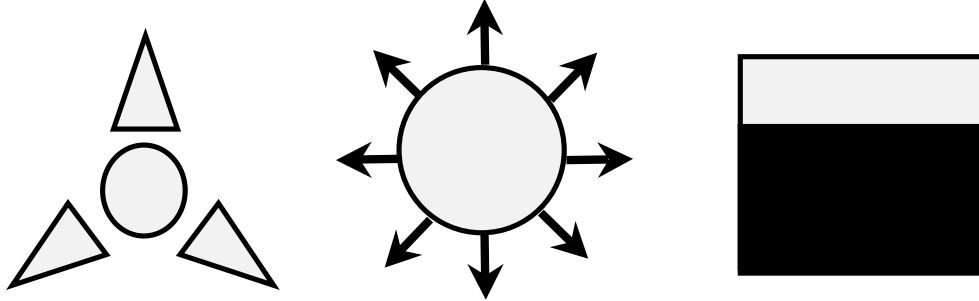




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

*Στοχαστική προσομοίωση και βελτιστοποίηση
υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας*



Ιωάννου Χρήστος

Επιβλέπων: Κουτσογιάννης Δημήτρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα
Οκτώβριος 2012

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Δημήτριο Κουτσογιάννη ο οποίος ήταν και ο επιβλέπων καθηγητής της παρούσας εργασίας. Η καθοδήγηση του ήταν πολύτιμη, όπως και ο χρόνος του που με γενναιοδωρία μου προσέφερε. Η συνεργασία μου μαζί του νιώθω πως με ωφέλησε ως επιστήμονα αλλά και ως άνθρωπο.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Νίκο Μαμάση για την βοήθεια του συμβουλευόντας με αλλά και παρέχοντας πολύτιμα εργαλεία. Η συμβολή του ήταν καταλυτική για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής.

Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Αντρέα Ευστρατιάδη για τα εύστοχα σχόλια και παρατηρήσεις του που υπήρξαν πολύ χρήσιμα.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον φίλο μου Γιώργο Τσεκούρα από την διπλωματική του οποίου αντλήθηκαν απαραίτητα στοιχεία. Αφιέρωσε πολύ χρόνο – πέρα από τα όρια της δικιάς του εργασίας - ώστε να καταστεί αυτό δυνατό.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη	v
Abstract.....	vii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενική τοποθέτηση	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας	2
1.3 Διάρθρωση της εργασίας	3
2 Εισαγωγή στα υβριδικά συστήματα.....	7
3 Τοποθέτηση του προβλήματος σχεδιασμού υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας.....	13
3.1 Περιγραφή και ανάλυση της προσέγγισης του προβλήματος σχεδιασμού.....	13
3.2 Πιλοτική εφαρμογή.....	17
3.3 Σύμβολα	17
4 Συνθετικές χρονοσειρές ζήτησης ενέργειας	19
4.1 Εισαγωγή.....	19
4.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	19
4.3 Δημιουργία συνθετικής χρονοσειράς ζήτησης ενέργειας	20
5 Συνθετικές χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιακής ακτινοβολίας	23
6 Αιολική ενέργεια	27
6.1 Εισαγωγή.....	27
6.2 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας και συντελεστής ισχύος.....	28
6.3 Υπολογισμός ταχύτητας ανέμου στο ύψος τοποθέτησης	31
6.4 Διερεύνηση της επιρροής του χρονικού βήματος στον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας.....	32
6.5 Διερεύνηση της μεταβολής των στατιστικών χαρακτηριστικών της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας	34
6.5.1 Μέση τιμή.....	35
6.5.2 Τυπική απόκλιση	35
6.5.3 Ασυμμετρία.....	36
6.6 Υπολογισμός της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας	36
7 Ηλιακή ενέργεια	41
7.1 Εισαγωγή.....	41
7.2 Υπολογισμός εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας	42
7.3 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους	44
7.4 Υπολογισμός της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας	45
8 Υδροηλεκτρική ενέργεια και ταμιευτήρες	47
8.1 Εισαγωγή.....	47
8.2 Περιγραφή του συστήματος των δύο ταμιευτήρων	48
8.3 Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας και απαιτούμενης ενέργειας άντλησης	49
8.4 Συσχέτιση βασικών μεγεθών του ταμιευτήρα	50
8.4.1. Συσχέτιση μέγιστου ύψους και χωρητικότητας ταμιευτήρα.....	50

8.4.2. Συσχέτιση κόστους κατασκευής του ταμιευτήρα με την χωρητικότητα του 52

9 Οικονομική ανάλυση	55
9.1 Εισαγωγή.....	55
9.2 Εκτίμηση κόστους.....	55
9.2.1 Κόστος ανεμογεννητριών	55
9.2.2 Κόστος ηλιακών πάνελ.....	56
9.2.3 Κόστος ταμιευτήρων	57
9.2.4 Κόστος αντλιοστρόβιλου	57
9.2.5 Συνολική ετήσια δαπάνη.....	58
10 Αλγόριθμος προσομοίωσης της λειτουργίας και βελτιστοποίηση του συστήματος	59
10.1 Αλγόριθμος προσομοίωσης	59
10.2 Βελτιστοποίηση	62
11 Ανάλυση σεναρίων.....	65
11.1 Σενάρια δίχως περιορισμούς στον αριθμό των ανεμογεννητριών για διαφορετικές γωνίες τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	65
11.2 Σενάρια με περιορισμό στον αριθμό των ανεμογεννητριών για διαφορετικές γωνίες τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	66
11.3 Ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος στον εξυπηρετούμενο πληθυσμό ..	67
11.4 Διερεύνηση επιπλέον σεναρίων	68
12 Τελικά συμπεράσματα	71
Αναφορές	77
Παράρτημα Α.....	81
Παράρτημα Β.....	93
Παράρτημα Γ	105
Παράρτημα Δ	109

Περίληψη

Εξετάζεται ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα που αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, αιολικές μηχανές, δύο ταμιευτήρες με κατάλληλη υψομετρική διαφορά και έναν αντλιοστρόβιλο. Η ενέργεια παράγεται από τις αιολικές μηχανές και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ο αντλιοστρόβιλος χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και την αξιοποίηση της ενέργειας με αποκλειστική πηγή τον άνεμο και την ηλιακή ακτινοβολία. Ζητούμενο του σχεδιασμού είναι η κατάλληλη εκτίμηση των μεγεθών του συστήματος ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση ενέργειας αξιόπιστα με το μικρότερο κόστος. Η προσέγγιση που επιλέγεται για την αντιμετώπιση του προβλήματος σχεδιασμού είναι μέσω ενός στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος με ημερήσιο χρονικό βήμα. Συγκεκριμένα δημιουργείται η συνθετική χρονοσειρά της ζήτησης ενέργειας, ώστε να αντιστοιχεί σε 100 000 άτομα, χρησιμοποιώντας την ιστορική χρονοσειρά της κατανάλωσης ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας. Επίσης δημιουργούνται οι συνθετικές χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας με χρήση πολυμεταβλητού μοντέλου που διατηρεί την εμμονή με χρήση μετεωρολογικών δεδομένων από σταθμό στην νότια Αττική (37.89N 23.71W). Αναλύεται η μεθοδολογία μετατροπής της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ηλιακή ακτινοβολία και ο τρόπος υπολογισμού της ηλιακής ενέργειας. Όσον αφορά την αιολική ενέργεια αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού της αντιμετωπίζοντας την επιρροή του ημερήσιου χρονικού βήματος. Συσχετίζονται με θεωρητικές σχέσεις μεγέθη του ταμιευτήρα που είναι απαραίτητα στην προσομοίωση του συστήματος. Αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού του κόστους, που αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση που εισάγεται στο γενετικό αλγόριθμο με ζητούμενο την ελαχιστοποίηση της. Ο περιορισμός που εισάγεται είναι η αστοχία να είναι μικρότερη ή ίση του 100 στο μήκος προσομοίωσης των 182 500 ημερών. Εφαρμόζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης για διαφορετικές γωνίες κλίσης των ηλιακών πάνελ ώστε να προκύψει η βέλτιστη. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά που προέκυψαν από συνθετικές χρονοσειρές με τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά χωρίς όμως την δυναμική Hurst. Εξετάζονται επίσης σενάρια με περιορισμό στον αριθμό των ανεμογεννητριών και γίνεται ανάλυση ευαισθησίας στον εξυπηρετούμενο πληθυσμό.

Abstract

An autonomous hybrid system is being analysed, which consists of photovoltaic panels, wind machines, two reservoirs with suitable height difference, and one pump-turbine. The energy is generated by wind machines and solar cells. The pump-turbine is used for the storage and utilization of energy, using wind and solar radiation as its exclusive sources. The objective of the design is to properly assess the size of the system in order to satisfy energy demands reliably at the lowest cost. The chosen approach to address the design problem is by a stochastic simulation model of system operations with a daily time step. Specifically, a synthetic time series of energy demand is created to correspond to 100 000 people, using the historical time series of energy consumption in continental Greece. The synthetic time series of wind speed and sunshine duration are also generated using a multivariable model that maintains persistence using data from a meteorological station in southern Attica (37.89N 23.71W). We analyze the methodology of converting sunshine duration to solar radiation and the way solar energy is calculated. As for the wind energy, its calculation method is analyzed by addressing the influence of the daily time step. The correlation with theoretical functions of reservoir characteristics is necessary to simulate the system. The calculation of the cost is analysed, which is the objective function introduced into the genetic algorithm in order to be minimized. The introduced restriction is that the failure is less than or equal to 100 in length simulation of 182 500 days. We apply the procedure of optimization to different angles of solar panels in order to obtain the optimum one. The results are compared with those derived from synthetic time series with the same statistical characteristics but without the Hurst dynamic. We also examine scenarios with a limited number of wind turbines and perform a sensitivity analysis to the served population.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική τοποθέτηση

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει έρθει στο προσκήνιο το ζήτημα της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Ο προβληματισμός αυτός βασίζεται στο γεγονός ότι τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων δεν είναι ανεξάντλητα, στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται στην καύση τους, καθώς και στην έντονη μεταβλητότητα των τιμών τους, εξαιτίας γεωπολιτικών και κερδοσκοπικών αιτιών. Ταυτόχρονα, η αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας μέσω πυρηνικών αντιδραστήρων, εκτός από τα προβλήματα απόθεσης των παραπροϊόντων της, ενέχει τον κίνδυνο αστοχίας του έργου, η πιθανότητα του οποίου δεν είναι ποτέ μηδενική και σε περίπτωση αστοχίας τα αποτελέσματα είναι τραγικά. Ως αποτέλεσμα αυτών, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν συγκεντρώσει το παγκόσμιο ενδιαφέρον, καθώς σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, πρόκειται για ανεξάντλητες και περιβαλλοντικά φιλικές μορφές ενέργειας, ενώ σε καμία περίπτωση δεν υπάρχουν αντίστοιχοι κίνδυνοι με αυτούς της αξιοποίησης της πυρηνικής ενέργειας.

Οι ΑΠΕ έχουν ήδη υιοθετηθεί παγκόσμια, μάλιστα και με την υποστήριξη του κράτους, π.χ. με την μορφή επιδοτήσεων. Φυσικά οι ΑΠΕ είναι, προς το παρόν, οικονομικά μη ανταγωνιστικές σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα και την πυρηνική ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα είναι ασταθείς πηγές, αφού δεν μπορεί να υπάρξει εγγυημένος προγραμματισμός της παραγωγής ενέργειας. Παρόλα τα μειονεκτήματά τους, η αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων παροχής ενέργειας που βασίζονται στις ΑΠΕ κρίνεται απαραίτητη. Στο πλαίσιο αυτό, ζητούμενο είναι η εκπόνηση αξιόπιστων μελετών σχεδιασμού και βιωσιμότητας τέτοιων έργων.

Μια ειδική κατηγορία έργων ΑΠΕ είναι τα υβριδικά συστήματα που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες για την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου ή/και φωτοβολταϊκά στοιχεία για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με δύο ταμιευτήρες, με κατάλληλη υψομετρική διαφορά, που συνδέονται με αντλιοστρόβιλο. Το χρονικό διάστημα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας από τις

υπόλοιπες ΑΠΕ, το νερό αντλείται από τον κατάντη ταμιευτήρα προς τον ανάντη, επιτρέποντας έτσι την αποθήκευση ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο διάστημα η μεταφορά νερού γίνεται κατά την ορθή φορά, δηλαδή παράγεται ενέργεια από τους στροβίλους. Συνεπώς, οι ταμιευτήρες εξαλείφουν το πρόβλημα της αστάθειας των ΑΠΕ, αφού είναι δυνατόν να ρυθμιστεί η ολική παραγωγή ενέργειας του υβριδικού συστήματος.

Στην Ελλάδα, η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος βασίζεται κυρίως σε θερμοηλεκτρικές μονάδες που λειτουργούν με λιγνίτη, ενώ χρησιμοποιούνται και το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα. Τα ελληνικά νησιά που δεν ανήκουν στο διασυνδεδεμένο ηλεκτροδοτικό σύστημα, ηλεκτροδοτούνται κυρίως από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, με πολύ υψηλό κόστος. Την ίδια στιγμή ο Ελληνικός χώρος, εκτός από τον λιγνίτη που εξορύσσεται στην Ελλάδα και αποτελεί οικονομικό τρόπο παραγωγής ενέργειας, διαθέτει πλούσιο υδροενεργειακό, ηλιακό και αιολικό δυναμικό προς εκμετάλλευση.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός υβριδικού συστήματος που περιλαμβάνει ανεμογεννήτριες, ηλιακά πάνελ και ταμιευτήρες με αντλιοστροβίλους, προσομοιώνοντας την λειτουργία του συστήματος και βελτιστοποιώντας τα μεγέθη του σχεδιασμού. Ζητούμενο της βελτιστοποίησης είναι η κάλυψη της ζήτησης ενέργειας ενός δεδομένου πληθυσμού, θεωρώντας ως μοναδική πηγή ενέργειας το υβριδικό σύστημα, του οποίου ζητείται η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής των επιμέρους έργων.

Η έμφαση της εργασίας δίνεται αφενός στη διερεύνηση της βιωσιμότητας ενός τέτοιου έργου και τον προσδιορισμό των βασικών μεγεθών του και αφετέρου στη διατύπωση μιας προσεγγιστικής μεθοδολογίας σχεδιασμού υβριδικών σταθμών. Αναπτύσσεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο γενικού σκοπού, που καθιστά δυνατή την εξαγωγή αποτελεσμάτων για διαφορετικές συνθήκες και παραδοχές (τύπος ανεμογεννήτριας ή/και ηλιακού πάνελ, μετεωρολογικά δεδομένα κ.α.) από αυτές που ελήφθησαν στην πιλοτική εφαρμογή. Στην εφαρμογή αυτή εξετάζονται διάφορα σενάρια, με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού πλήθους

ανεμογεννητριών και ηλιακών πάνελ, όγκου των ταμιευτήρων, καθώς και της βέλτιστης γωνίας τοποθέτησης των ηλιακών πάνελ.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 11 κεφάλαια και τρία παραρτήματα. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο αντικείμενο και στους στόχους της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική βιβλιογραφική επισκόπηση που αφορά στις γενικές μεθοδολογίες σχεδιασμού και βελτιστοποίησης των υβριδικών σταθμών παραγωγής, που συνδυάζουν διάφορες πηγές ενέργειας και τρόπους αποθήκευσης αυτής.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η τοποθέτηση του προβλήματος σχεδιασμού. Περιγράφεται το σύστημα που εξετάζεται, το αντικείμενο της βελτιστοποίησης, ο τρόπος προσέγγισης του σχεδιασμού και άλλα επιμέρους θέματα που εξετάζονται στην εργασία. Παραθέτονται τα τεχνικά σημεία, οι παραδοχές και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν στον πιