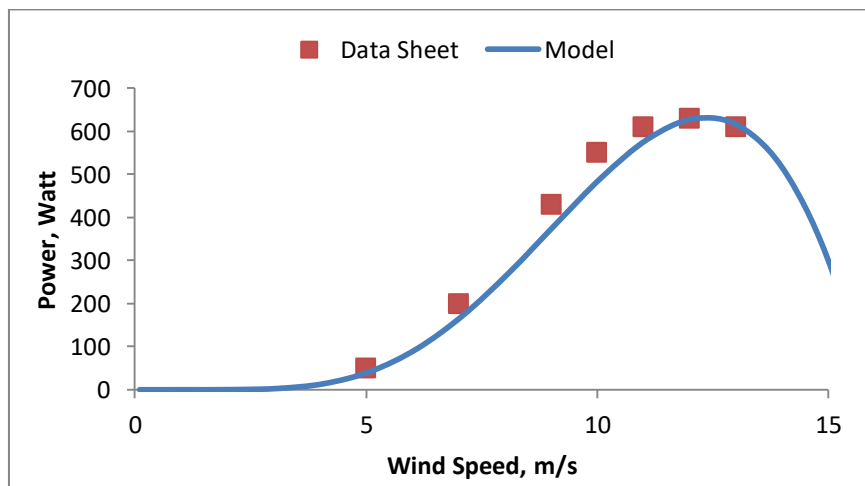
Παρακάτω εμφανίζεται ο πίνακας με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα εισαγωγής στον κώδικα.

Πίνακας 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά τών ανεμογεννητριών

	600W W/G 12V/24V/48V	800W ATO- WT	1000W GREATWATT W/G	1500W 24V- W/G	EN-2000W-L
Blade pitch ang.	7°	8°	6°	3°	7°
Air density	1.225 kg/m ³	1.225 kg/m ³	1.225 kg/m ³	1.225 kg/m ³	1.225 kg/m ³
Diameter	1.85 m	2.2 m	2.18 m	2.9 m	3.7 m
Cut in speed	2.5 m/s	2.5 m/s	3 m/s	3 m/s	2.5 m/s
Cut out speed	14 m/s	14 m/s	14 m/s	25 m/s	14 m/s

Ανεμογεννήτρια 600W Wind Turbine, 12V/24V/48V

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια είναι ονομαστικής ισχύος 600W με μέγιστη δύναμη 630W για ταχύτητα ανέμου *Rated wind speed* όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1. Εισάγοντας τα στοιχεία αυτά στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της matlab με βάση το προαναφερθέν μαθηματικό μοντέλο, εμφανίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.

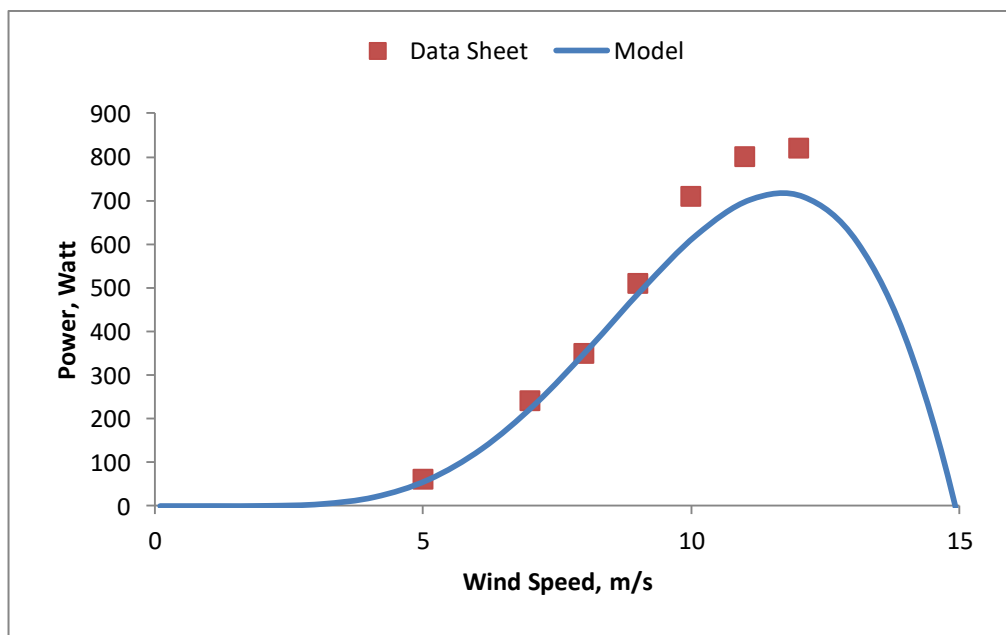


Διάγραμμα 2.3 Παρουσίαση Ισχύος(W) – Ταχύτητας ανέμου(m/s) ανεμογεννήτριας 600W Wind Turbine, 12V/24V/48V

Στο διάγραμμα 2.3 φαίνεται πώς οι προδιαγραφές και τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου συμπίπτουν με ελάχιστη απόκλιση. Αυτό μας δείχνει πόσο αξιόπιστο είναι το μαθηματικό μοντέλο σε χαμηλά δυναμικά ανεμογεννητριών.

Ανεμογεννήτρια 800w - ATO-WT-800M5

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια είναι ονομαστικής ισχύος 800W με μέγιστη δύναμη 820W όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1. Εισάγοντας τα στοιχεία αυτά στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της matlab έχω τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος

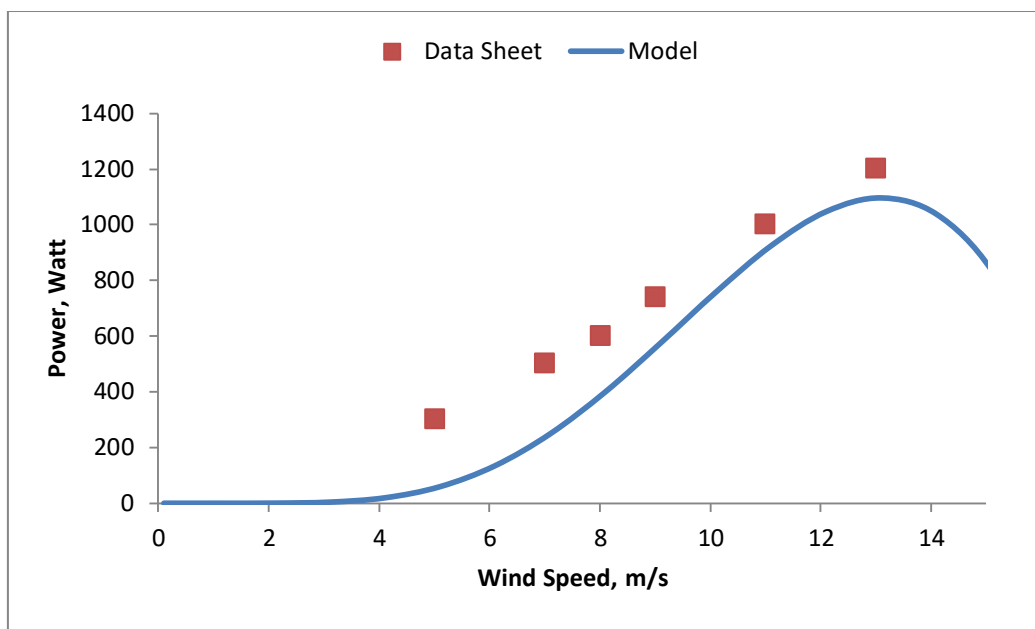


Διάγραμμα 2.4 Παρουσίαση Ισχύος(W) – Ταχύτητας ανέμου(m/s) ανεμογεννήτριας ATO-WT-800M5

Απο το αποτέλεσμα που εμφανίζεται στο Διάγραμμα 2.4 φαίνεται πως η ανεμογεννήτρια δεν φτάνει τα 800W και εμφανίζεται μια μικρή απόκλιση της τάξης του 10%.

Ανεμογεννήτρια 1000w τύπου-Ανεμογεννήτρια Greatwatt S1000 1200W / 48 V

Όπως φαίνεται η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει μέχρι και 1200W ισχύος σε βέλτιστες συνθήκες με βάση τις εργοστασιακές του προδιαγραφές. Χρησιμοποιώντας λοιπόν το προαναφερόμενο μαθηματικό μοντέλο σε περιβάλλον matlab λαμβάνουμε τα παρακάτω διαγράμματα :

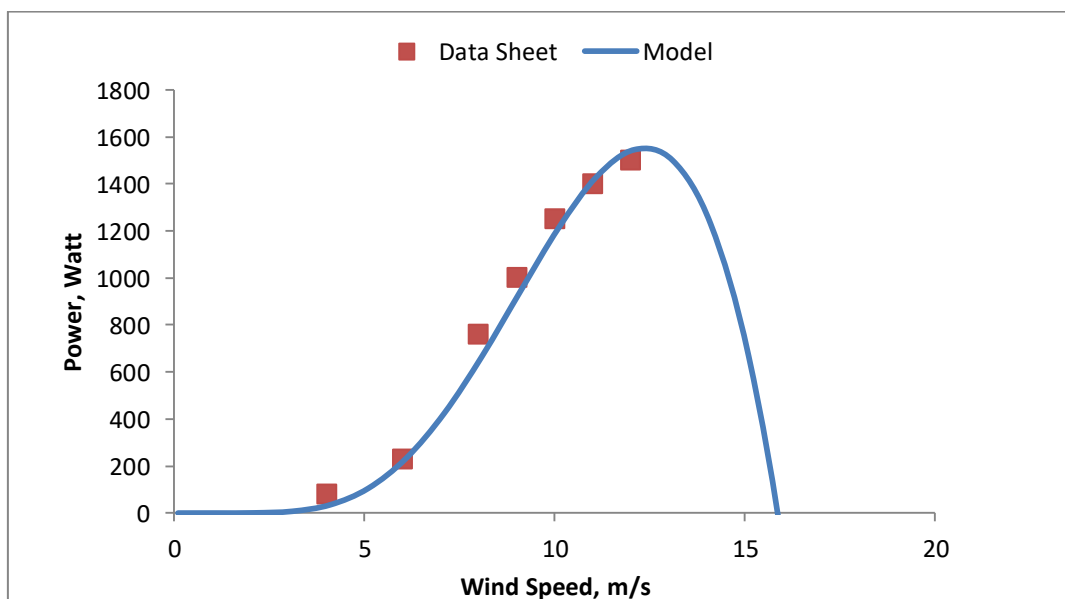


Διάγραμμα 2.5 Παρουσίαση Ισχύος(W) – Ταχύτητας ανέμου(m/s) ανεμογεννήτριας Greatwatt S1000 1200W / 48 V

Στο διάγραμμα 2.5 με μπλέ χρώμα εμφανίζεται η καμπύλη ισχύος του μοντέλου ενώ με πορτοκαλί εμφανίζονται οι προδιαγραφές που έχει θέσει ο κατασκευαστής. Παρατηρείται ότι υπάρχει μία μικρή απόκλιση.

Raum Energy 1.5kW Wind Turbine

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια είναι ονομαστικής ισχύος 1500W για Rated wind speed όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1. Εισάγοντας τα στοιχεία αυτά στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της matlab έχω τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.

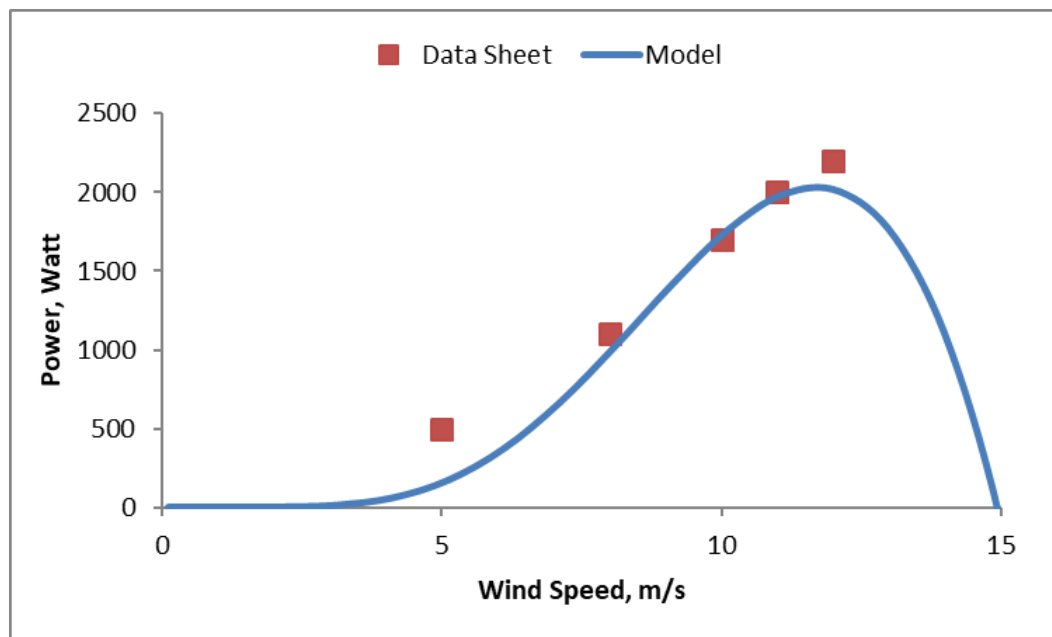


Διάγραμμα 2.6 Παρουσίαση Ισχύος(W) – Ταχύτητας ανέμου(m/s) ανεμογεννήτριας Raum Energy 1.5kW Wind Turbine

Στο παραπάνω διάγραμμα 2.6 φαίνεται πως για τα δεδομένα εισαγωγής που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1 παρατηρείται μία μικρή απόκλιση .

EN-2000W-L Horizontal Axis Wind Turbine 2000W

Οι τεχνικές προδιαγραφές της ανεμογεννήτριας που μελετήθηκε βρίσκονται στον πίνακα στήλη του πίνακα με τίτλο EN-2000W-L η οποία μπορεί να αποδώσει μέχρι και 2200W ισχύ , βάση του κατασκευαστή. Παρακάτω εφαρμόζεται το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος σε περιβάλλον matlab.



Διάγραμμα 2.7 Παρουσίαση Ισχύος(W) – Ταχύτητας ανέμου(m/s) ανεμογεννήτριας EN-2000W-L.

Φαίνεται πως στο διάγραμμα 2.7 η ανεμογεννήτρια φτάνει τα 2000W αλλά όχι τα 2200W το οποίο προσεγγίζει τις προσδοκίες του κατασκευαστή με πολύ μικρή απόκλιση.

2.3 Συμπεράσματα ακρίβειας μαθηματικού μονέλου

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2.1 έχει μεγάλη ακρίβεια στον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος κάθε είδους ανεμογεννήτριας. Όσο μεγαλύτερη όμως η ανεμογεννήτρια τόσο μεγαλύτερο το σφάλμα, το οποίο δεν υπερβαίνει το 10% για τις ανεμογεννήτριες κάτω των 1000W. Αναλυτικότερα τα σφάλματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.3 Απόκλιση προσέγγισης

	600W W/G 12V/24V/48V	800W ATO- WT	1000W GREATWATT W/G	1500W 24V- W/G	EN-2000W-L
Μέσος όρος σφάλματος σε W	23.7	46.9	172.5	84.68206	134.6
Ποσοστιαίο σφάλμα σε %	7.7%	6.7%	33.7%	3,02%	17.27%

Ο μέσος όρος σφάλματος αναφέρεται στον μέσο όρο απόκλισης της θεωρητικής τιμής απο την τιμή που βρέθηκε απο το μαθηματικό μοντέλο , ενώ ποσοστιαίο είναι το ποσοστό απόκλισης πραγματικής με θεωρητικής τιμής.

2.4 Σύγκριση θεωρητικών πειραματικών και Θεωρητικών τιμών για μεγαλύτερους τύπους ανεμογεννητριών

Στο παρακάτω τμήμα θα ακολουθήσει η σύγκριση της ισχύος από μεγαλύτερους τύπους ανεμογεννητριών απο το προηγούμενο κεφάλαιο ,με τα αποτελέσματα που αποδίδει το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο. Τα τεχνικά στοιχεία που απαιτούνται για την υλοποίηση του μοντέλου είναι η διάμετρος της ανεμογεννήτριας, η πυκνότητα του αέρα, η ταχύτητα περικοπής και αποκοπής ανέμου και τέλος η γωνία κλίσης.

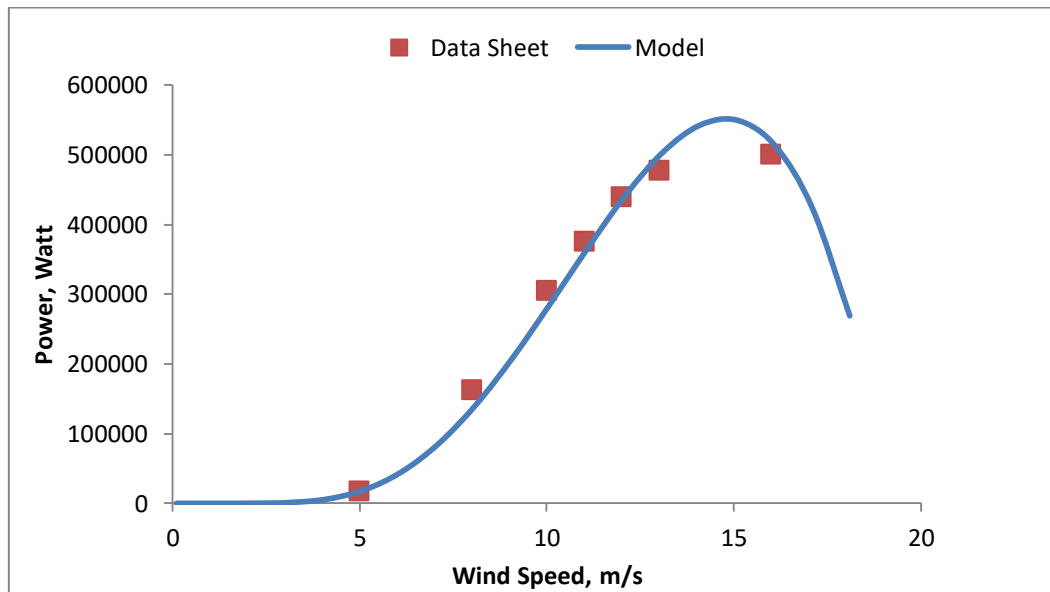
Παρακάτω εμφανίζεται ο πίνακας με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα εισαγωγής στον κώδικα.

Πίνακας 2.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

W/G	VESTAS V-39 500kW	Nordic Windpower's N1000 1MW	SIEMENS SWT-2.3-101 2.3MW
Blade pitch ang.	4°	5°	6°
Air density	1.225 Kg/m ³	1.225 Kg/m ³	1.225 Kg/m ³
Diameter	39m	59m	101m
Cut in speed	4 m/s	4 m/s	3.5 m/s
Cut out speed	25 m/s	22 m/s	25 m/s

VESTAS V-39 500kW

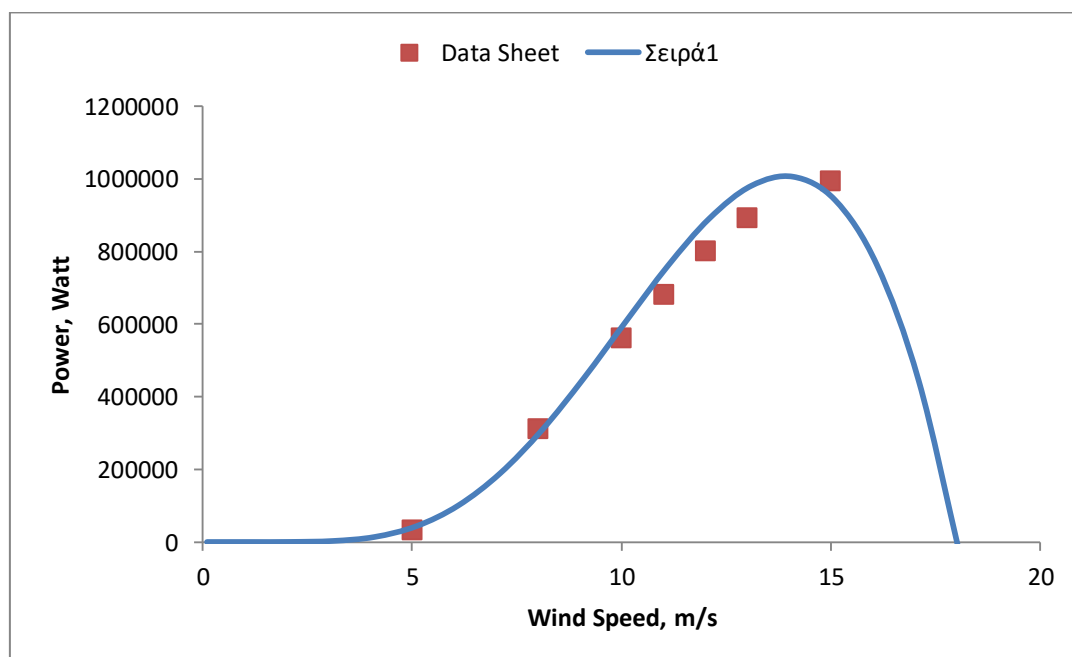
Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια είναι ονομαστικής ισχύος 500kW ή 0.5 MW για Rated wind speed όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1. Εισάγοντας τα στοιχεία αυτά στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της matlab έχω τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.



Διάγραμμα 3.1 Καμπύλη ισχύος για ανεμογεννήτρια 500kW

Nordic Windpower's N1000 1MW

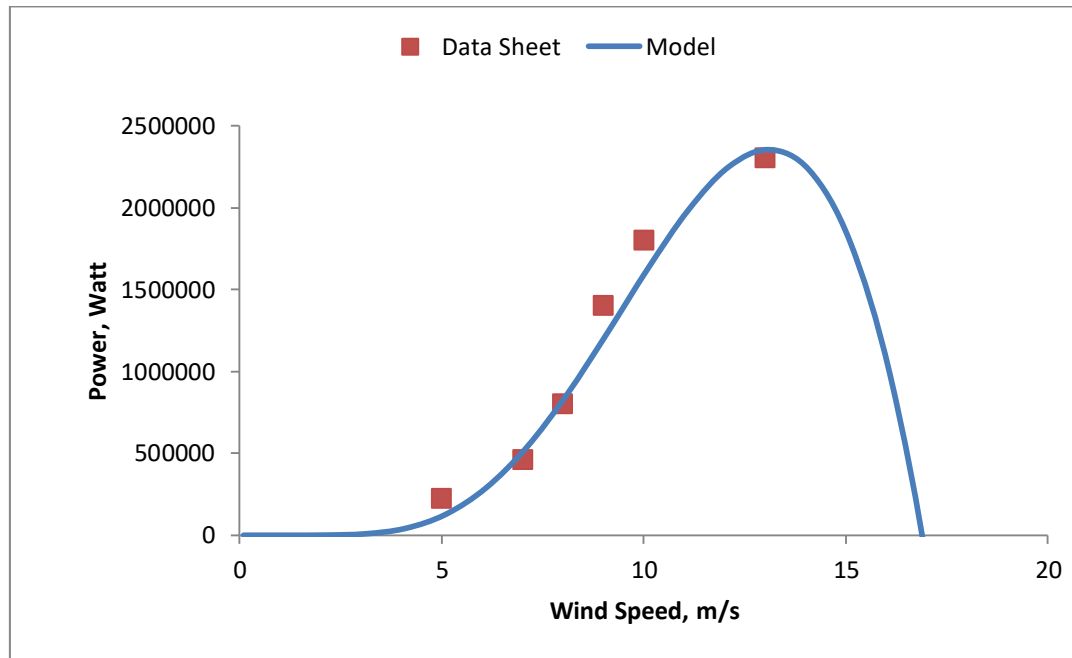
Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια είναι ονομαστικής ισχύος 1000Kw ή 1 MW για Rated wind speed όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1. Εισάγοντας τα στοιχεία αυτά στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της matlab έχω τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.



Διάγραμμα 3.2 Καμπύλη ισχύος για ανεμογεννήτρια 1000kW

SIEMENS SWT-2.3-101

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια είναι ονομαστικής ισχύος 2300kW ή 2.3 MW για Rated wind speed όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1. Εισάγοντας τα στοιχεία αυτά στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της matlab έχω τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.



Διάγραμμα 3.3 Καμπύλη ισχύος για ανεμογεννήτρια 2300kW

2.5 Συμπεράσματα

Παρακάτω στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα σφάλματα απόκλισης θεωρητικής τιμής καθώς και τα ποσοστιαία σφάλματα απόκλισης:

Πίνακας 2.5 Απόκλιση προσέγγισης

	VESTAS V-39 500KW	Nordic Windpower's N1000 1MW	SIEMENS SWT-2.3-101 2.3MW
Μέσος όρος σφάλματος σε kW	21.840,38	110.195	103.131,7
Ποσοστιαίο σφάλμα σε %	7%	16%	19.9%

Κεφάλαιο 3^ο

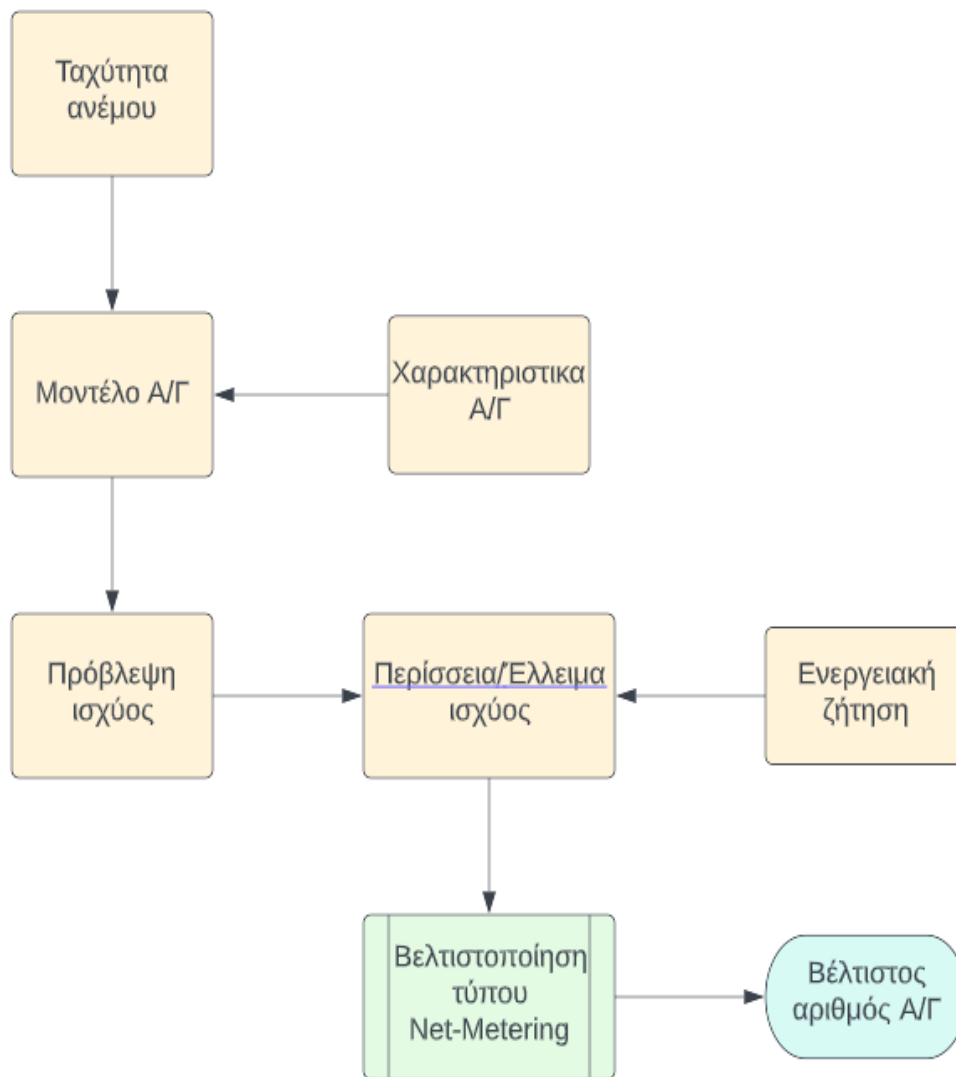
3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον βέλτιστο σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση των ανεμογεννητριών (στόχος κάθε φορά παραμένει η κάλυψη ενός προκαθορισμένο ενεργειακού φορτίου). Παρακάτω αναλύεται η διαδικασία στην οποία το μαθηματικό υπόβαθρο μπορεί να καταλήξει σ τον βέλτιστο αριθμό ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου ανάλογα την ζήτηση των ενεργειακών αναγκών.

Τα βήματα που ακολουθεί η παρούσα διπλωματική όσον αφορά την διαστασιολόγηση και προσομοίωση λειτουργίας Α/Γ είναι:

1. Επιλογή μετεωρολογικών δεδομένων για την τοποθεσία στην οποία θα γίνει η εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας ή και των ανεμογεννητριών για την μέτρηση του ανέμου.
2. Συλλογή ενεργειακών προφίλ εις το οποίο στοχεύει η παρούσα διπλωματική να καλύψει.
3. Σύγκριση και επιλογή ανεμογεννητριών με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά έτσι ώστε να υποστηρίζουν τα ανάλογα ενεργειακά προφίλ.
4. Τελικό βήμα, αποτελεί η βελτιστοποίηση του προβλήματος για να βρεθεί η λύση με την οποία δεν θα υπάρχει μεγάλη διαφορά στην μέση παραγώμενη ενέργεια και στην μέση αναγκαία ζήτηση τροφοδότησης. Αυτό το βήμα πραγματοποιείται με τη βοήθεια του εργαλείου Optimtool.

Παρακάτω εμφανίζεται ένα λογικό διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει τα βήματα επίλυσης του προβλήματος :



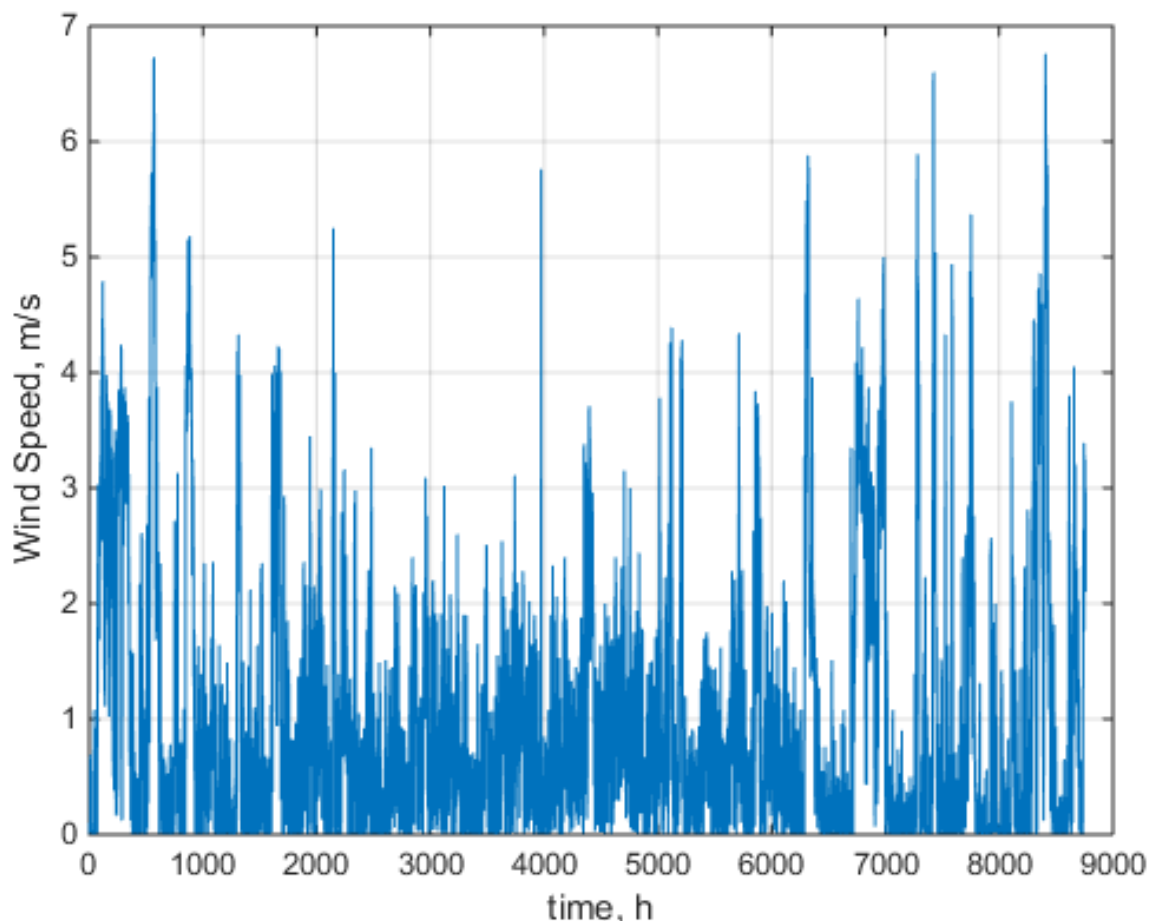
Εικόνα 3.1 Λογικό διάγραμμα στρατηγικής επίλυσης του προβλήματος.

3.2 Δεδομένα εισαγωγής

Σαν δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο χρησιμοποιούνται ενεργειακά προφίλ ενός α) σπιτιού, β) ενός super market, γ) ενός νοσοκομείου καθώς και δεδομένα μέτρησης του ανέμου στην τοποθεσία που θα γίνει η εγκατάσταση. Όλα τα δεδομένα είναι μετρήσεις ανά ώρα και για 1 έτος.

Δεδομένα ανέμου

Για τα δεδομένα ανέμου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανά μία ώρα για διάστημα των 365 ημερών με σύνολο των 8.760 μετρήσεων. Διαγραμματικά ο άνεμος σε σχέση με τον χρόνο παρουσιάζεται παρακάτω:

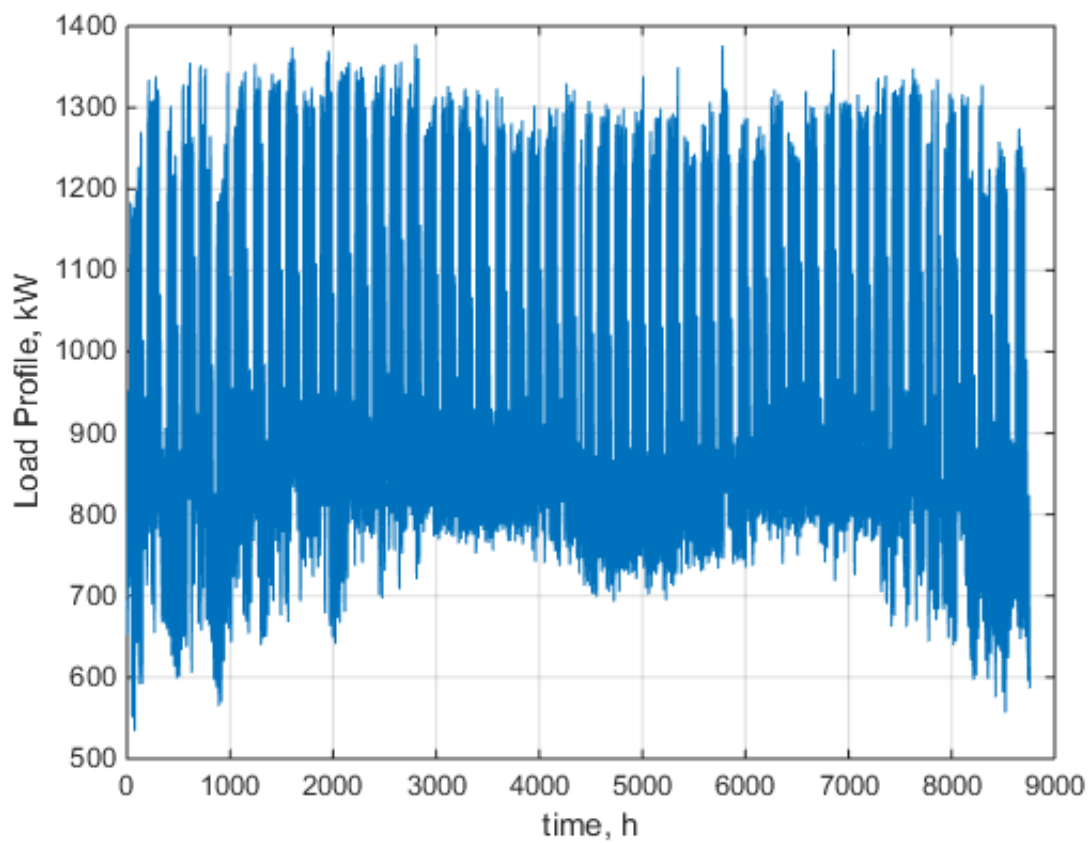


Διάγραμμα 3.1 Μετρήσεις ανέμου στη διάρκεια ενός έτους

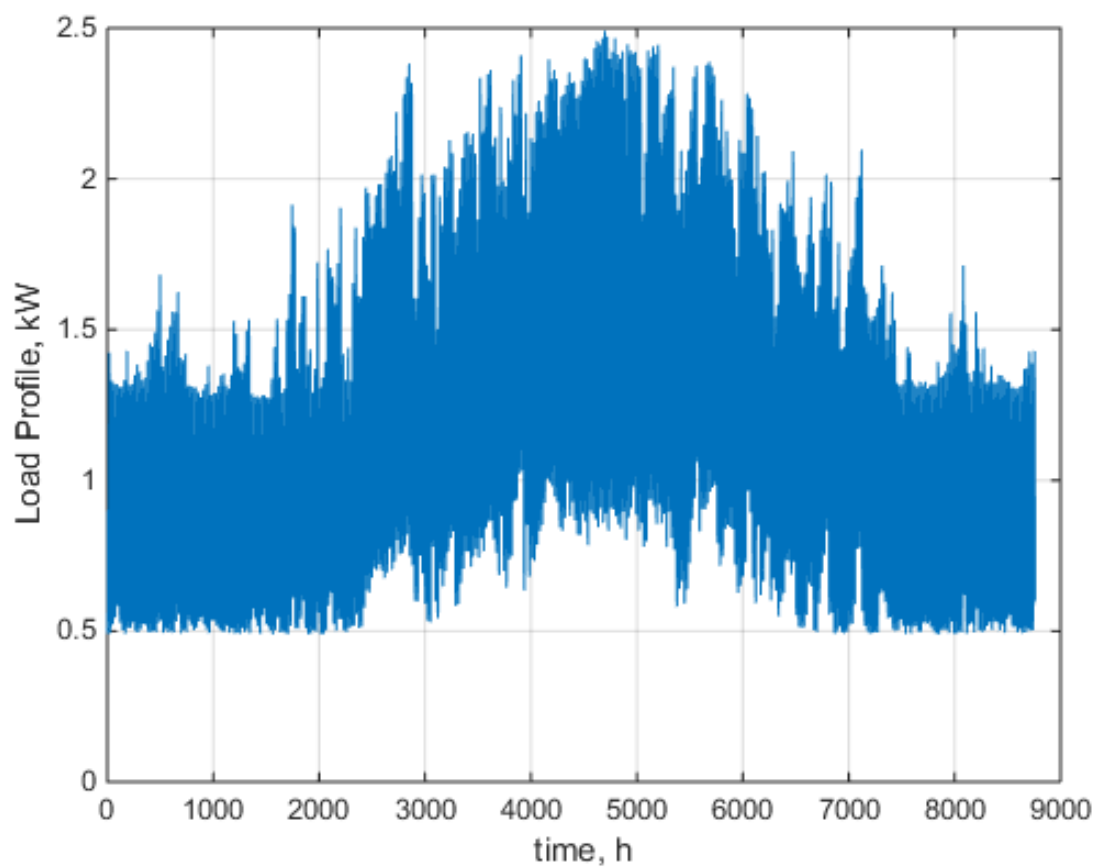
Όπως φαίνεται απο τις μετρήσεις ο άνεμος δεν είναι σταθερός κάθε ημέρα του χρόνου οπότε μπορεί να υπάρξουν ημέρες στις οποίες η ανεμογεννήτρια να μην παράγει καθόλου ενέργεια. Τα στοιχεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν για όλες τις ανεμογεννήτριες διότι είναι δεδομένα από τον τόπο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Ο μέσος όρος της ταχύτητας του ανέμου στην τοποθεσία αυτή είναι 0.96 m/s.

Ενεργειακά προφίλ

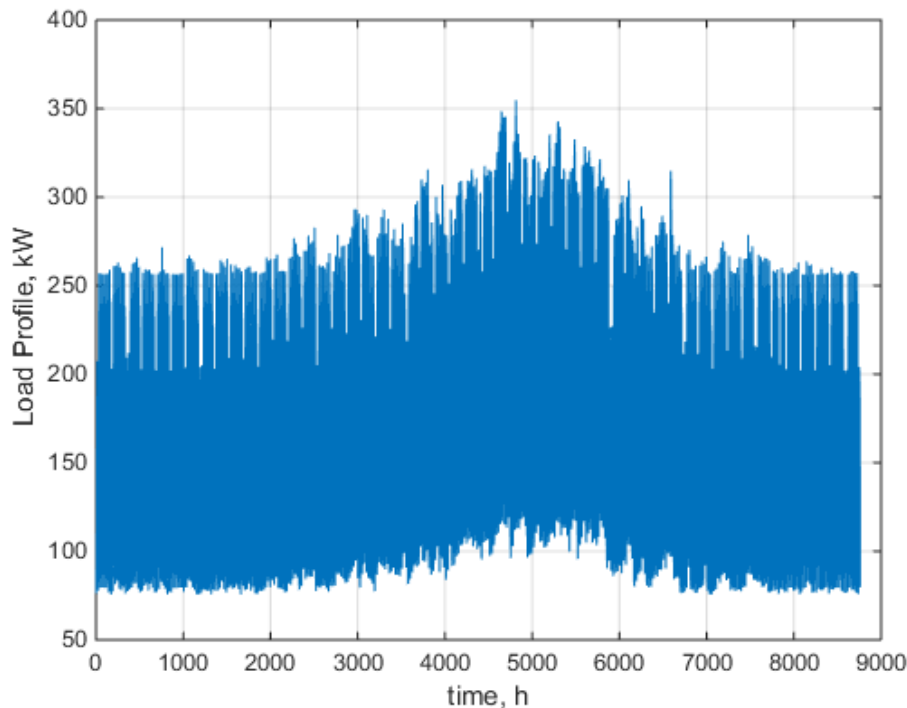
Για τα ενεργειακά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν γίνανε μετρήσεις ανα μία ώρα για διάστημα των 365 ημερών με σύνολο των 8.760 μετρήσεων. Τα δεδομένα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω ως ενεργειακά προφίλ είναι ενός σπιτιού , ενός νοσοκομείου και ενός σούπερ μάρκετ. Διαγραμματικά εμφανίζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 3.2 Ενεργειακό προφίλ νοσοκομείου.



Διάγραμμα 3.3 Ενεργειακό προφίλ ενός σπιτιού.



Διάγραμμα 3.4 Ενεργειακό προφίλ ενός σούπερ μάρκετ.

Υπολογίζεται ακόμα και ο μέσος όρος κατανάλωσης για το κάθε προφίλ:

- Μέσος όρος ημερήσιας ενεργειακής κατανάλωσης νοσοκομείου **963 kW**
- Μέσος όρος ημερήσιας ενεργειακής κατανάλωσης σπιτιού: **1.09 kW**
- Μέσος όρος ημερήσιας ενεργειακής κατανάλωσης σούπερ μάρκετ : **182 kW**

3.3 Παρουσίαση κώδικα

Αφού έχουν επιλεχθεί τα στοιχεία εισαγωγής για την μελέτη που θα γίνει, ακολουθεί η διαστασιολόγηση που λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον matlab. Με την βοήθεια του ανέμου, του ενεργειακού προφίλ καθώς και τα δεδομένα της ανεμογεννήτριας, μπορεί να υπολογιστεί η παραγωγή της ισχύς που προσφέρει η ανεμογεννήτρια ή και το αιολικό πάρκο και το αν θα είναι αρκετή για την τροφοδότηση της εγκατάστασης. Έπειτα, παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα τα οποία είναι η ισχύς της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια ενός έτους, η ζήτηση κατά τη διάρκεια του έτους και τέλος η διαφορά των δύο για κάθε μέτρηση το οποίο αναφέρεται στην εργασία ως P_{net} . Η διαφορά αυτή είναι το σφάλμα που προκύπτει από την έλλειψη ή το πλεόνασμα της ενέργειας, το οποίο θα ελαχιστοποιηθεί στην περίπτωση μας.

$$P_{net} = P_{wt} - P_{load}$$

Όπου **P_{wt}** είναι η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια, **P_{load}** η ενεργειακή ζήτηση και **P_{net}** η διαφορά τους η οποία είναι η μεταβλήτη που θα γίνει η ελαχιστοποίηση.

Net-Metering

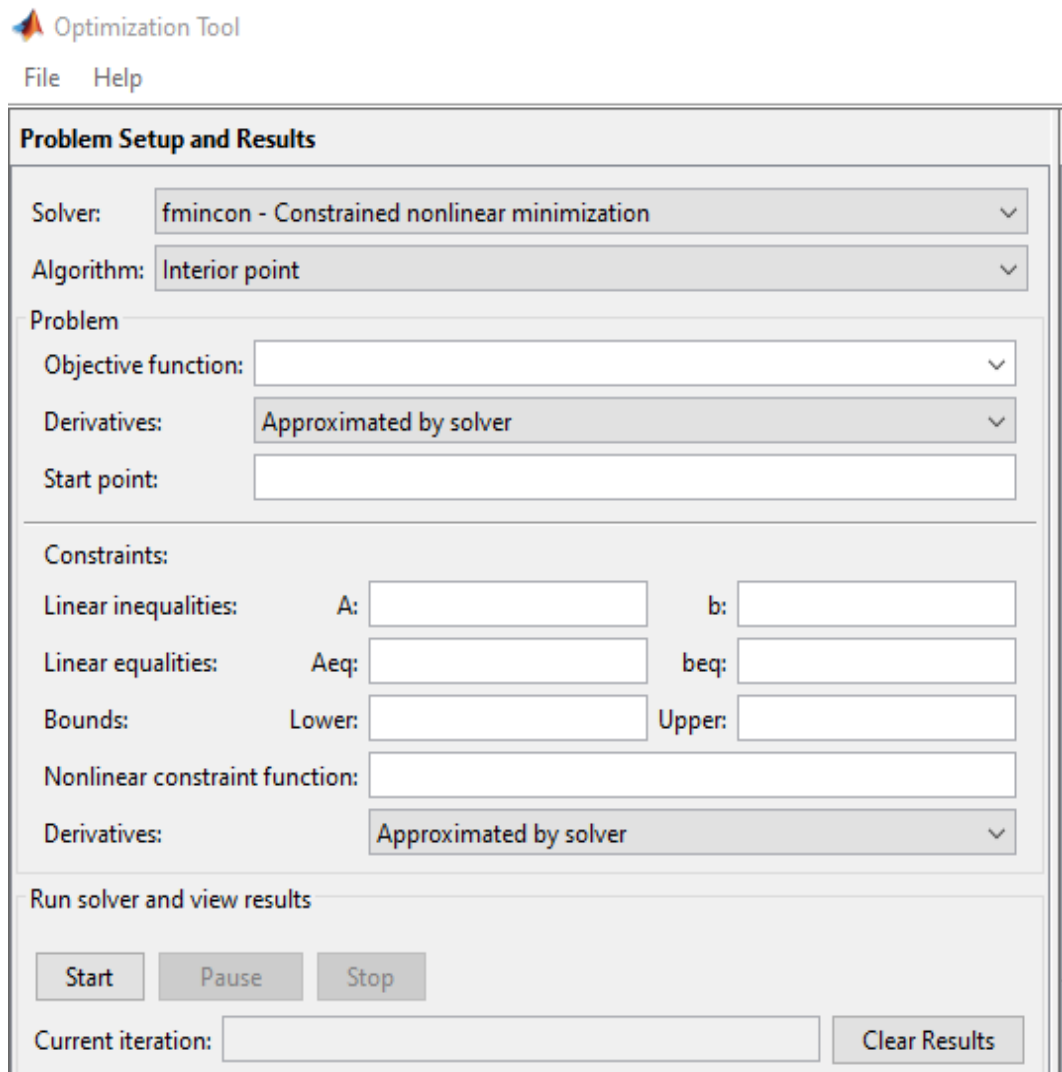
Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, εκτός του ότι με την βέλτιστη διαστασιολόγηση το σφάλμα ελαχιστοποιείται αλλά με το Net-Metering αγγίζει το μηδέν. Το Net-Metering είναι ο συμψηφισμός παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας και εφαρμόζεται κυρίως για εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ακόμα, επιτρέπει στον καταναλωτή να καλύψει ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας που καταναλώνει ενώ παράλληλα του δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει το δίκτυο για έμμεση αποθήκευση της πράσινης ενέργειας που παράγει το σύστημα. Ο όρος "net" προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας σε μία ορισμένη χρονική περίοδο. Αν υπάρχει περίσσεια ενέργειας, αυτή συνήθως δεν χάνεται για τον καταναλωτή αλλά συμψηφίζεται για μια ορισμένη χρονική περίοδο οπότε και γίνεται η τελική εκκαθάριση και επίσης αν υπάρχει έλλειμα τότε η ενέργεια παρέχεται από τον πάροχο. Στόχος φυσικά της βελτιστοποίησης είναι να μην υπάρχει έλλειμα σε καμία περίπτωση στο τέλος του έτους.

3.4 Βελτιστοποίηση

Η βελτιστοποίηση είναι μια διαδικασία με την οποία ο άνθρωπος τείνει πάντα να βρει έναν τρόπο να επιτύχει την υψηλότερη δυνατή απόδοση χρησιμοποιώντας το ελάχιστο ποσό πόρων ή να μειώσει το κόστος που μπορεί να περιγραφεί ως περιττό. Υπό αυτήν την έννοια, για να είναι κάτι επικερδές, υπάρχει πάντα η τάση να αναζητούνται τρόποι βελτιστοποίησης των διαθέσιμων πόρων, επιπλέον να διασφαλίζεται η βιωσιμότητα της οικονομικής δραστηριότητας. Στην περίπτωση μας θα χρησιμοποιηθεί η βελτιστοποίηση για τον ενεργειακό τομέα αλλά και έπειτα για τον οικονομικό. Στα Μαθηματικά, η βελτιστοποίηση είναι η λειτουργία μέσω της οποίας καθιερώνεται μια τιμή, μεταξύ ενός συνόλου στοιχείων, η οποία είναι η καλύτερη διαθέσιμη. Υπό αυτήν την έννοια, είναι μια λειτουργία που εφαρμόζεται για την επίλυση ενός γενικού τύπου προβλήματος που περιλαμβάνει την επιλογή της καλύτερης λύσης.

Για το τελευταίο βήμα απαιτείται το Optimization tool (Optimtool) το οποίο είναι εργαλείο του matlab που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης κάθε είδους αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτή η εργαλειοθήκη βελτιστοποίησης παρέχει λειτουργίες που ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν τις μεταβλητές που δέχονται λαμβάνοντας υπόψιν και περιορισμούς που εισάγονται και επίσης μπορεί να λύσει προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, μη-γραμμικού προγραμματισμού, μικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), τετραγωνικού προγραμματισμού και πολλά ακόμα. Για να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση χρειάζεται η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί και η μέθοδος με την οποία ο χρήστης θα θελήσει να πραγματοποιήσει την διαδικασία. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία θα είναι η *Fmincon*.

Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται το περιβάλλον του Optimtool :



Εικόνα 3.2 Περιβάλλον *Optimization tool*.

Στο πεδίο Solver μπορεί ο χρήστης να επιλέξει την μέθοδο βελτιστοποίησης που θέλει να ακολουθήσει, στην περίπτωση της διπλωματικής αυτής έχει επιλεγθεί η μέθοδος constrained nonlinear minimization ή **fmincon**. Παρακάτω στο πεδίο Objective function ο χρήστης καλείται να επιλέξει την αντικειμενική συνάρτηση που χρειάζεται να μεγιστοποιήσει ή να ελαχιστοποιήσει. Τέλος εισάγονται τα όρια του αποτελέσματος στο πεδίο Bounds, τα οποία δεν μπορούν να είναι μικρότερα του ένα διότι θέλουμε τουλάχιστον μία ανεμογεννήτρια καθώς και ο αριθμός ένα στο starting point. Για το πρόβλημα της διαστασιολόγησης ενός αιολικού παρκού η αντικειμενική συνάρτηση θα είναι η διαφορά της ζήτησης η συνολικής ανάγκης της ενέργειας (**Pload**) με την ενεργειακή παραγωγή των ανεμογεννητριών (**Pwt**) για την διάρκεια ενός έτους.

Ελαχιστοποιώντας λοιπόν την παράμετρο αυτή θα βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός ανεμογεννητριών έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλο πλεόνασμα η μεγάλη έλλειψη τα οποία αυξάνουν το κόστος επένδυσης αλλά και συντήρησης του έργου.

Κεφάλαιο 4^ο

4.1 Ενεργειακό προφίλ σπιτιού

Το ενεργειακό προφίλ του σπιτιού προαναφέρεται στο κεφάλαιο 3^ο και διαγραμματικά παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.3. Οι μετρήσεις αυτές θα εισαχθούν στον κώδικα που αναπτύχθηκε για την εύρεση του βέλτιστου αριθμού ανεμογεννητριών. Κατά τη διάρκεια ενός έτους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και ο μέσος όρος ημερήσιας κατανάλωσης υπολογίστηκε στα 26 kW.

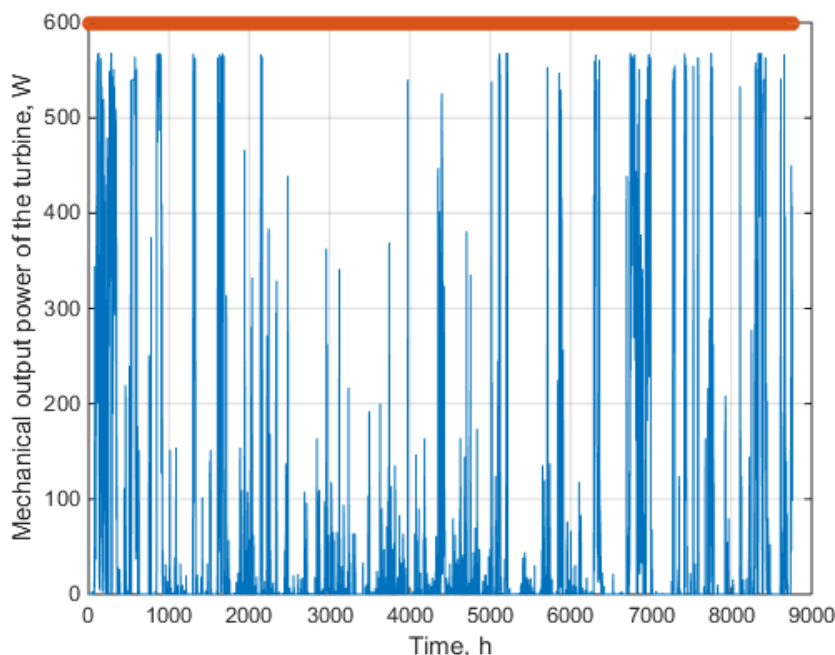
4.1.2 Βελτιστοποίηση για όλους τους τύπους ανεμογεννητριών

Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας με στόχο την δημιουργία ενός αιολικού πάρκου το οποίο να πληρεί τις ενεργειακές προϋποθέσεις για την υποστήριξη ενός νοικοκυριού.

Ανεμογεννήτρια 600W Wind Turbine, 12V/24V/48V

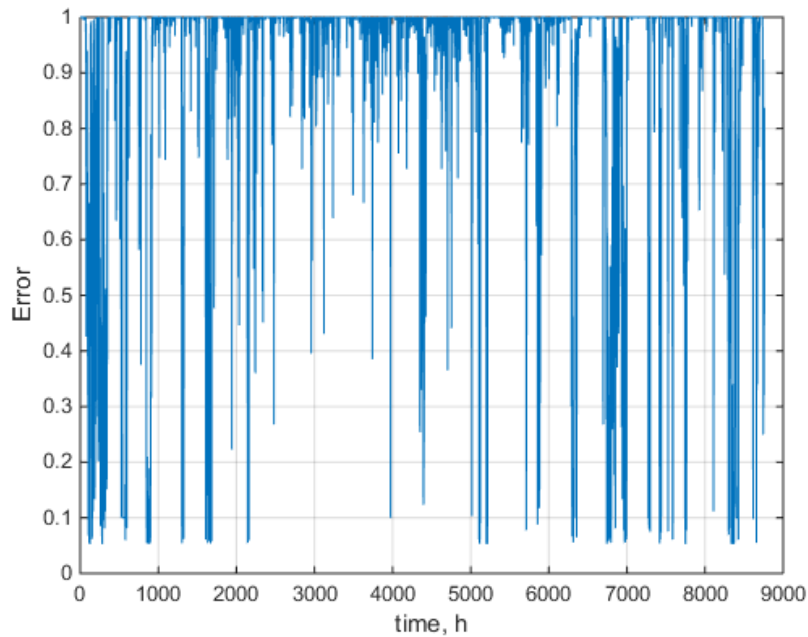
Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 19,016, άρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 11.4 kW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 4.1 Μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας 600W .

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η παραγόμενη ισχύς από την μία ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια ενός χρόνου με χρώμα μπλέ, ενώ με πορτοκαλί η μέγιστες προδιαγραφές ισχύος που έχει η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια.

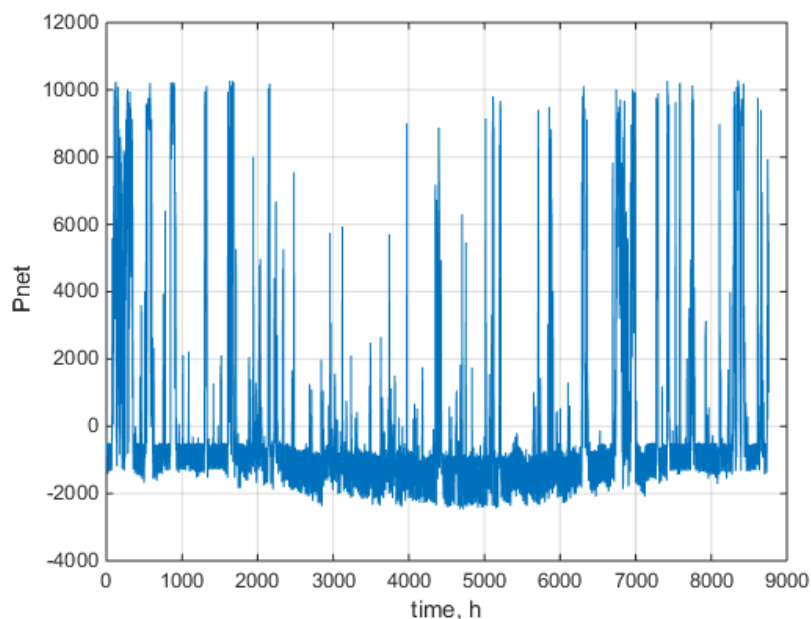


Διάγραμμα 4.2 Σφάλμα.

Στο διάγραμμα 4.2 παρουσιάζεται το σφάλμα μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με την ενεργειακή ζήτηση για ένα έτος. Το μοντέλο υπολογισμού του σφάλματος είναι το παρακάτω:

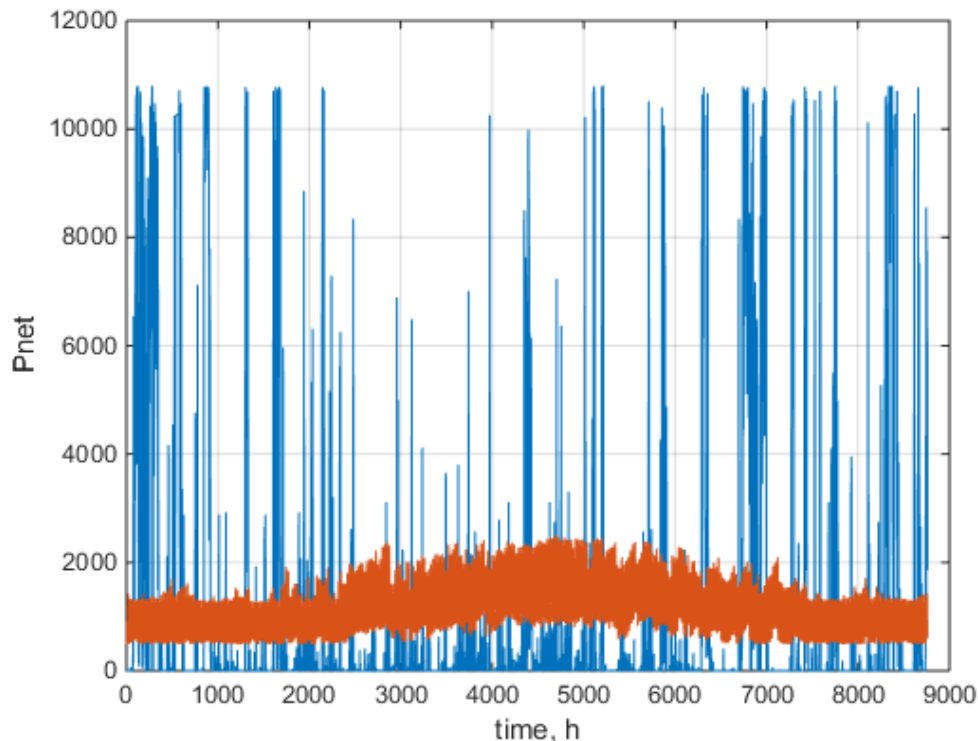
$$Error = \left| \frac{P_{max_{wt}} - P_{wind}}{P_{max_{wt}}} \right| \quad (\text{Εξίσωση 4.1})$$

Όπου Error το σφάλμα, P_{max_wt} το μέγιστο ποσό ισχύος που αναμένεται να παραχθεί από τις ανεμογεννήτριες και P_{wind} η πραγματική ισχύς που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες.



Διάγραμμα 4.3 Διαφορά ζήτησης και παροχής ενέργειας.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 19 ανεμογεννητριών 600W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής (στο σύνολο του χρόνου) και απο το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net_{avg}} = -0.92037W \sim 0$.



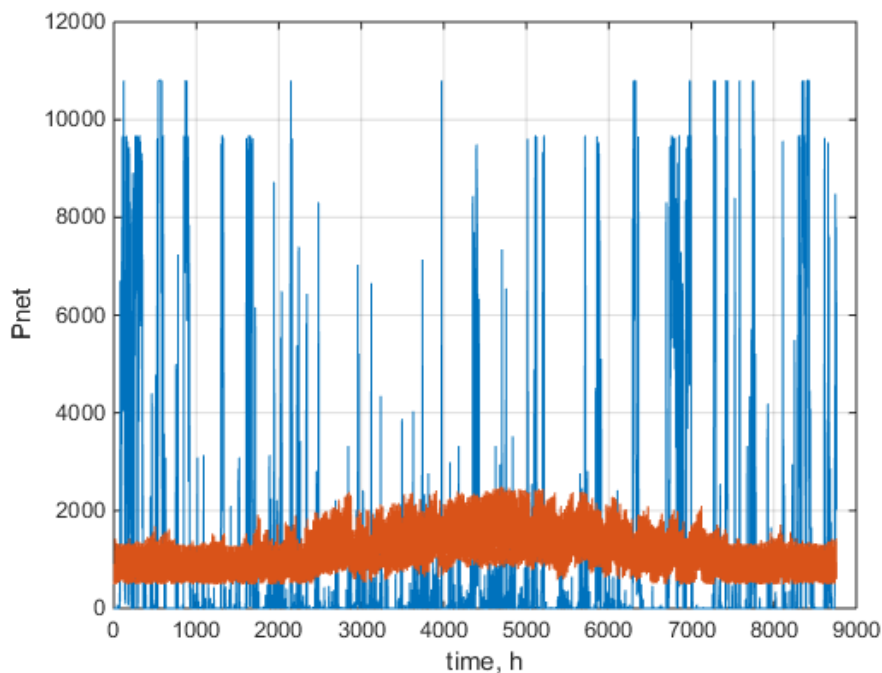
Διάγραμμα 4.4 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 600W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του σπιτιού.

Ανεμογεννήτρια 800w - ATO-WT-800M5

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 15,148, οπότε το αιολικό πάρκου θα είναι μεγέθους παραγωγής 12,1kW.

Στο παράρτημα παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων. Καθώς η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων προηγήθηκε για έναν τύπο ανεμογεννήτριας, δεν απαιτείται η επανάληψη της ανάλυσης.

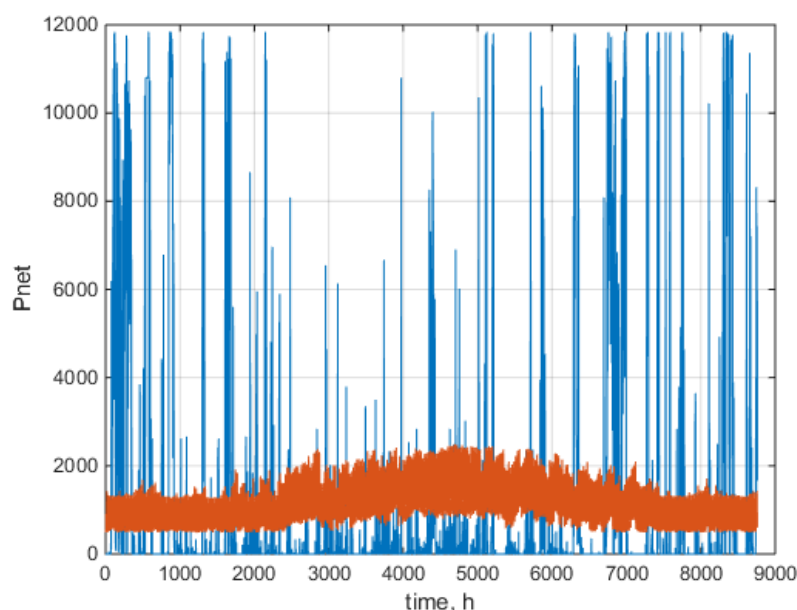


Διάγραμμα 4.5 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών.*

Στο διάγραμμα 4.5 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 800W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του σπιτιού.

Ανεμογεννήτρια 1000w τύπου-Ανεμογεννήτρια Greatwatt S1000 1200W / 48 V

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας της διαφορά ζήτησης και παραγόμενου φορτίου είναι 12.157, οπότε το αιολικό πάρκο θα είναι μεγέθους 12.1 kW.

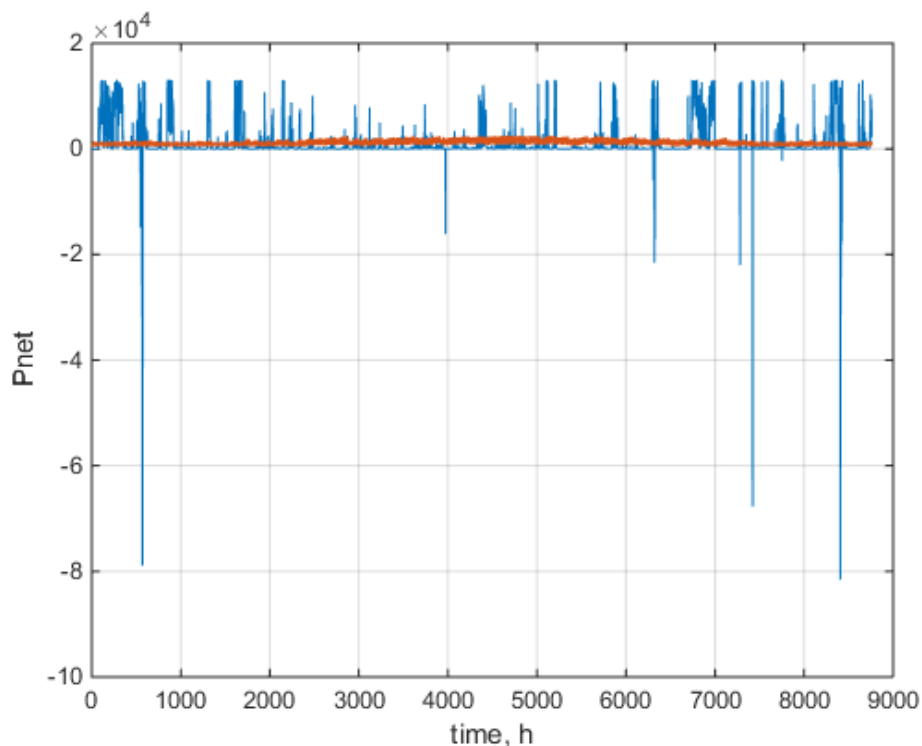


Διάγραμμα 4.6 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών.*

Στο διάγραμμα 4.6 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 1000W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του νοικοκυριού.

Raum Energy 1.5kW Wind Turbine

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας της διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 9.35, οπότε το αιολικό πάρκο θα είναι μεγέθους 14,025 kW,

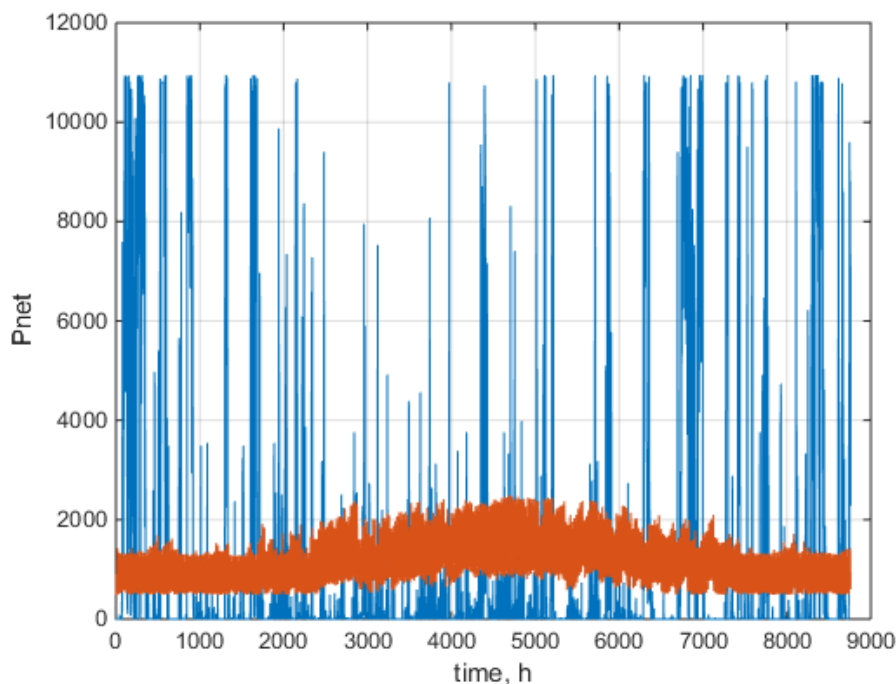


Διάγραμμα 4.7 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών.

Στο διάγραμμα 4.7 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 1500W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του νοικοκυριού.

EN-2000W-L Horizontal Axis Wind Turbine 2000W

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας της διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 5,442 ,οπότε το αιολικό πάρκο θα είναι μεγέθους 10,8 kW.



Διάγραμμα 4.8 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών.

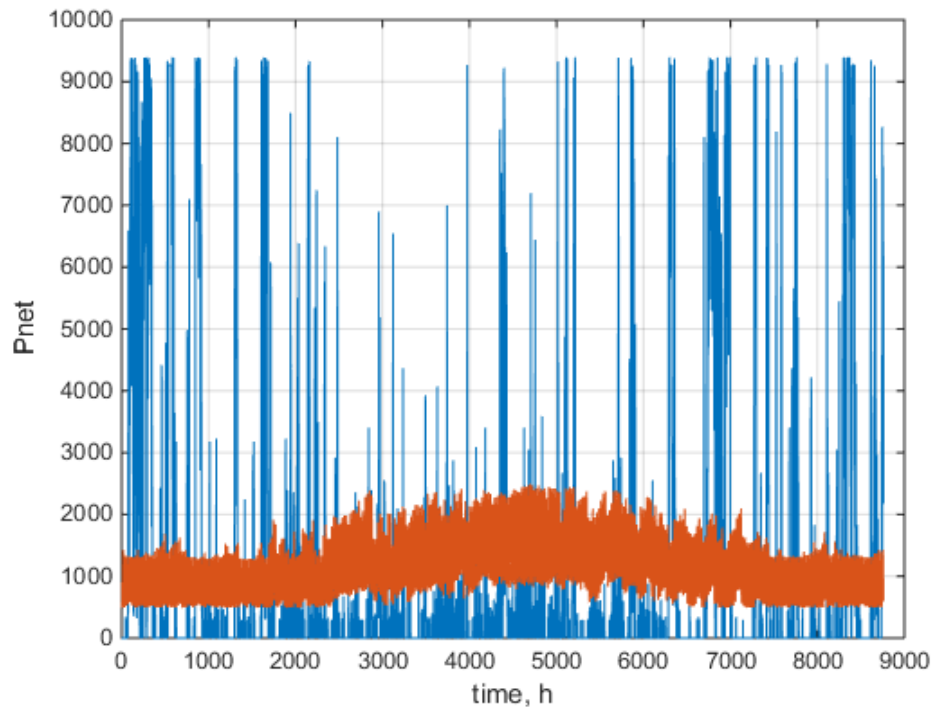
Στο διάγραμμα 4.8 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 2000W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του νοικοκυριού.

Πίνακας Βελτιστών αποτελεσμάτων διαστασιολόγησης

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης

W/G	600W 12V/24V/48V	800W ATO-WT	1000W GREATWATT W/G	1500W 24V-W/G	EN- 2000W-L
Αριθμός W/G	19	15	12	9	5
Συνολική ισχύς WGP	11.4 kW	12 kW	12 kW	13.5kW	10.8kW
Pnet	- 0.92037W	- 10.7007W	-14.1158W	-0.03854W	-88.7W

Το αιολικό πάρκο με τις ανεμογεννήτριες 2000W εμφανίζεται μεγάλο ποσοστό περίσσειας ενέργειας, οπότε με συνδιασμό ανεμογεννητριών θα ελαχιστοποιηθεί το Pnet. Με 5 ανεμογεννήτριες 2000W και 3 των 1000W το Pnet γίνεται από 111.942kW -15.261kW, παρακάτω εμφανίζεται στο διάγραμμα η ενεργειακή ζήτηση σε σχέση με την παραγωγή των 5+3 ανεμογεννητριών.



Διάγραμμα 4.9 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

4.2 Ενεργειακό προφίλ σούπερ μάρκετ

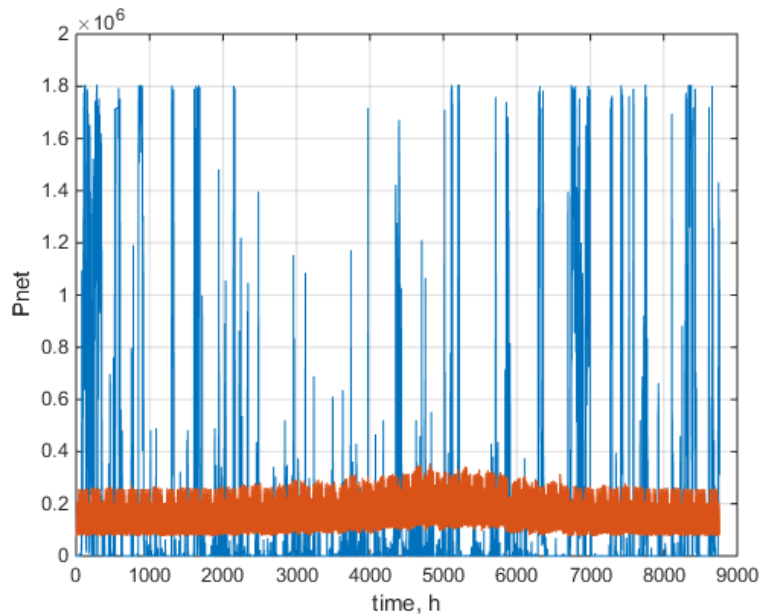
Το ενεργειακό προφίλ του σούπερ μαρκετ προαναφέρεται στο κεφάλαιο 4^ο και διαγραμματικά παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.4 οι μετρήσεις αυτές θα εισαχθούν στον κώδικα που αναπτύχθηκε για την εύρεση του βέλτιστου αριθμού ανεμογεννητριών. Κατά τη διάρκεια ενός έτους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, ο μέσος όρος ημερήσιας κατανάλωσης υπολογίστηκε στα 182 kW.

4.2.1 Βελτιστοποίηση για όλους τους τύπους ανεμογεννητριών

Ανεμογεννήτρια 600W Wind Turbine, 12V/24V/48V

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 3178.15, άρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 1,9 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



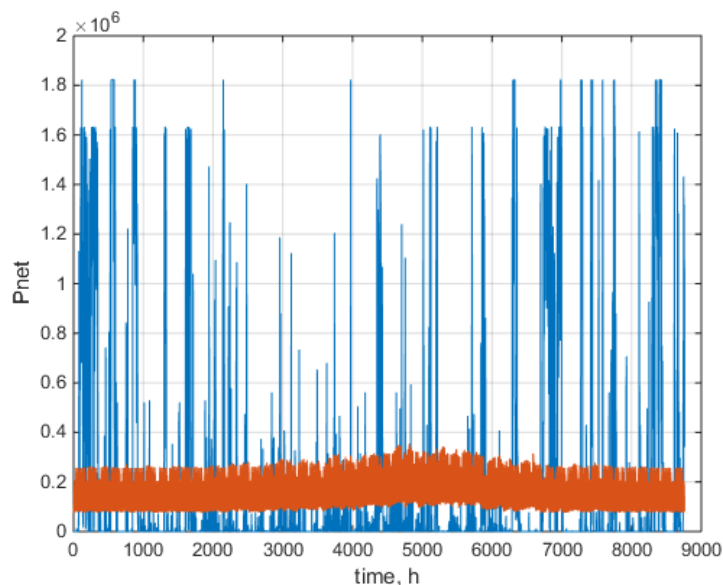
Διάγραμμα 4.10 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Στο διάγραμμα 4.10 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 600W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του σούπερ μάρκετ.

Ανεμογεννήτρια 800w - ATO-WT-800M5

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 2531.76 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 2,025 MW..

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



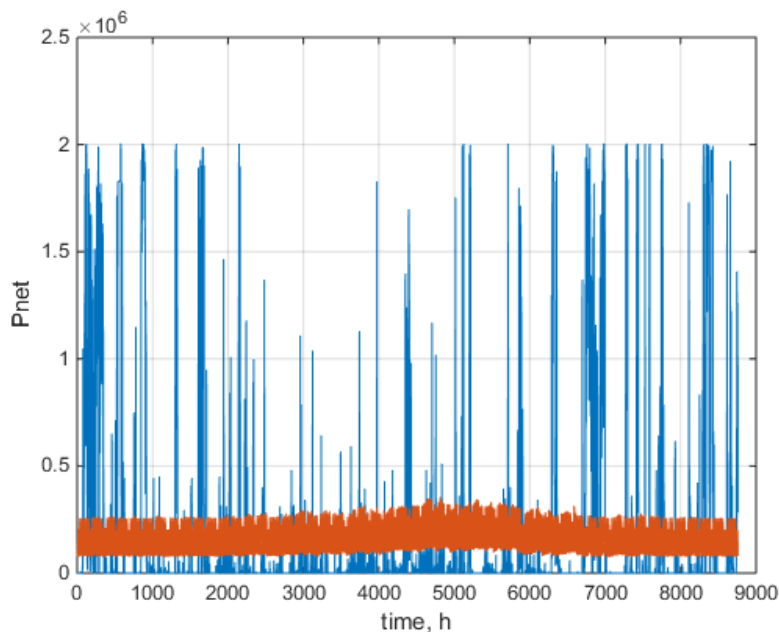
Διάγραμμα 4.11 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Στο διάγραμμα 4.11 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 800W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του σούπερ μάρκετ.

Ανεμογεννήτρια 1000w τύπου-Ανεμογεννήτρια Greatwatt S1000 1200W / 48 V

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 2031.8 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 2,031 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



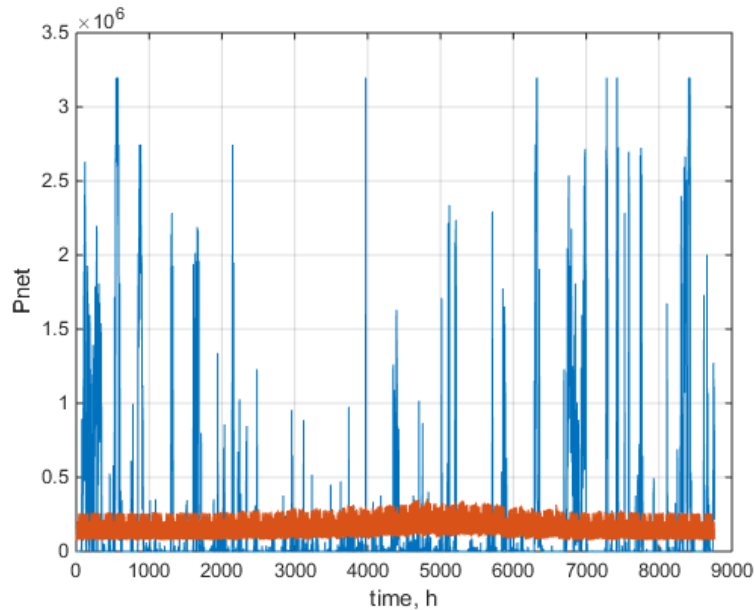
Διάγραμμα 4.12 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Στο διάγραμμα 4.12 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 1000W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του σούπερ μάρκετ.

Raum Energy 1.5kW Wind Turbine

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 2.368.52 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 2.34 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



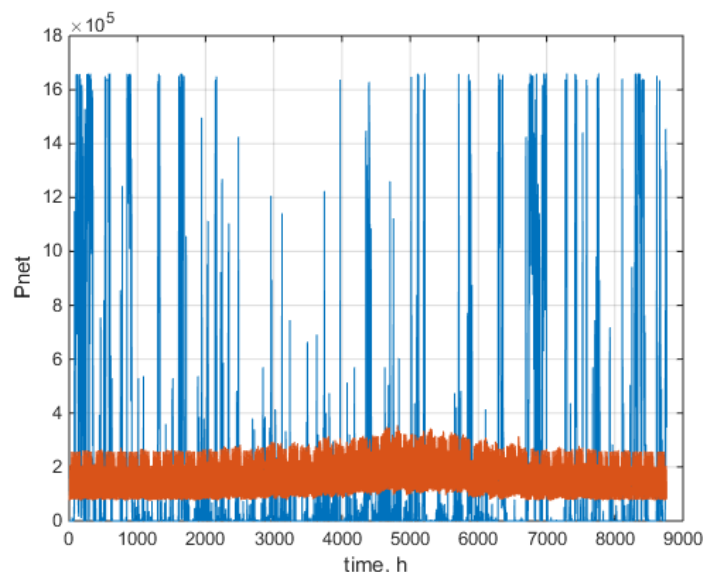
Διάγραμμα 4.13 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Στο διάγραμμα 4.13 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 1500W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του σούπερ μάρκετ.

EN-2000W-L Horizontal Axis Wind Turbine 2000W

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 909.53 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 1,819 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 4.14 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Στο διάγραμμα 4.14 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 2000W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του σούπερ μάρκετ

Πίνακας Βελτιστών αποτελεσμάτων διαστασιολόγησης

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης

W/G	<i>600W W/G 12V/24V/48V</i>	<i>800W ATO-WT</i>	<i>1000W GREATWATT W/G</i>	<i>1500W 24V-W/G</i>	<i>EN- 2000W-L</i>
Αριθμός W/G	3178.15	2531.76	2031.8	1562.72	909.53
Συνολική ισχύς WGP	1.9 MW	2.02 MW	2.03 MW	2.34 MW	1.81 MW
Pnet	-0.04977 W	-0.11633 W	- 2.40418 W	-0.00136 W	-1.96266 W

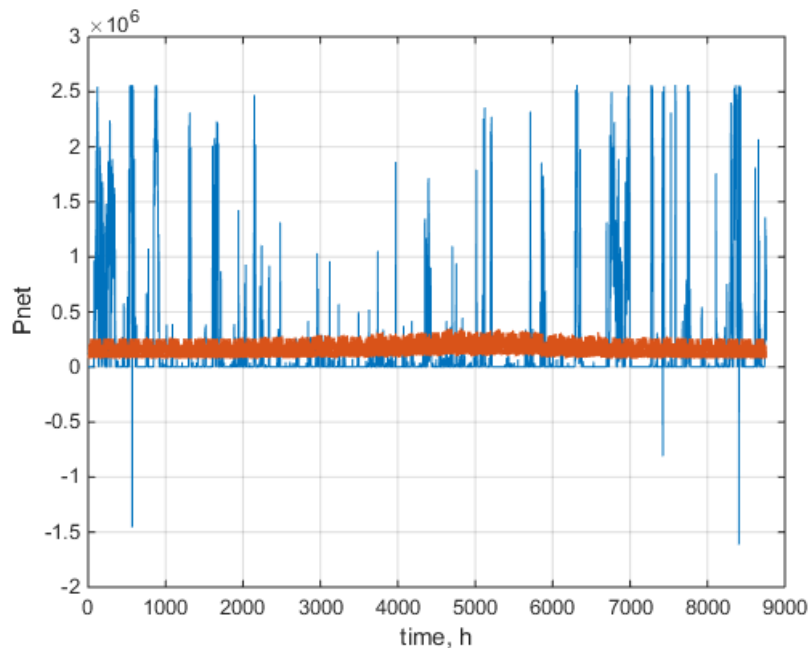
4.2.2 Βελτιστοποίηση για μεγαλύτερους τύπους ανεμογεννητριών

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από τον πίνακα φαίνεται πως οι ανεμογεννήτριες που πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση είναι μικρής ισχύος για την ενεργειακή ζήτηση που απαιτείται από το σούπερ μάρκετ. Έτσι, θα χρησιμοποιηθούν οι ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης ισχύος για την βελτιστοποίηση του προβλήματος.

VESTAS V-39 500KW

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 5.1640 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 2,58 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



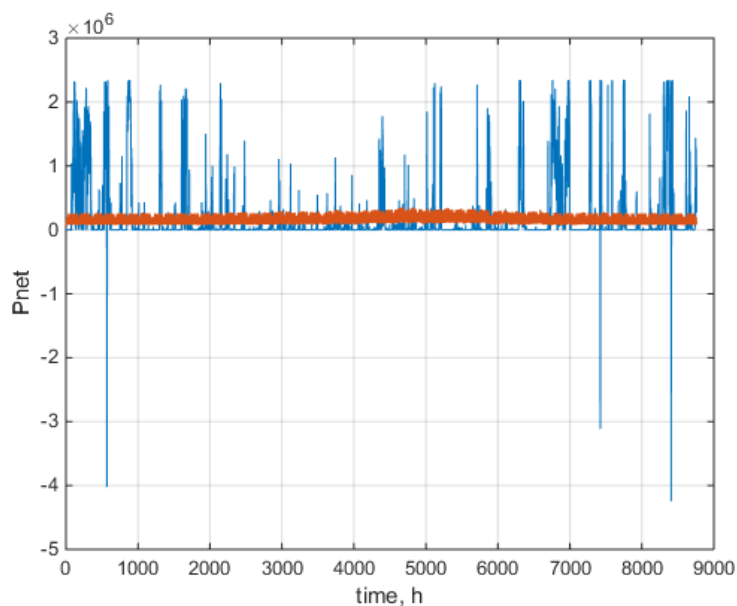
Διάγραμμα 4.15 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Στο διάγραμμα 4.15 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 0.5MW και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του σούπερ μάρκετ. Ρεαλιστικά δεν μπορώ να χρησιμοποιήσω 5,1 ανεμογεννήτριες οπότε για 5 ανεμογεννήτριες το P_{net} είναι -5796.26kW.

Nordic Windpower's N1000 1MW

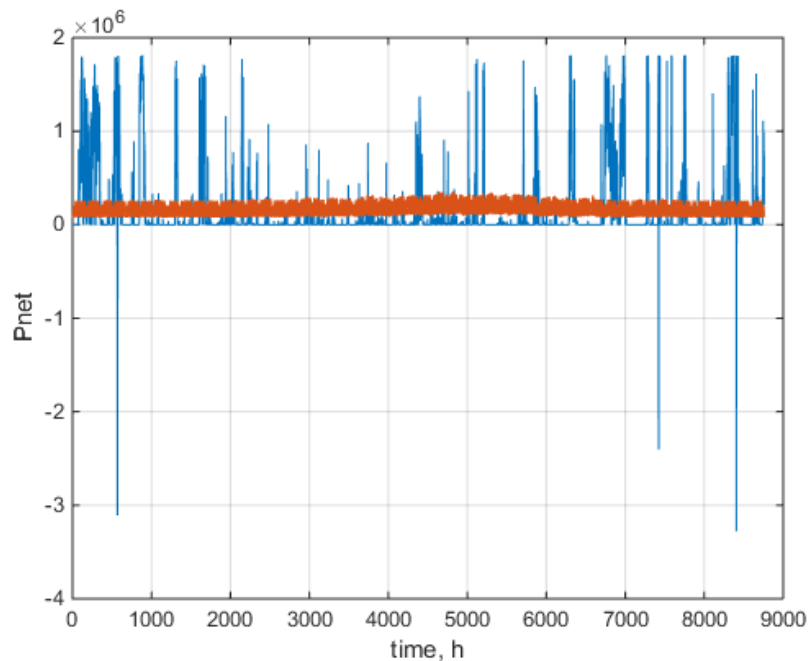
Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 2.59, άρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 2,59 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 4.16 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

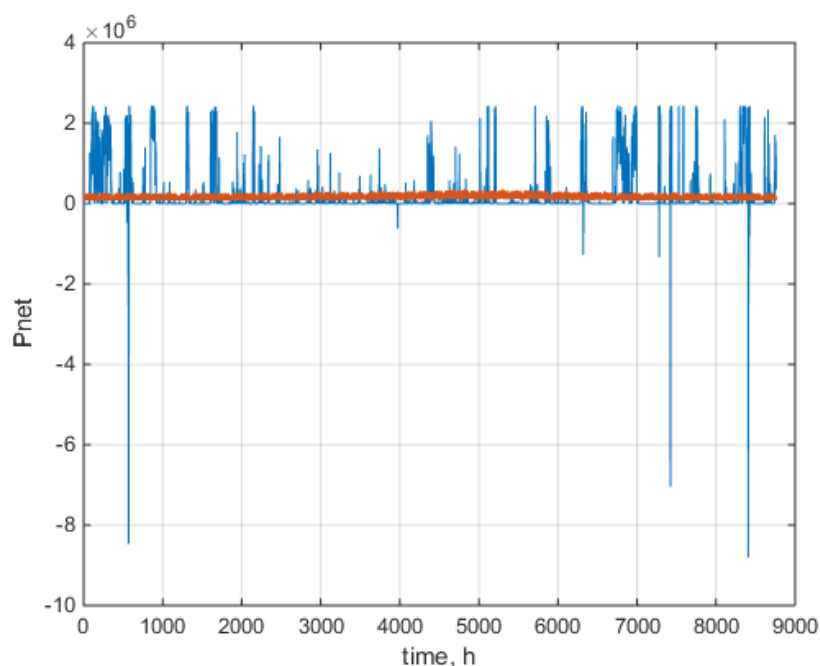
Όμως δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση 2.59 ανεμογεννητριών οπότε θα πραγματοποιηθεί συνδιασμός ανεμογεννητριών με σκοπό την ελαχιστοποίηση του P_{net} . Άρα με την πρόσθήκη 1 ανεμογεννήτριας των 0.5 MW στο αιολικό πάρκο το P_{net} γίνεται ίσο με -6573.4W και το διάγραμμα ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ισχύος του συνδιασμού ανεμογεννητριών εμφανίζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 4.17 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

SIEMENS SWT-2.3-101

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 1.1510 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 2,64 MW.



Διάγραμμα 4.18 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Όμως δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση 1.15 ανεμογεννητριών οπότε θα πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση μίας ανεμογεννήτριας με σκοπό την ελαχιστοποίηση του P_{net} το οποίο για 1 ανεμογεννήτρια 2.3MW είναι -8.009,81.

Πίνακας Βελτιστων αποτελεσμάτων διαστασιολόγησης

Πίνακας 4.3 Πίνακας βέλτιστης διαστασιολόγησης μεγάλων ανεμογεννητριών

	VESTAS V-39 500KW	Nordic Windpower's N1000 1MW	SIEMENS SWT-2.3- 101
Αριθμός W/G	5	2 + 1* 0.5KW	1
Συνολική ισχύς WGP	2.5MW	2.5MW	2.3MW
P_{net}	-5796.26.W	-6573.4W	-8.009,81.W

4.3 Ενεργειακό προφίλ νοσοκομείου

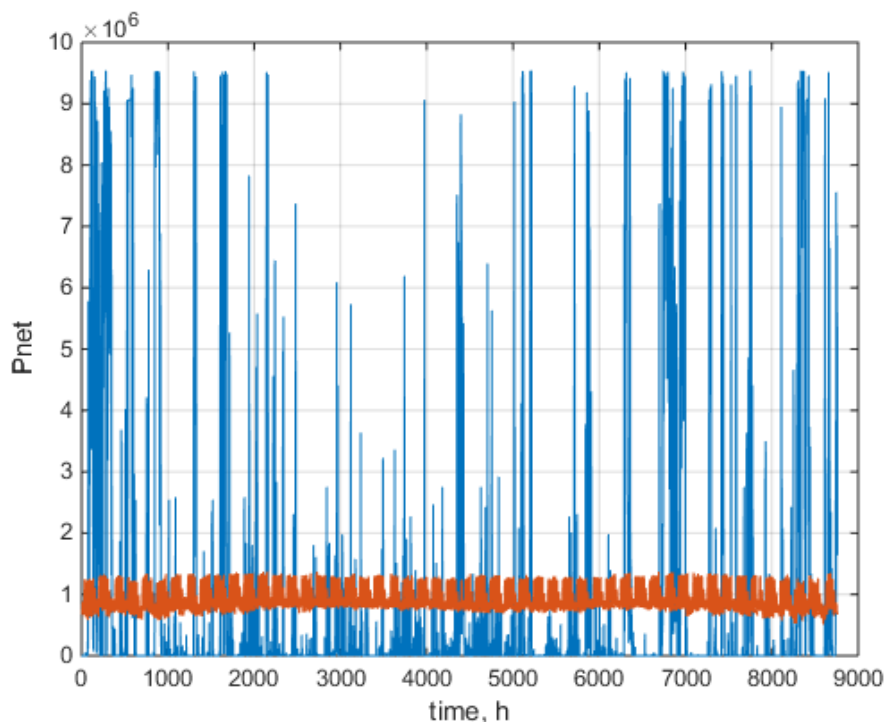
Το ενεργειακό προφίλ του νοσοκομείου προαναφέρεται στο κεφάλαιο 3^ο και διαγραμματικά παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.2 οι μετρήσεις αυτές θα εισαχθούν στον κώδικα που αναπτύχθηκε για την εύρεση του βέλτιστου αριθμού ανεμογεννητριών. Κατά τη διάρκεια ενός έτους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, ο μέσος όρος ημερήσιας κατανάλωσης υπολογίστηκε στα **963 kW**.

4.3.2 Βελτιστοποίηση για όλους τους τύπους ανεμογεννητριών

Ανεμογεννήτρια 600W Wind Turbine, 12V/24V/48V

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 16.786.37, άρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 10.07 MW.

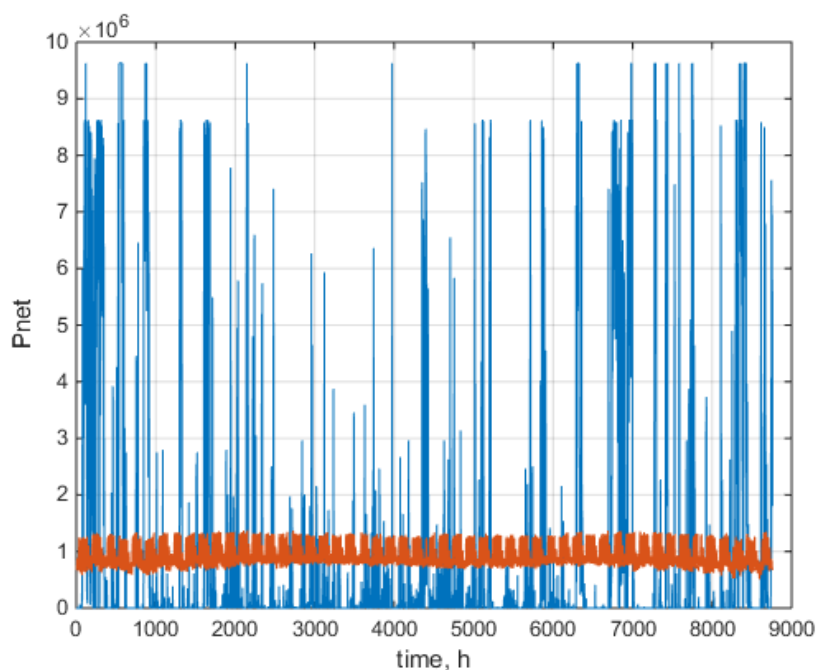
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 4.19 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών*

Ανεμογεννήτρια 800w - ATO-WT-800M5

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 13.372,27 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 10,69 MW. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.

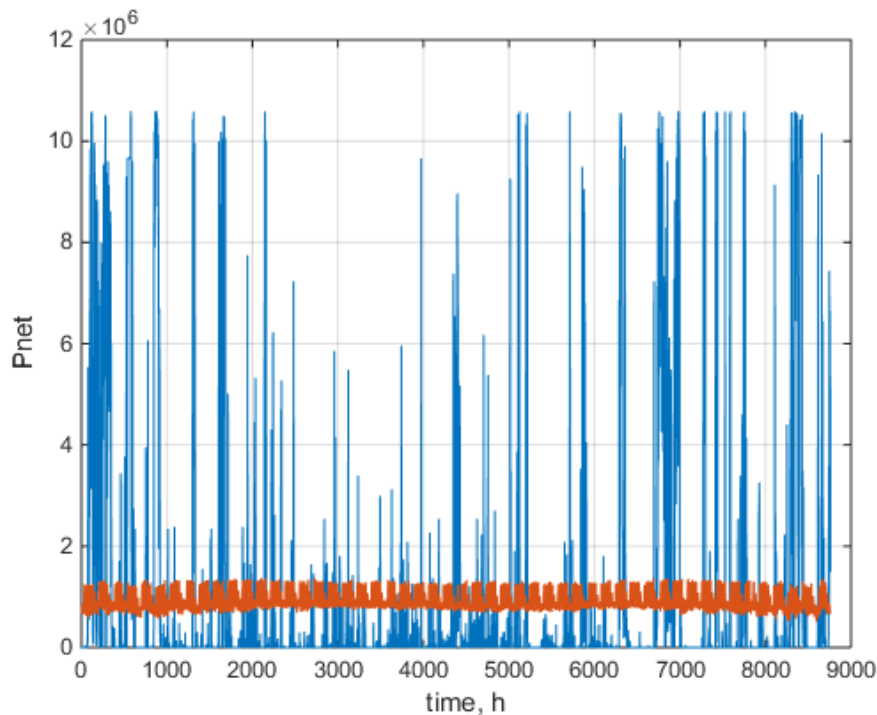


Διάγραμμα 4.20 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών*

Ανεμογεννήτρια 1000w τύπου-Ανεμογεννήτρια Greatwatt S1000 1200W / 48 V

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 10.731,71 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 10.73 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



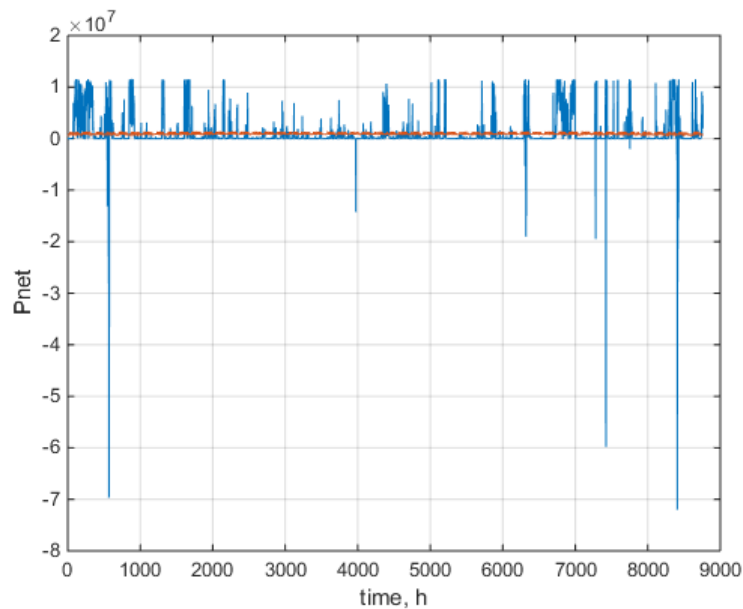
Διάγραμμα 4.21 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών*

Στο διάγραμμα 4.21 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 1000W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του νοσοκομείου

Raum Energy 1.5kW Wind Turbine

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 12.510,08 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 18.76 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων



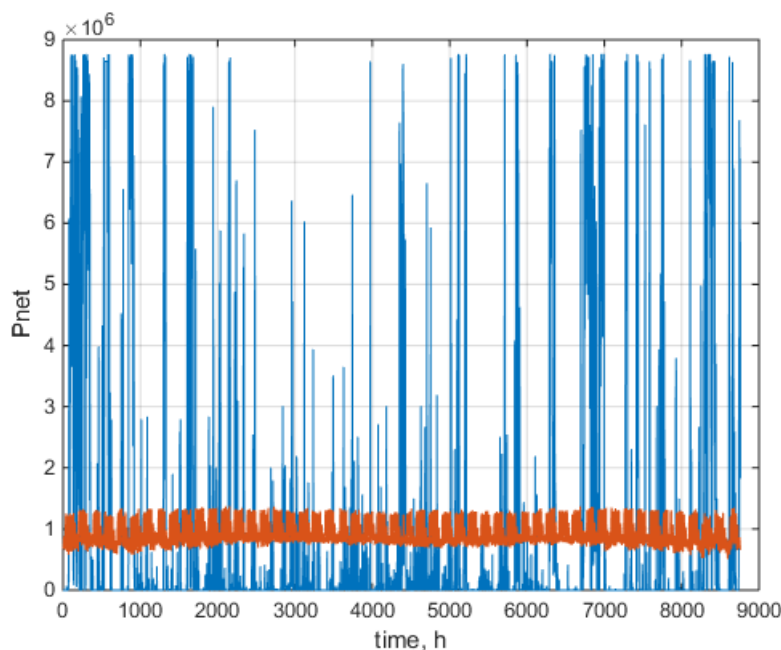
Διάγραμμα 4.22 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών*

Στο διάγραμμα 4.22 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 1500W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του νοσοκομείου.

EN-2000W-L Horizontal Axis Wind Turbine 2000W

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 4804.01, άρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 9.6 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 4.23 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών*

Στο διάγραμμα 4.23 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 2000W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του νοσοκομείου

Πίνακας Βελτιστων αποτελεσμάτων διαστασιολόγησης

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης

W/G	600W 12V/24V/48V W/G	800W ATO-WT	1000W GREATWATT W/G	1500W 24V-W/G	EN- 2000W-L
Αριθμός W/G	16.786.37	13.372,27	10.731,71	8253.991	4804.01
Συνολική ισχύς WGP	10.07 MW	10.69 MW	10.73 MW	12.38 MW	9.6 MW
Pnet	-0.25544 W	-0.15812 W	-0.15812 W	-0.00699W	-0.0081 W

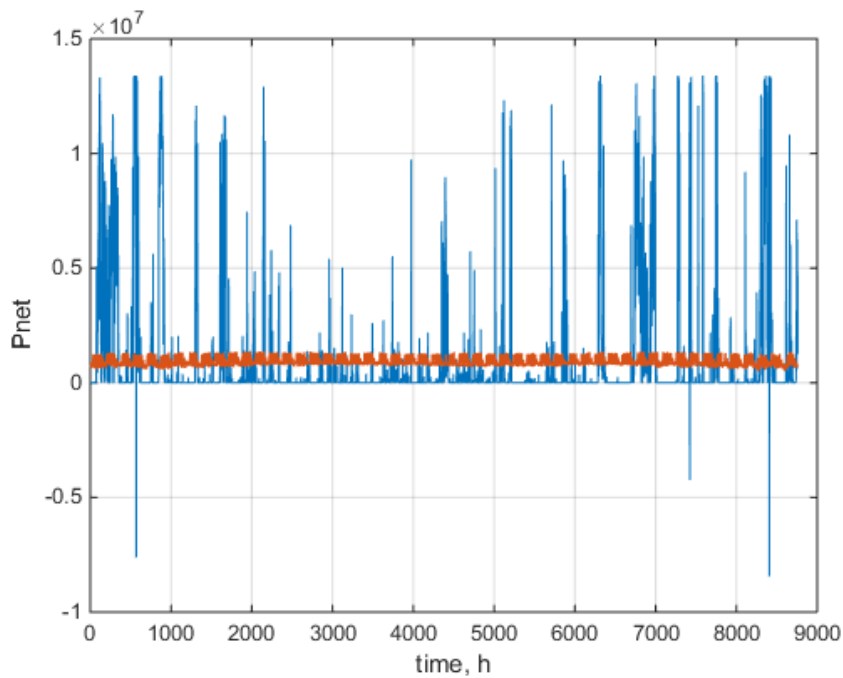
4.3.3 Βελτιστοποίηση για μεγαλύτερους τύπους ανεμογεννητριών

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από τον πίνακα φαίνεται πως οι ανεμογεννήτριες που πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση είναι μικρής ισχύος για την ενεργειακή ζήτηση που απαιτείται απο το νοσοκομείου. Έτσι, θα χρησιμοποιηθούν οι ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης ισχύος για την βελτιστοποίηση του προβλήματος.

VESTAS V-39 500KW

Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 27 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 13.5MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



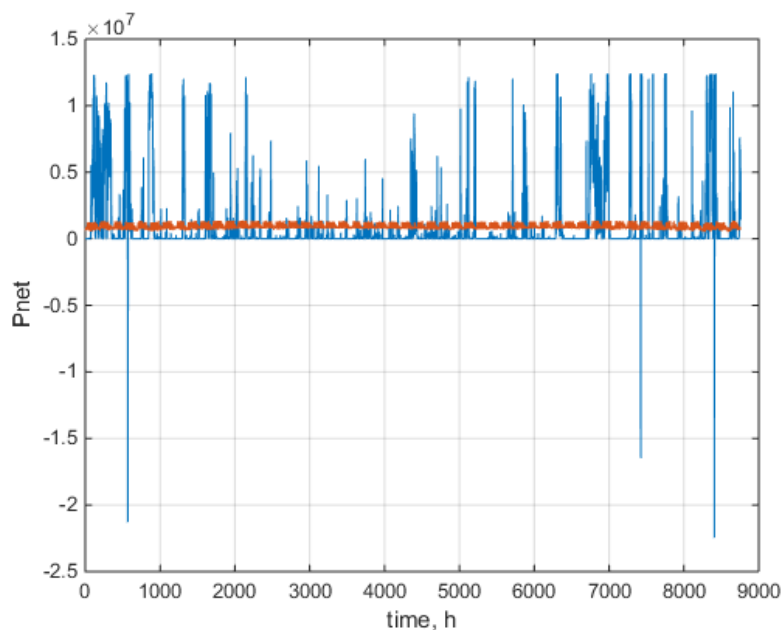
Διάγραμμα 4.24 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Το Pnet για 27 ανεμογεννήτριες ενώ η βελτιστοποίηση έβγαλε αποτέλεσμα 27.27 είναι - 9729.25W οπότε δεν χρειάζεται να γίνει συνδιασμός ανεμογεννητριών αφού είναι μικρός αριθμός.

Nordic Windpower's N1000 1MW

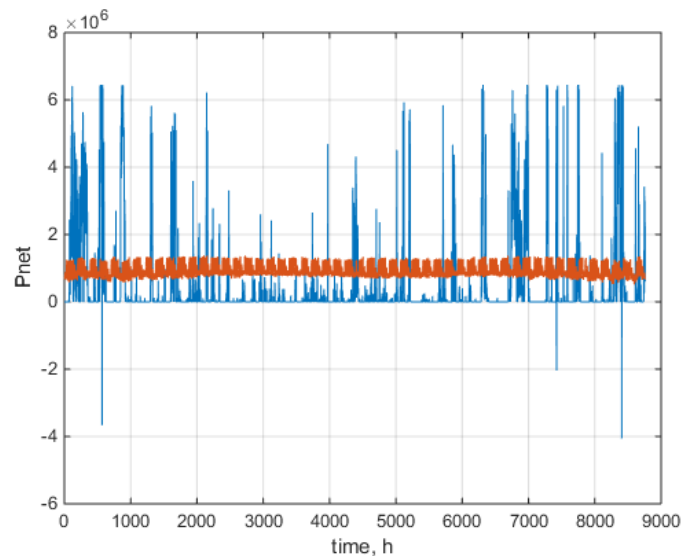
Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 13.7 ,αρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 13.4MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



Διαγραμμα 4.25 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Ρεαλιστικά δεν μπορεί να γίνει εγκατάσταση των 13.7 ανεμογεννητριών 1 MW οπότε θα γίνει συνδιασμός ανεμογεννητριών. Θα χρησιμοποιηθούν 13 ανεμογεννήτριες των 1 MW και μία ανεμογεννήτρια 0.5 MW. Έτσι το P_{net} ελαχιστοποιείται σε -14781.2 από 20171.04 που θα ήταν για 14 ανεμογεννήτριες ή -50122 για 13. Το νέο διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω

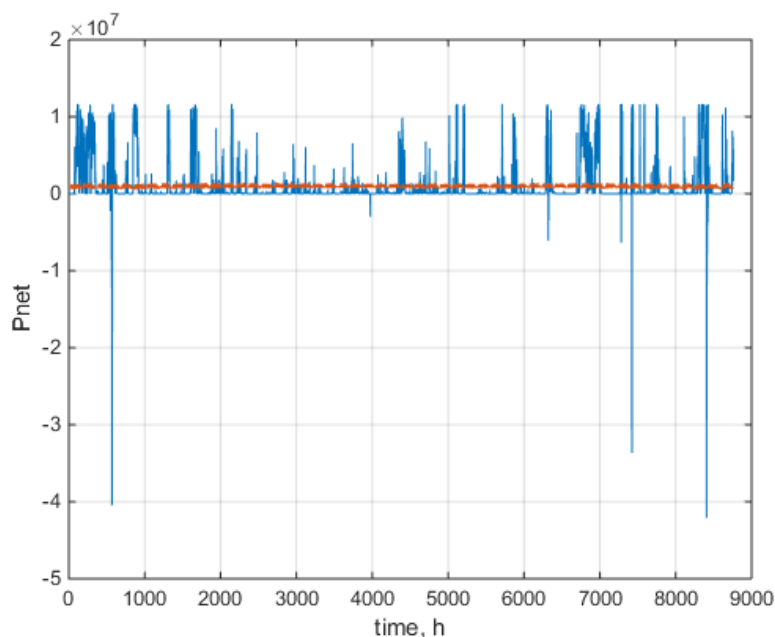


Διαγραμμα 4.26 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών*

SIEMENS SWT-2.3-101

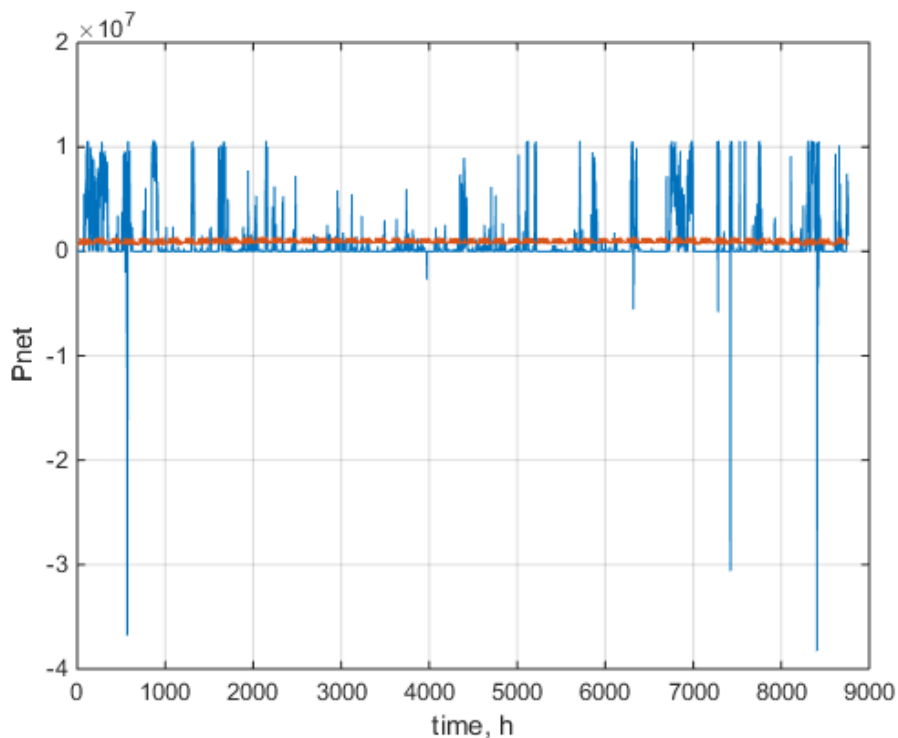
Χρησιμοποιώντας το εξακριβωμένο μοντέλο (validated) του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον matlab, ο βέλτιστος αριθμός ανεμογεννητριών βάση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγώμενου φορτίου είναι 5.52, άρα το πλάνο του αιολικού πάρκου θα φτάνει τα 12,6 MW.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 4.27 *Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών*

Ρεαλιστικά δεν μπορεί να γίνει εγκατάσταση των 5.5 ανεμογεννητριών 2.3MW οπότε θα γίνει συνδυασμός ανεμογεννητριών.Θα χρησιμοποιηθούν 5 ανεμογεννήτριες των 2.3 MW και μία ανεμογεννήτρια 1 MW.Έτσι το Pnet ελαχιστοποιείται σε -21185.6 kW απο -91478 που θα ήταν για 5 ανεμογεννήτριες ή 83011.92 για 6. Το νέο διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 4.28 Ενεργειακή ζήτηση και παραγωγή ενέργειας ανεμογεννητριών

Πίνακας Βελτιστων αποτελεσμάτων διαστασιολόγησης

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης μεγάλων ανεμογεννητριών

	VESTAS V-39 500KW	Nordic Windpower's N1000 1MW	SIEMENS SWT-2.3- 101
Αριθμός W/G	27	13 +1*0.5MW	5 +1*1MW
Συνολική ισχύς WGP	13.5MW.	13.5MW	12.5MW
Pnet	9729.25 W	-14781.2 W	-21185.6 W

Κεφάλαιο 5°

Συμπεράσματα

Συνοπτικά στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός αιολικού πάρκου για διάφορα ενεργειακά προφίλ διαφορετικών ενεργειακών απαιτήσεων και διάφορες ανεμογεννήτριες, καθώς και η προσομοίωση του. Αρχικά, έγινε μια εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών όπως και στη λειτουργία τους. Έν συνεχεία, παρουσιάστηκαν κάποιες σχετικές βιβλιογραφίες οι οποίες αφορούν την διαστασιολόγηση αιολικού πάρκου, φωτοβολταϊκού και συνδυασμός των δύο (υβριδικού), με διάφορες μεθόδους επίλυσης. Οι μέθοδοι επίλυσης διαφέρουν στο μαθηματικό μοντέλο προσέγγισης της παραγόμενης ενέργειας, στις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και στην μέθοδο βελτιστοποίησης. Επιπλέον, αναπτύχθηκε το μαθηματικό μοντέλο για την προσέγγιση της παραγόμενης ισχύος από τις επιλεγμένες ανεμογεννήτριες προς μελέτη, και ακολούθησε ο έλεγχος των αποτελεσμάτων του μοντέλου συγκριτικά με τις εργοστασιακές προδιαγραφές των ανεμογεννητριών. Έπειτα, εφαρμόζοντας την βελτιστοποίηση για τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν και ξεκινώντας με το ενεργειακό προφίλ του σπιτιού για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του αιολικού πάρκου προκύπτουν 9 ανεμογεννήτριες των 1500W με $P_{net} = - 0.03854W$ αποτέλεσμα αποδεκτό για ημερήσια απαιτούμενη ενέργεια 1.09 kW (ή 1090 W)..Παρακάτω , για το σούπερ μάρκετ η βελτιστή λύση είναι 5 ανεμογεννήτριες των 0.5 MW με έλλειμμα ενέργειας $P_{net} = - 5769W$ αποτέλεσμα αποδεκτό για 182Kw (ή 182.000W) ημερησίως και τέλος για το νοσοκομείο οι 27 ανεμογεννήτριες των 0,5W καλύπτουν τις ενεργειακές απαιτήσεις με πλεόνασμα ενέργειας $P_{net} = 9729.25W$ για ημερήσια κατανάλωση ενέργειας 963Kw (ή 963.000 W).

Μελλοντικά βήματα:

- Συνδιασμός ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάνελ η και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και διαφορετικός αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση όπως ο Γενετικός Αλγόριθμος η και για επαλήθευση των αποτελεσμάτων.
- Πρόσθεση παραμέτρου το κόστος κάθε ανεμογεννήτριας στην βέλτιστη λύση.
- Πραγματοποίηση μιας τεχνο-οικονομικής μελέτης για την πρόβλεψη του νεκρού σημείου (ή σημείου αποσβεσης).
- Πραγματοποίηση μελέτης αιολικού δυναμικού στο σημείο εγκατάστασης καθώς και αξιολόγηση του γεωλογικού υπόβαθρου.
- Πραγματοποίηση μελέτης των νομικών θεσμών και αδειών για την υλοποίηση και χρηματοδότηση του αιολικού πάρκου.
- Η συγκέντρωση μιάς εξειδικευμένης ομάδας για την υλοποίηση του έργου.(πολιτικός ,μηχανικός , μηχανολόγος μηχανικός , γεωλόγος μηχανικός, τοπογράφος ,κατασκευαστής ,οικονομικός σύμβουλος, νομικός σύμβουλος)

Βιβλιογραφία

- [1] A.Kaabeche,M.Belhamel,R.Ibtiouen," Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system"
- [2] Diaf, S., Belhamel, M., Haddadi, M., & Louche, A. (2008). Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island. *Energy Policy*, 36(2), 743–754. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2007.10.028>
- [3] Prasad, A. R., & Natarajan, E. (2006). Optimization of integrated photovoltaic–wind power generation systems with battery storage. *Energy*, 31(12), 1943–1954. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2005.10.032>
- [4] Molina Gómez, A., Morozovska, K., Laneryd, T., & Hilber, P. (2022). Optimal sizing of the wind farm and wind farm transformer using MILP and dynamic transformer rating. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136, 107645. <https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2021.107645>
- [5] The European Wind Energy Association, Wind energy frequently asked questions, EWEA (Feb 2019). URL <http://www.ewea.org/wind-energy-basics/faq/>
- [6] O. Vågerö, Quota system (2019). <http://www.res-legal.eu/search-by-country/sweden/single/s/res-e/t/promotion/aid/quota-system-1/lastp/199>
- [7] Yuan, Q., Zhou, K., & Yao, J. (2020). A new measure of wind power variability with implications for the optimal sizing of standalone wind power systems. *Renewable Energy*, 150, 538–549. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.12.121>
- [8] Li, H., Campana, P. E., Tan, Y., & Yan, J. (2018). Feasibility study about using a stand-alone wind power driven heat pump for space heating. *Applied Energy*, 228, 1486–1498. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.06.146>
- [9] Lujano-Rojas, J. M., Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. L. (2012). Optimal sizing of small wind/battery systems considering the DC bus voltage stability effect on energy capture, wind speed variability, and load uncertainty. *Applied Energy*, 93, 404–412. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.12.035>
- [10] Zhao, B., Zhang, X., Li, P., Wang, K., Xue, M., & Wang, C. (2014). Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island. *Applied Energy*, 113, 1656–1666. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.09.015>
- [11] L.Abouzahr, R.Ramakumar. Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems: A closed form solution approach,IEEE Trans Energy Convers.5(1990) page 445-452.
- [12] Hashem, M., Abdel-Salam, M., El-Mohandes, M. T., Nayel, M., & Ebeed, M. (2021). Optimal Placement and Sizing of Wind Turbine Generators and Superconducting Magnetic Energy Storages in a Distribution System. *Journal of Energy Storage*, 38, 102497. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102497>
- [13] Sfikas, E. E., Katsigiannis, Y. A., & Georgilakis, P. S. (2015). Simultaneous capacity optimization of distributed generation and storage in medium voltage microgrids.

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 67, 101–113.
<https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2014.11.009>

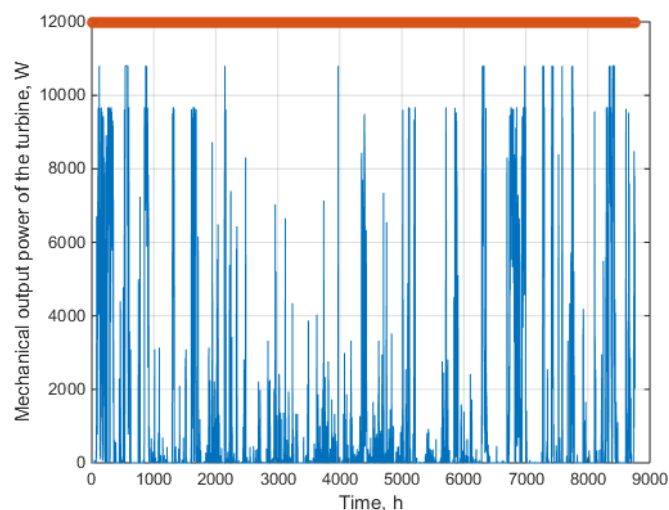
- [14] Ahmed, A., Nadeem, M. F., Sajjad, I. A., Bo, R., Khan, I. A., & Raza, A. (2020). Probabilistic generation model for optimal allocation of wind DG in distribution systems with time varying load models. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 22, 100358. <https://doi.org/10.1016/J.SEGAN.2020.100358>
- [15] Hung, D. Q., Mithulananthan, N., & Bansal, R. C. (2013). Analytical strategies for renewable distributed generation integration considering energy loss minimization. *Applied Energy*, 105, 75–85. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.12.023>
- [16] Diaf, S., Diaf, D., Belhamel, M., Haddadi, M., & Louche, A. (2007). A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy*, 35(11), 5708–5718. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2007.06.020>
- [17] Kellogg, W., Nehrir, M. H., Venkataramanan, G., & Gerez, V. (1996). Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system. *Electric Power Systems Research*, 39(1), 35–38. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(96\)01096-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(96)01096-6)
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.03.027>
- [18] Chedid, R., Saliba, Y., 1996. Optimization and control of autonomous renewable energy systems. *International Journal of Energy Research* 20, 609–624.
- [19] Akai, T.J., 1994. *Applied Numerical Methods for Engineers*, second ed. Wiley, New York
- [20] Roy, A., Kedare, S. B., & Bandyopadhyay, S. (2010). Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty. *Applied Energy*, 87(8), 2712–2727.
- [21] Notton G, Muselli M, Poggi P, Louche L. Decentralized wind energy systems providing small electrical loads in remote areas. *Int J Energy Res* 2001;25:141–64.
- [22] Powell, W. R. (1981). An analytical expression for the average output power of a wind machine. *Solar Energy*, 26(1), 77–80. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90114-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90114-6)
- [23] Wilson RE, Lissaman PBS. *Applied aerodynamics of wind power machines*. Oregon State University: Corvallis; 1974
- [24] Siegfried, H., *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [25] Senjyu, T., Ochi, Y., Kikunaga, Y., Tokudome, M., Yona, A., Muhando, E.B., Urasaki, N., Funabashi, T., Sensor-less maximum power point tracking control for wind generation system with squirrel cage induction generator, *Renewable Energy*, Volume 34 (4), 2009, pp. 994-999
- [26] Camblong, H., *Digital robust control of a variable speed pitch regulated wind turbine for above rated wind speeds*, *Control Engineering Practice*, Volume 16 (8), 2008, pp. 946-958

Παράρτημα

Στο κομμάτι αυτό της διπλωματικής θα παρουσιαστούν αποτελέσματα απο το κεφάλαιο 4 τα οποία είναι επαναλαμβανόμενα.

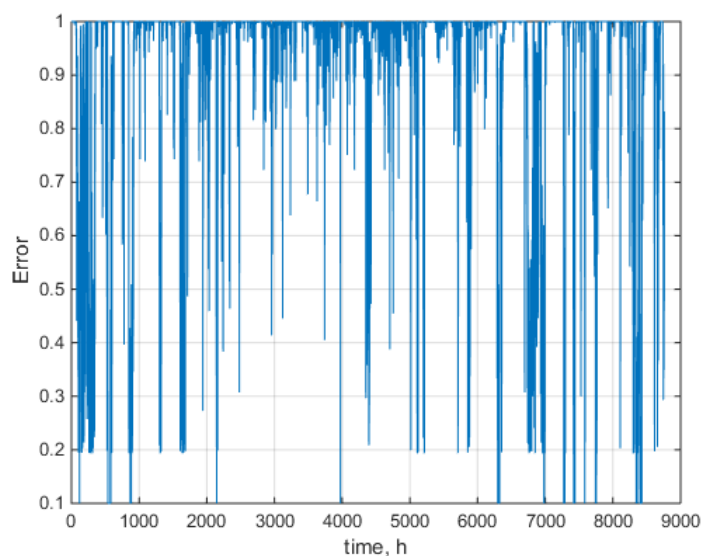
Π1 Ενεργειακο προφίλ σπιτιού

Ανεμογεννήτρια 800w



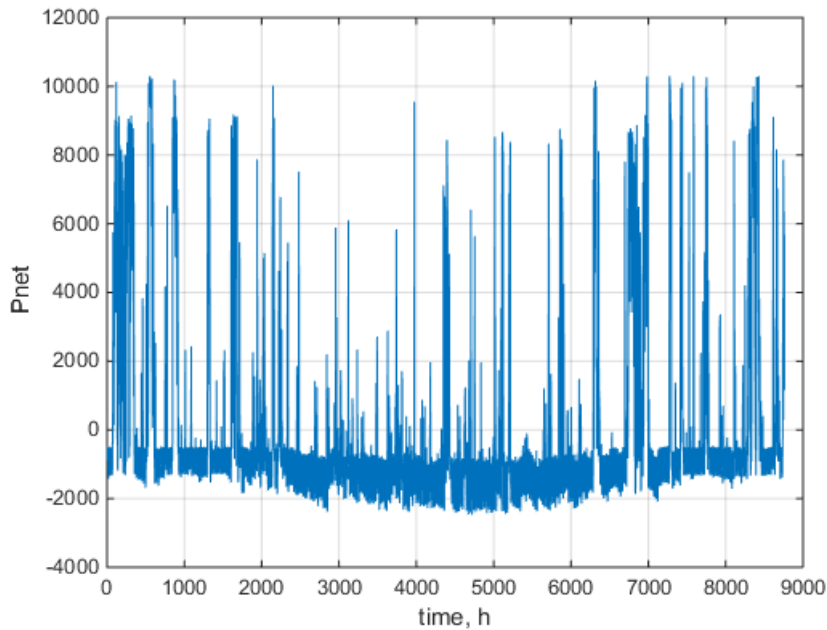
Διάγραμμα Π1 Μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας 800W.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η παραγόμενη ισχύς απο την επιλεγμένη ανεμογεννήτρια 800W κατα τη διάρκεια ενός χρόνου με χρώμα μπλέ, ενώ με πορτοκαλί η μέγιστες προδιαγραφές ισχύος που έχει η συγκεκριμένη ανεμογεννητρια.



Διάγραμμα Π2 Σφάλμα

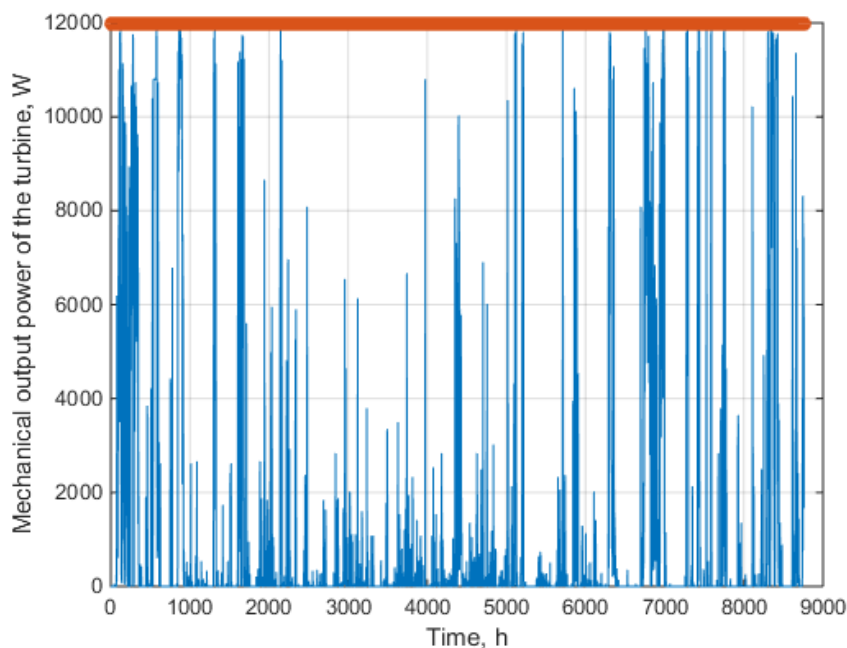
Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π2 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 800W.



Διάγραμμα Π3 Διαφορά ζήτησης και παροχής ενέργειας.

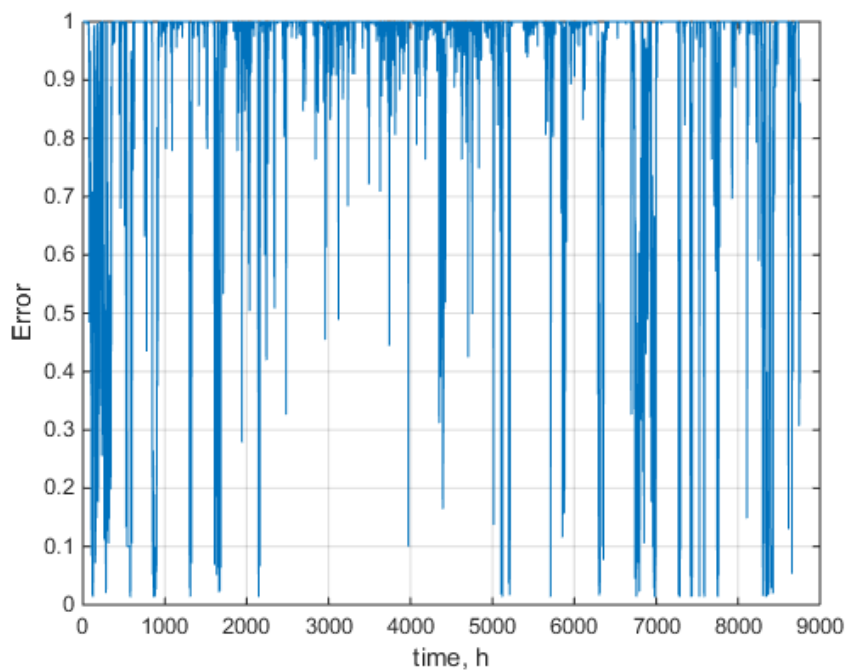
Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 15 ανεμογεννητριών 600W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net,avg} = -10.7007 \text{ kW}$.

Ανεμογεννήτρια 1000W



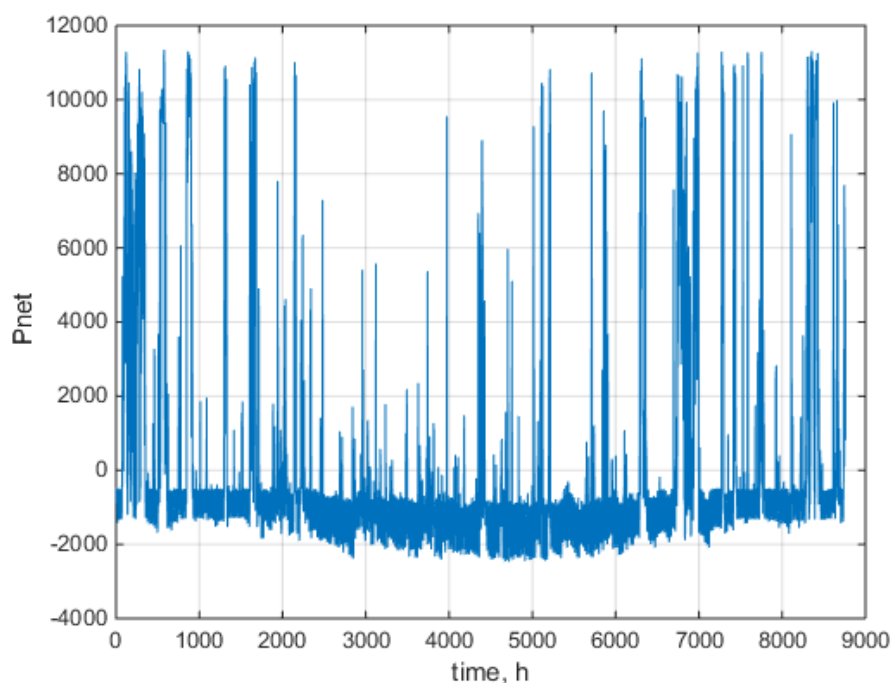
Διάγραμμα Π4 Μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας 1000W.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια ενός χρόνου με χρώμα μπλέ , ενώ με πορτοκαλί η μέγιστες προδιαγραφές ισχύος που έχει η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια.



Διαγραμμα Π5 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 4.1 και το διάγραμμα Π5 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 1000W.



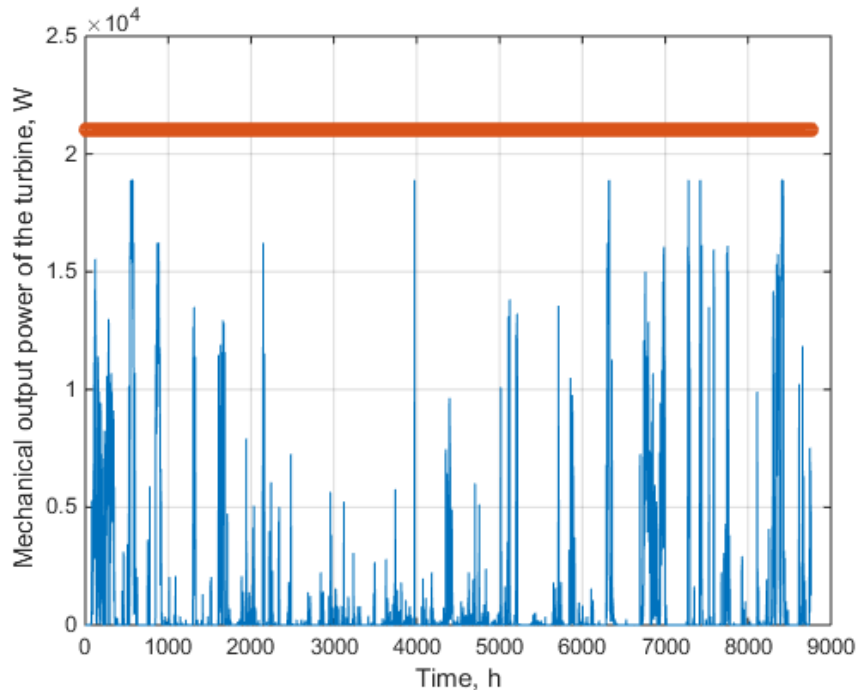
Διάγραμμα Π6 Διαφορά ζήτησης και παροχής ενέργειας.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 12 ανεμογεννητριών 1000W. Σκοπός είναι η

ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και απο το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net_{avg}} = -14.1158k$

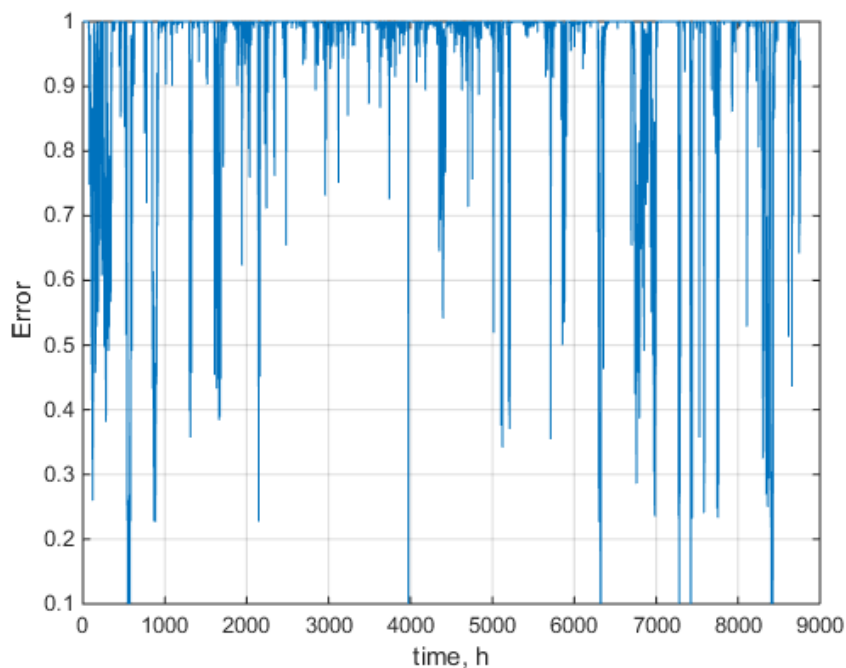
Ανεμογεννήτρια 1500W

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



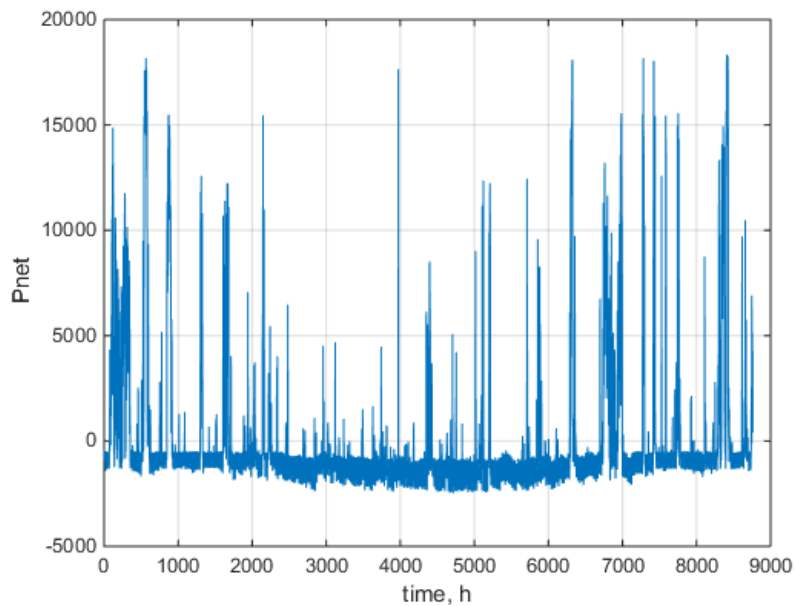
Διάγραμμα Π7 Μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας 1500W.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η παραγώμενη ισχύς την ανεμογεννήτρια 1500W κατά τη διάρκεια ενός χρόνου με χρώμα μπλέ , ενώ με πορτοκαλί η μέγιστες προδιαγραφές ισχύος που έχει η συγκεκριμένη ανεμογεννητρια.



Διάγραμμα Π8 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π8 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 1500W.

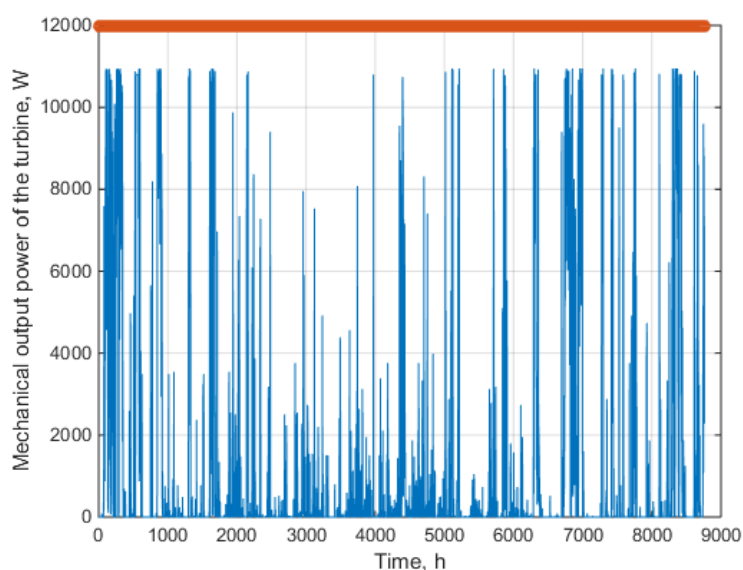


Διάγραμμα Π19 Διαφορά ζήτησης και παροχής ενέργειας.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 14 ανεμογεννητριών 1500W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net,avg} = -13.2328kW$.

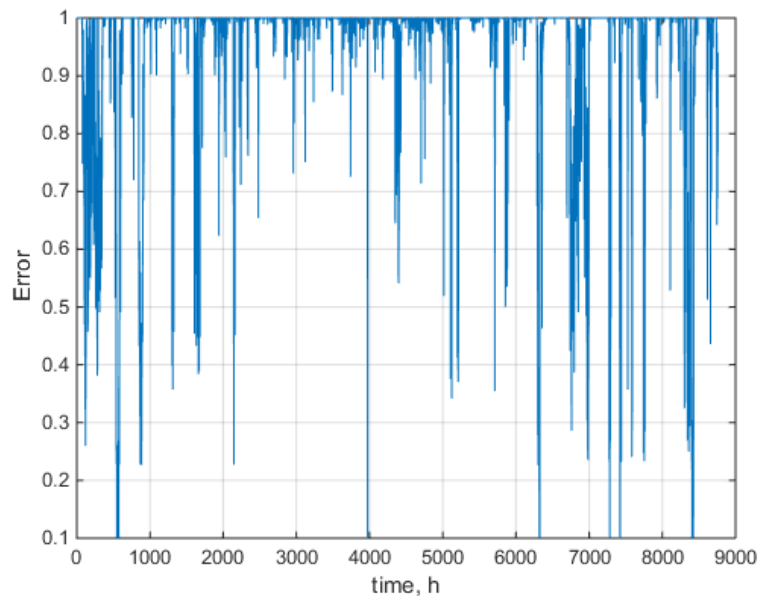
Ανεμογεννήτρια 2000W

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας καθώς και των αποτελεσμάτων.



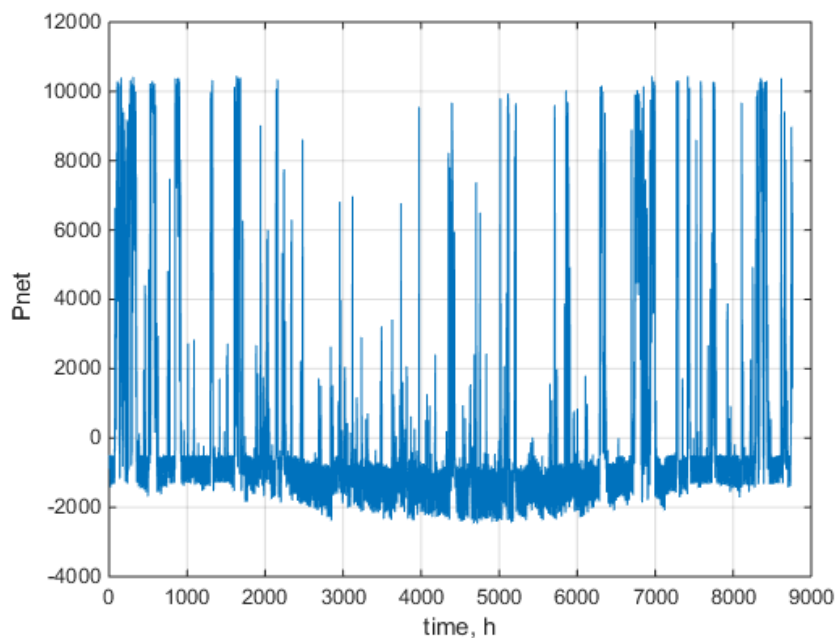
Διάγραμμα Π10 Μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας 2000W.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η παραγόμενη ισχύς απο την ανεμογεννήτρια 2000W κατα τη διάρκεια ενός χρόνου με χρώμα μπλέ , ενώ με πορτοκαλί η μέγιστες προδιαγραφές ισχύος που έχει η συγκεκριμένη ανεμογεννητρια.



Διαγραμμα Π11 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π11 εμφανίζεται το σφάλμα κατα τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 2000W.

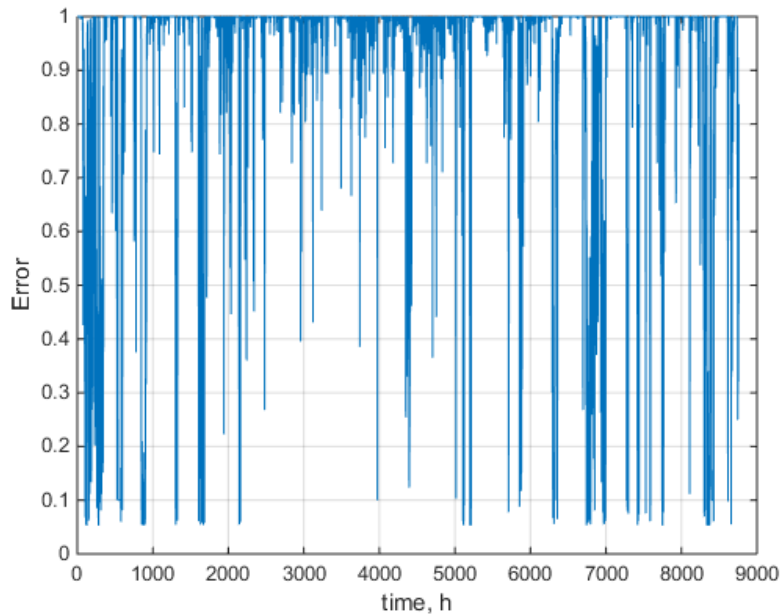


Διάγραμμα Π12 Διαφορά ζήτησης και παροχής ενέργειας.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο των 14 ανεμογεννητριών 1500W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και απο το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net,avg} = 111.942kW$ το οποίο είναι ένα αποδεκτό νούμερο για αυτή τη διαδικασία.

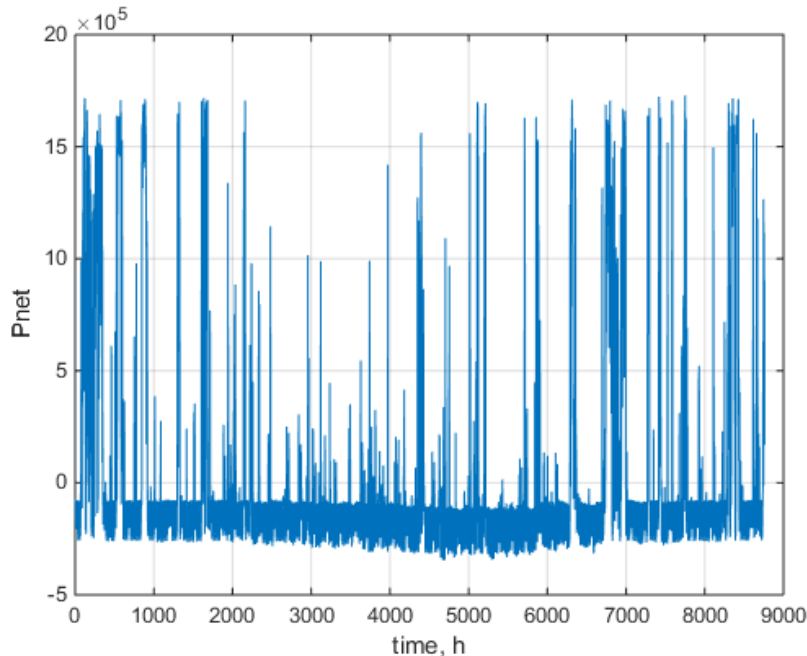
Π2 Ενεργειακό προφίλ σούπερ μάρκετ

Ανεμογεννήτρια 600W Wind Turbine, 12V/24V/48V



Διάγραμμα Π13 Σφάλμα

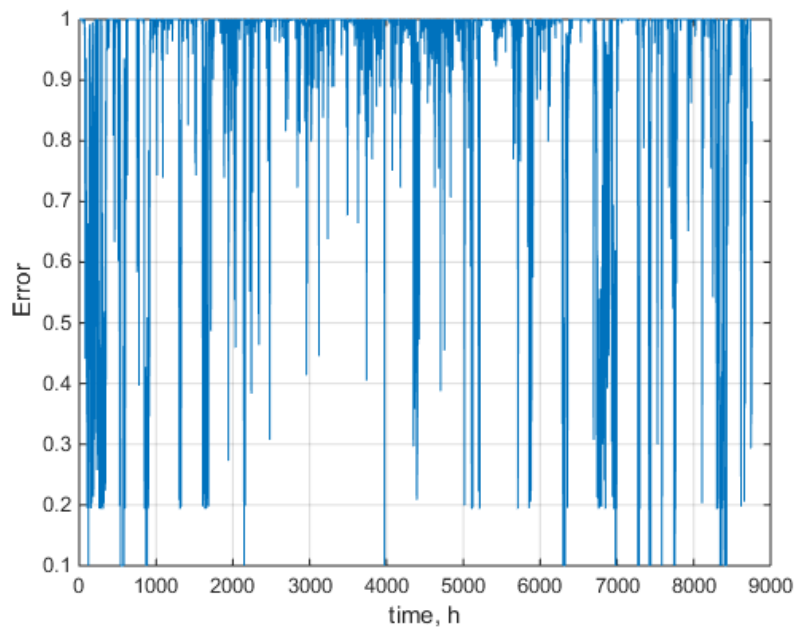
Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π13 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 600W.



Διάγραμμα Π14 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

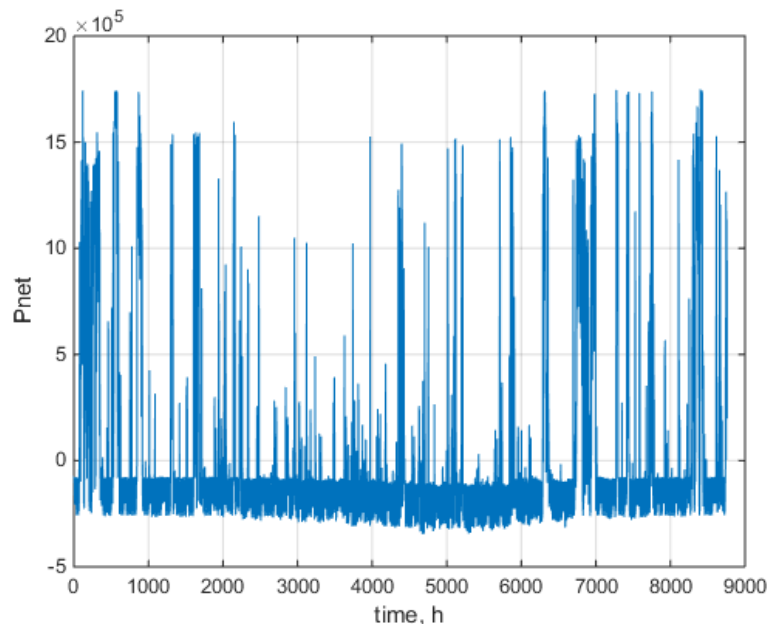
Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 3178.15 ανεμογεννητριών 600W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net,avg} = -0.04977kW \approx 0$ το οποίο είναι ένα αποδεκτό νούμερο για αυτή τη διαδικασία.

Ανεμογεννήτρια 800W



Διάγραμμα Π15 Σφάλμα

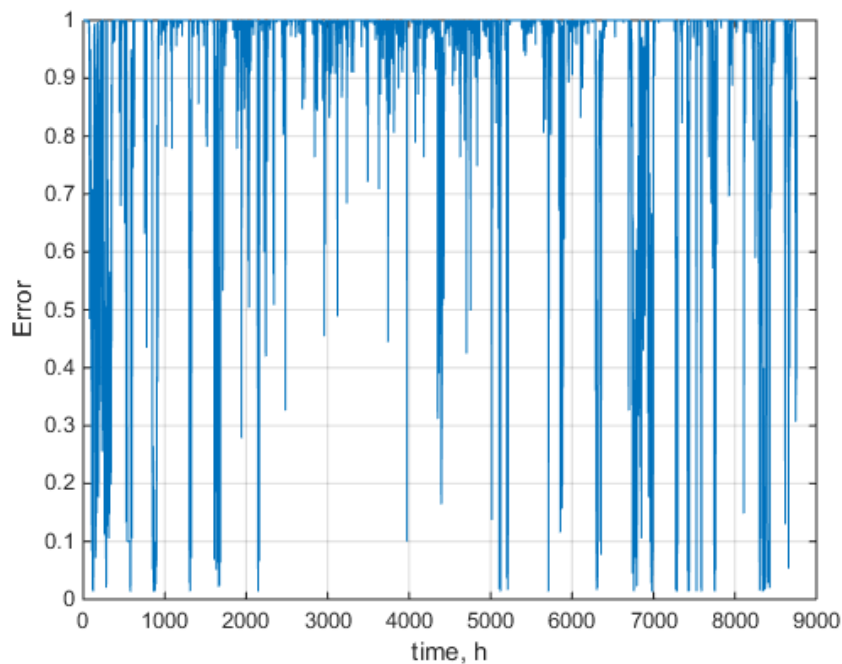
Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π15 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 800W.



Διάγραμμα Π16 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

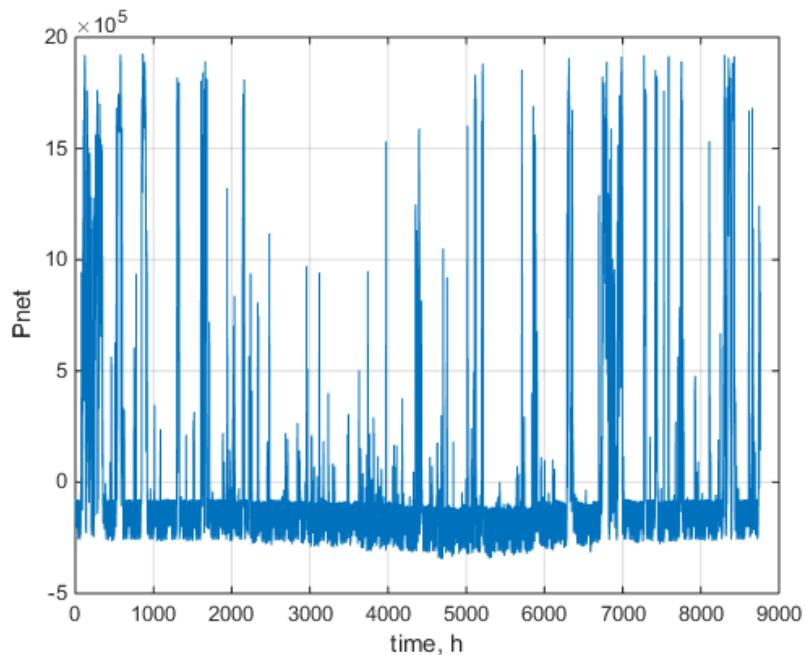
Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 2531.76 ανεμογεννητριών 800W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net_{avg}} = -0.11633 \text{ kW} \approx 0$.

Ανεμογεννήτρια 1000W



Διάγραμμα Π.17 Σφάλμα

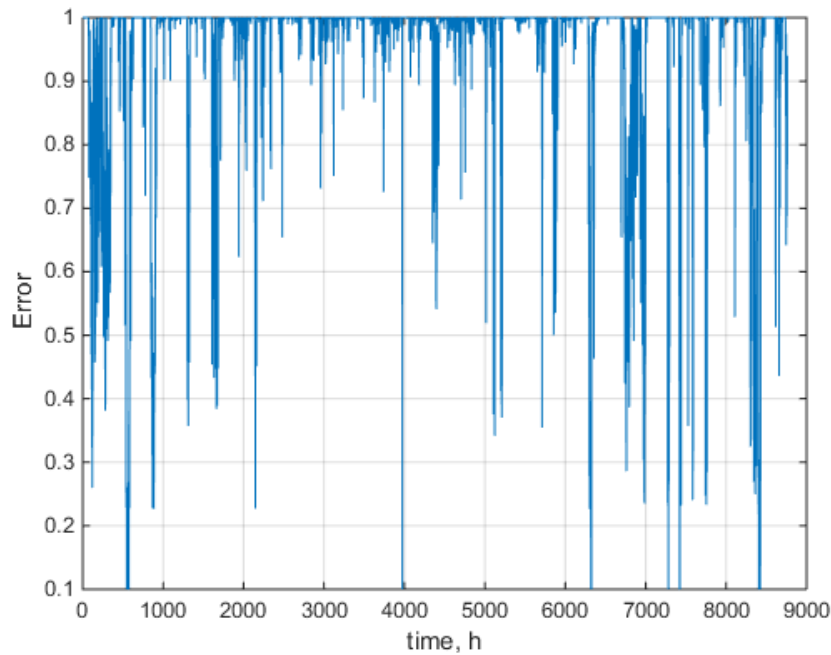
Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π.17 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 1000W.



Διάγραμμα Π18 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

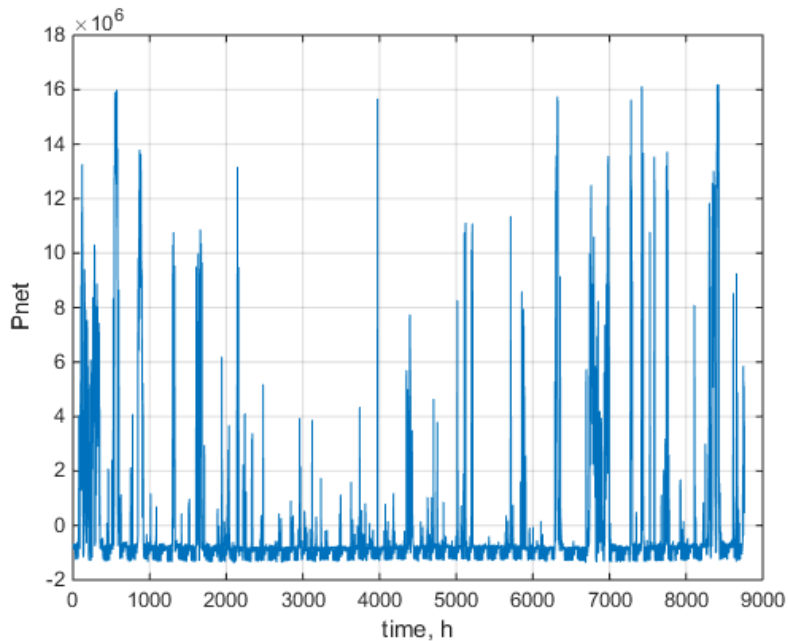
Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 2031.8 ανεμογεννητριών 1000W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net,avg} = -2.40418 \text{ kW}$.

Ανεμογεννήτρια 1500W



Διάγραμμα Π19 Σφάλμα

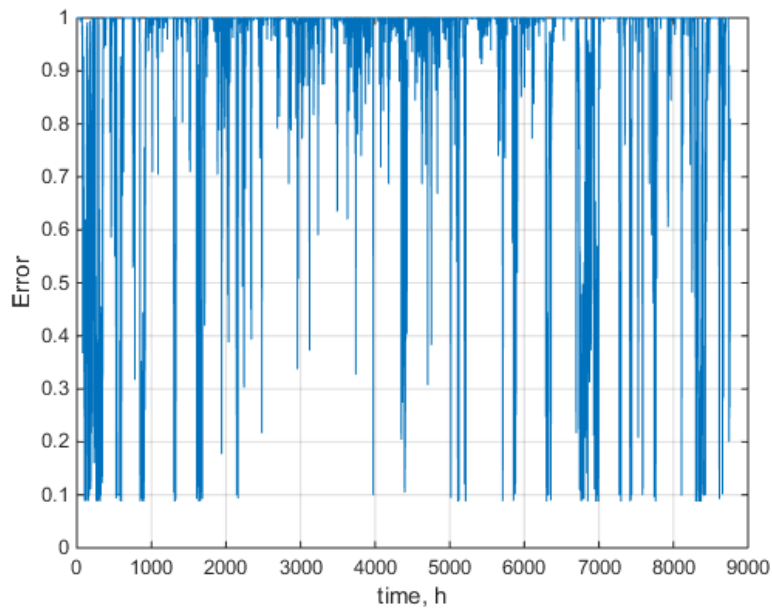
Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π19 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 1500W.



Διάγραμμα Π20 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

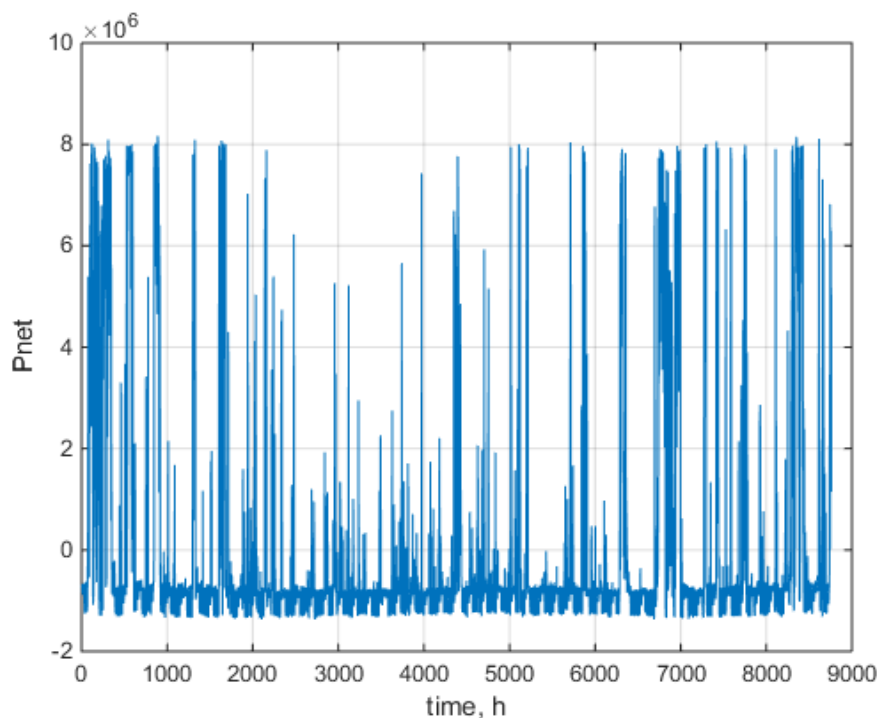
Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 12.510,08 ανεμογεννητριών 1500W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net,avg} -0.01155 \text{ kW}$.

Ανεμογεννήτρια 2000W



Διάγραμμα Π21 *Σφάλμα*

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π21 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 2000W.

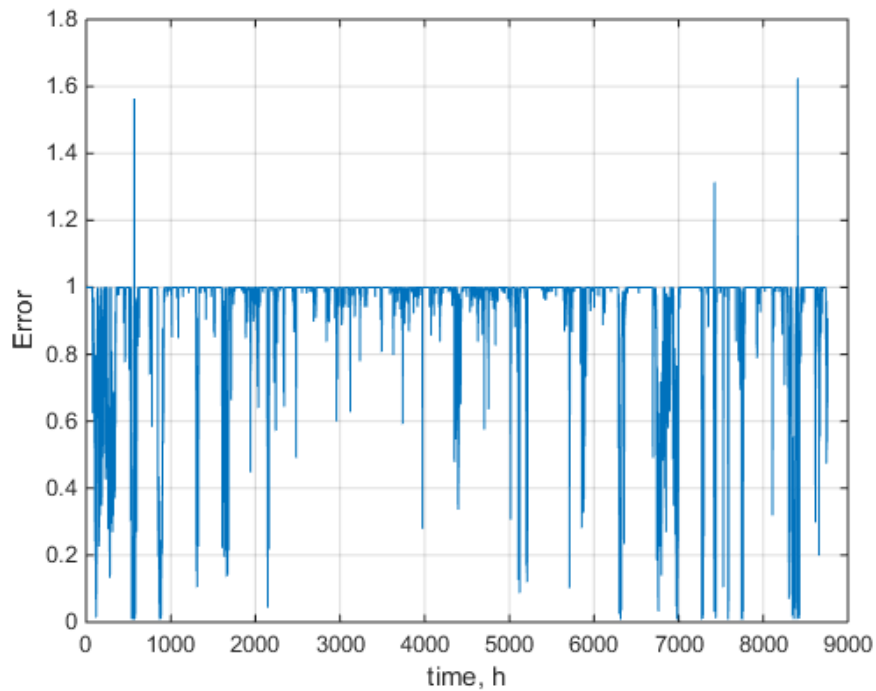


Διάγραμμα Π22 *Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.*

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 4804.01 ανεμογεννητριών 2000W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net_{avg}} = 0.00801 \text{ kW}$.

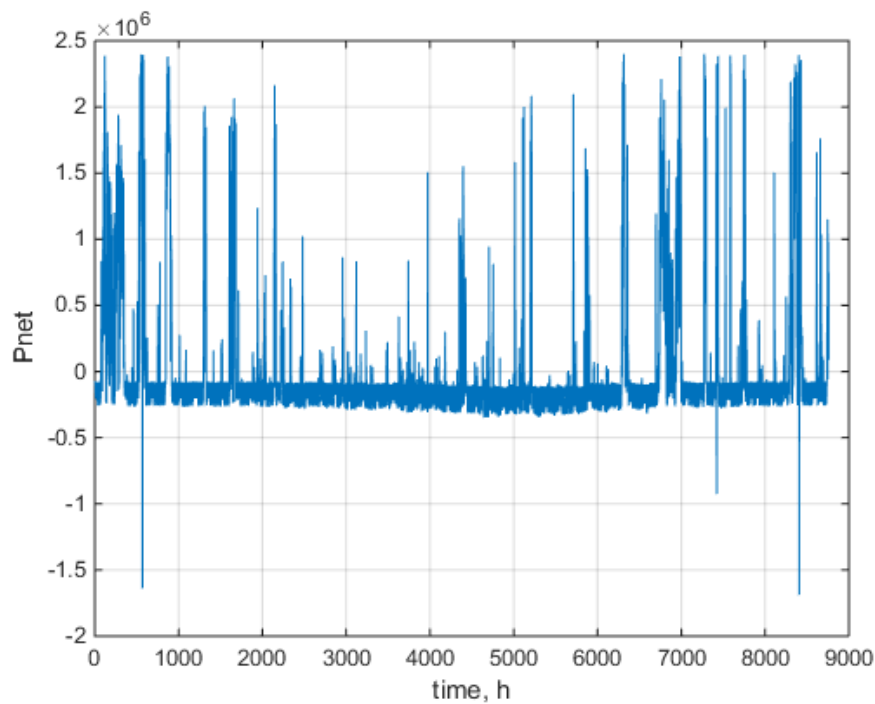
Ενεργειακό προφίλ σούπερ μάρκετ

VESTAS V-39 500KW



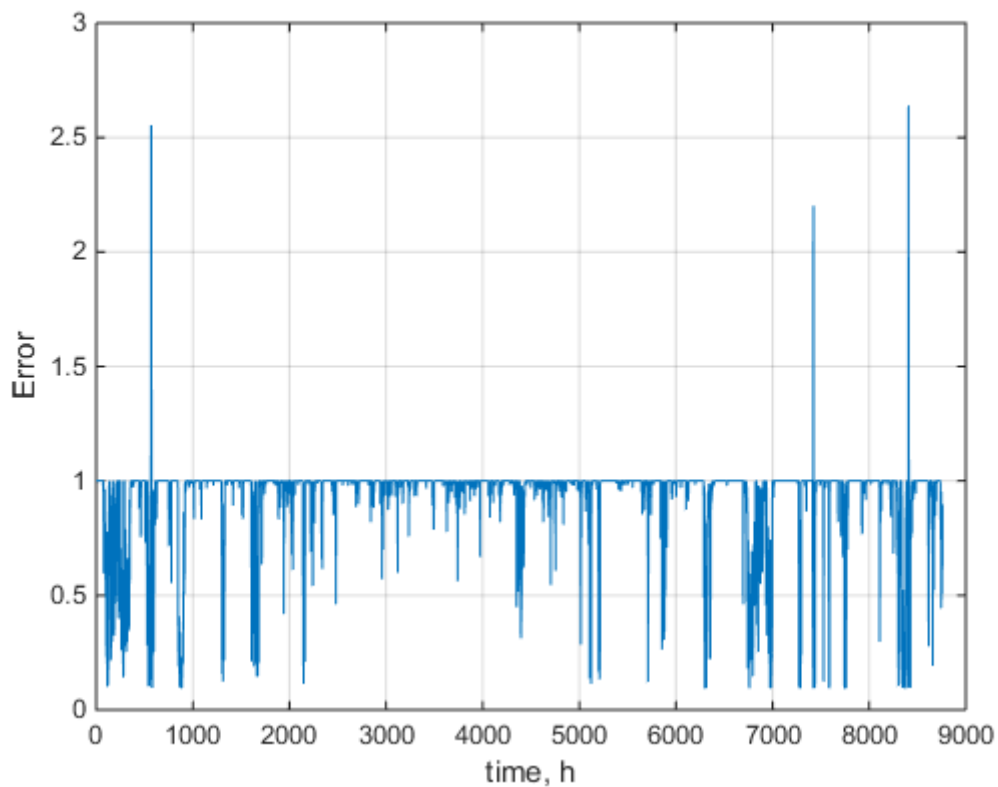
Διάγραμμα Π23 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π23 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 500kW.



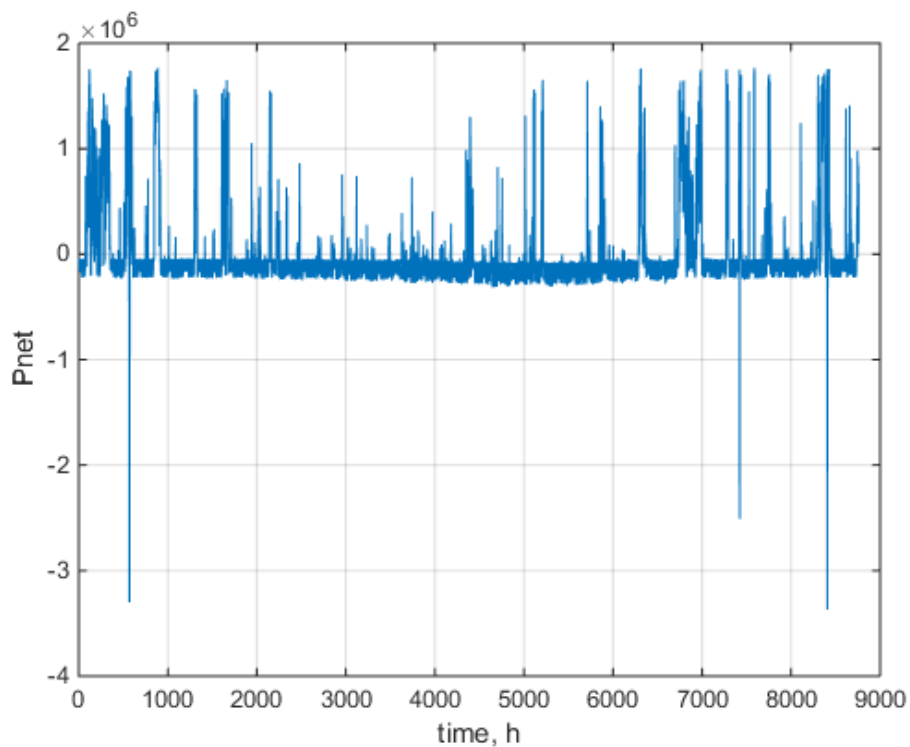
Διάγραμμα Π24 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

2 Nordic Windpower's N1000 1MW 1MW+ 1 VESTAS V-39 500KW

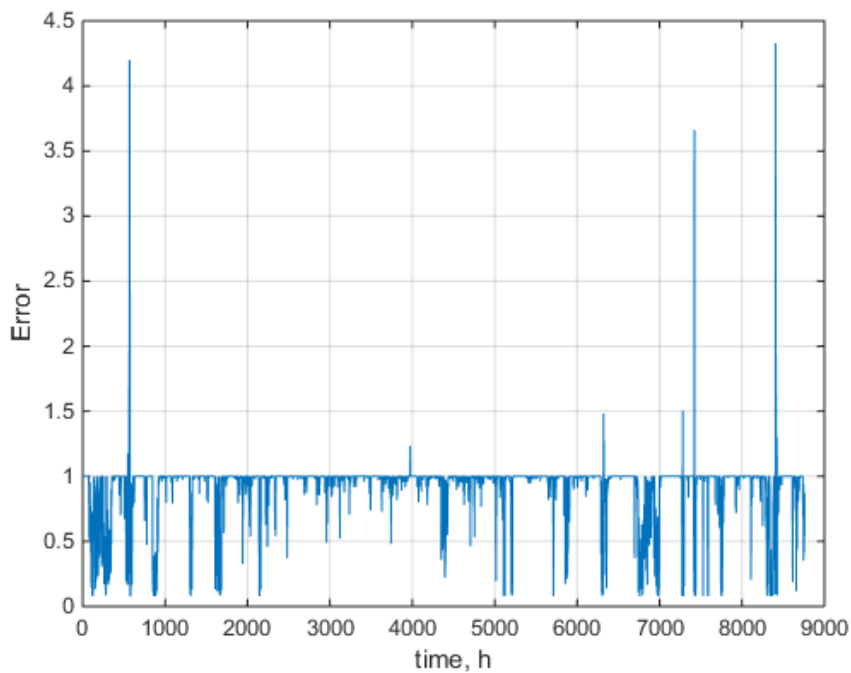


Διάγραμμα Π25 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π21 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για τις ανεμογεννήτριες 1MW και 0.5MW

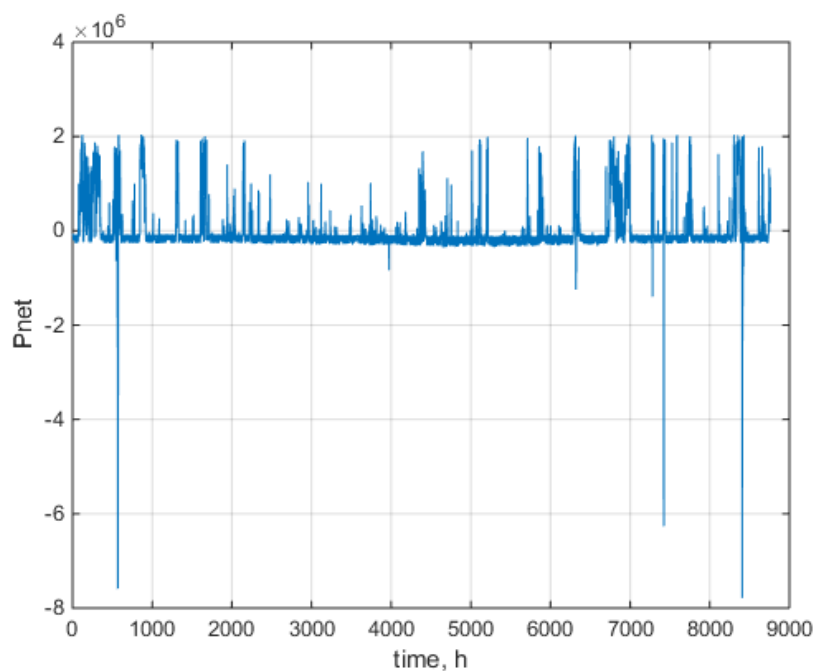


Διάγραμμα Π26 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα Π27 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π26 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 1MW.

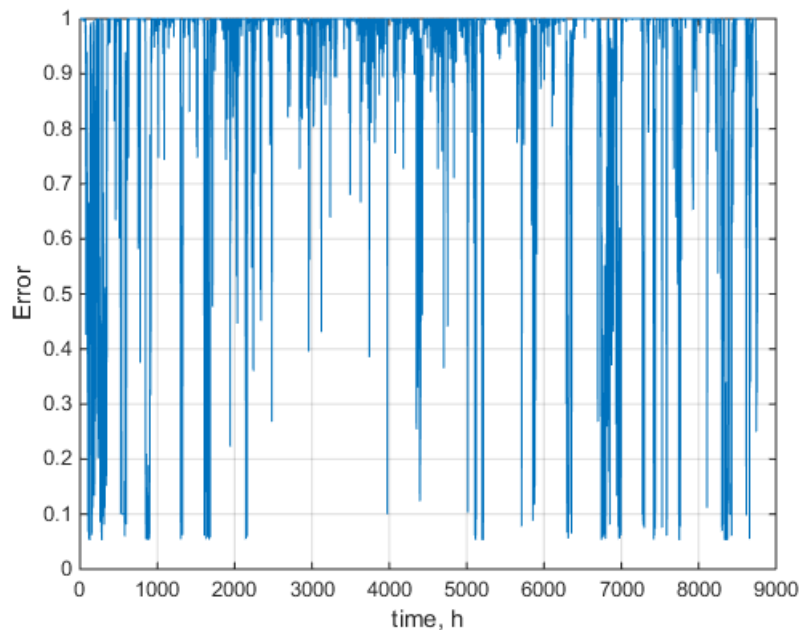


Διάγραμμα Π28 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

Π3 Ενεργειακό προφίλ νοσοκομείου

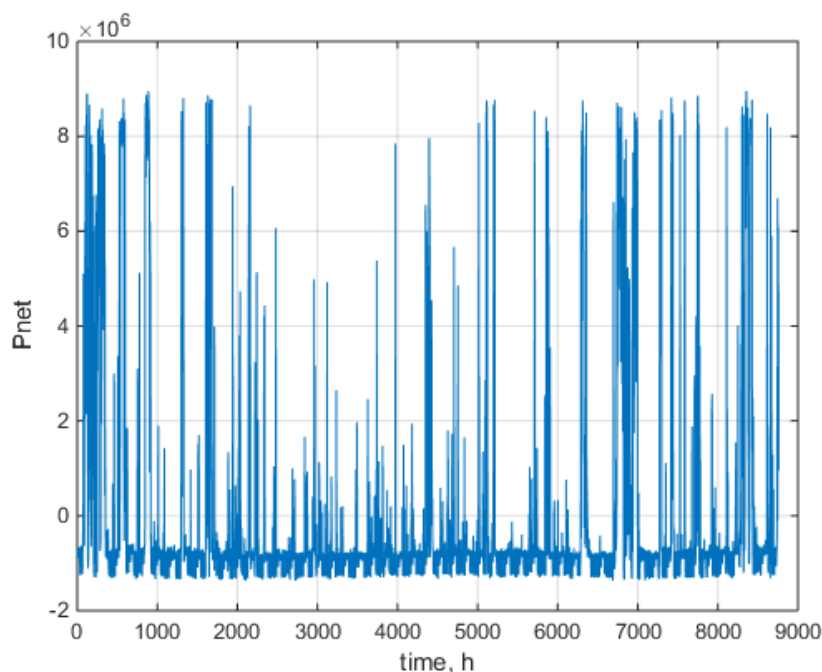
Ανεμογεννήτρια 600W Wind Turbine, 12V/24V/48V

Στο διάγραμμα 4.36 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 600W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του νοσοκομείου.



Διάγραμμα Π29 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π29 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 600W.

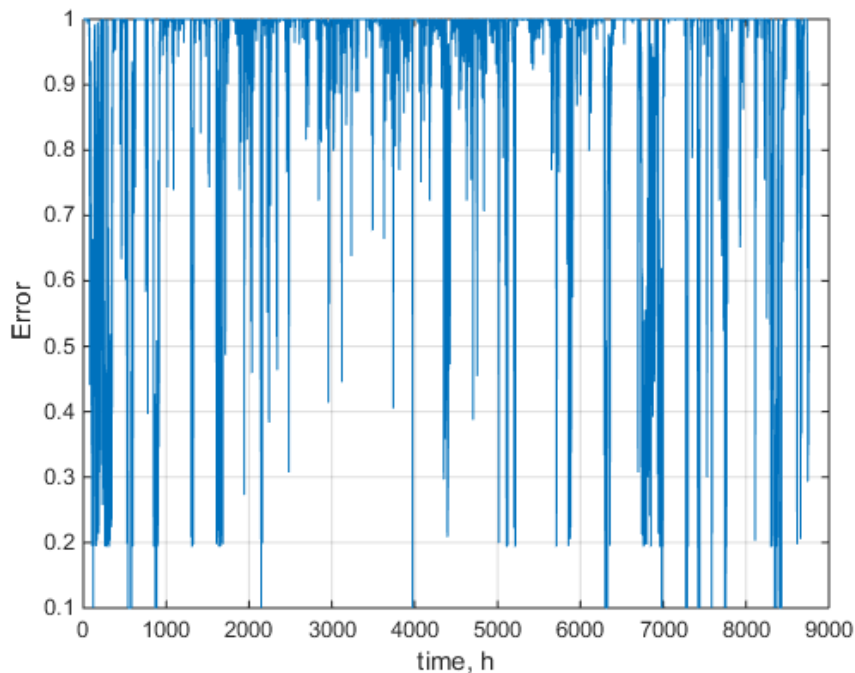


Διάγραμμα Π30 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας από το αιολικό πάρκο των 16.786.37 ανεμογεννητριών 600W. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net,avg} = -0.25544 \text{ kW}$.

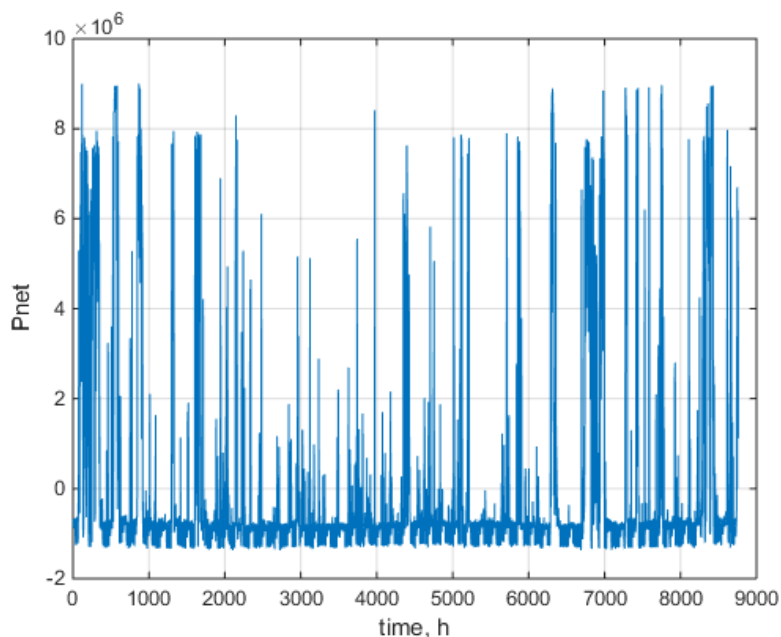
Ανεμογεννήτρια 800w - ATO-WT-800M5

Στο διάγραμμα 4.39 παρουσιάζεται με μπλέ χρώμα η ετήσια παραγωγή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών 800W και με πορτοκαλί χρώμα η ενεργειακή ζήτηση του νοσοκομείου.



Διάγραμμα Π31 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π31 εμφανίζεται το σφάλμα κατα τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 800W.

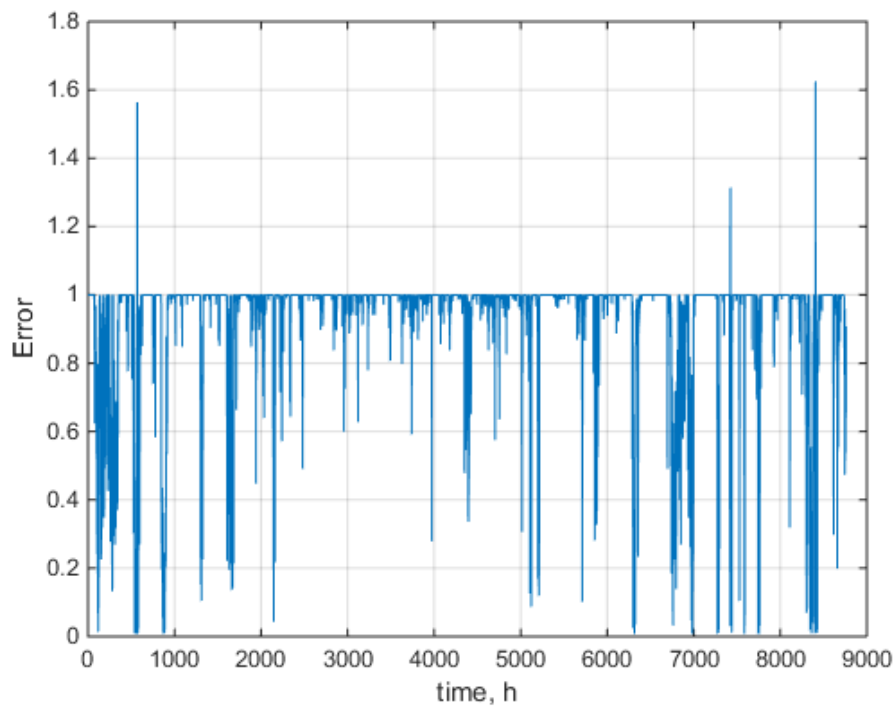


Διάγραμμα Π32 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η διαφορά της ζήτησης της ενέργειας με την παροχή ενέργειας απο το αιολικό πάρκο των 13.372,27 ανεμογεννητριών 800W.Σκοπός είναι η

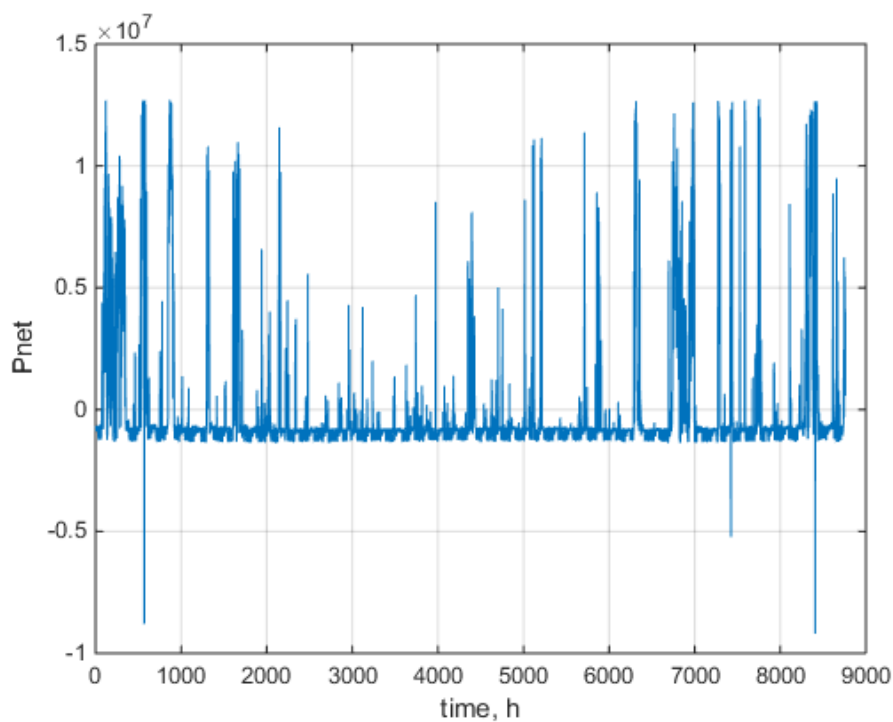
ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και απο το διάγραμμα φαίνεται πως έχει επιτευχθεί διότι οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0 με μέσο όρο $P_{net_{avg}} = -0.15812 \text{ W}$.

VESTAS V-39 500KW



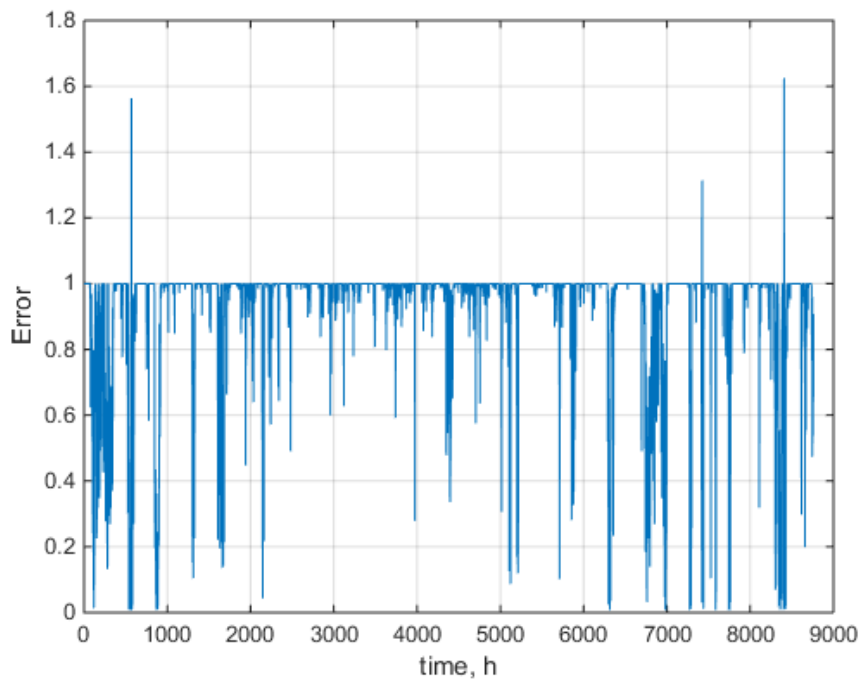
Διάγραμμα Π33 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π33 εμφανίζεται το σφάλμα κατα τη διάρκεια ενός έτους για την ανεμογεννήτρια 500kW.



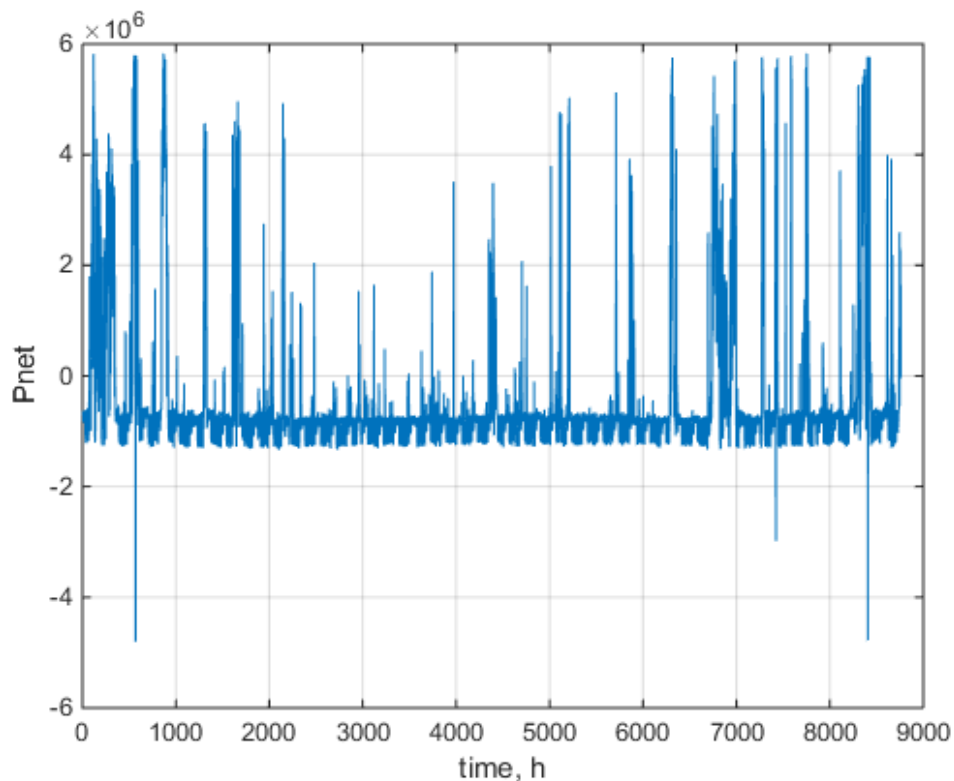
**Διάγραμμα Π34 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας
ανεμογεννήτριας.**

13 Nordic Windpower's N1000 1MW + 1 VESTAS V-39 500KW



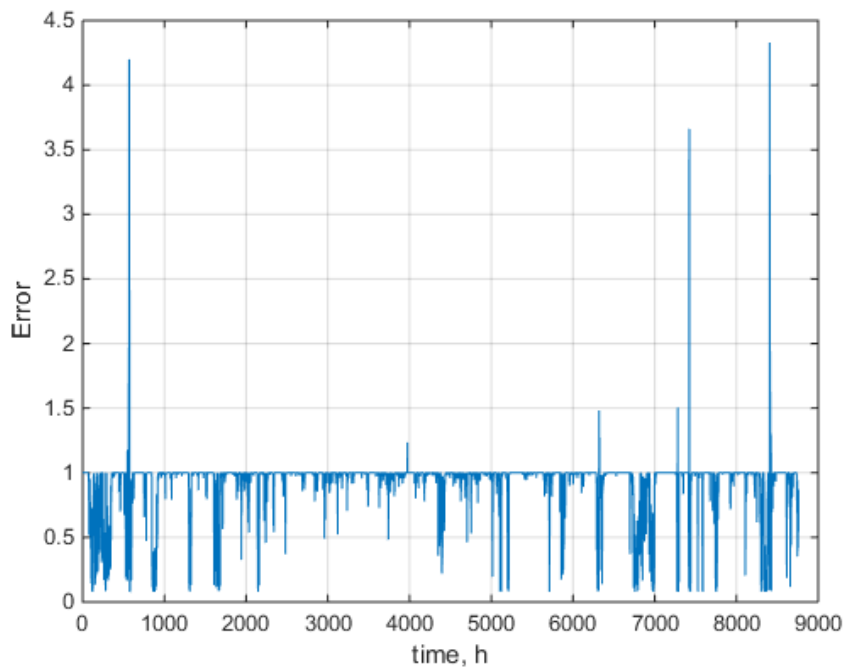
Διάγραμμα Π35 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π35 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για τις 13 ανεμογεννήτριες των 1MW και μία 0.5 MW.



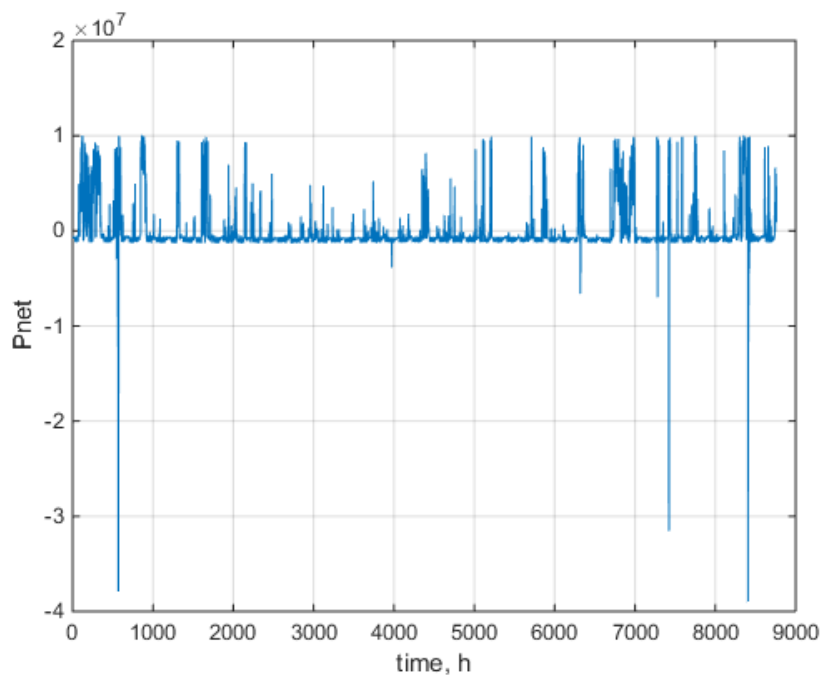
Διάγραμμα Π36 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.

5 SIEMENS SWT-2.3-101+ Nordic Windpower's N1000 1MW



Διάγραμμα Π37 Σφάλμα

Η εξίσωση που υπολογίζεται το σφάλμα είναι η 5.1 και το διάγραμμα Π37 εμφανίζεται το σφάλμα κατά τη διάρκεια ενός έτους για τον συνδιασμό ανεμογεννητριών .



Διάγραμμα Π38 Διαφορά ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας.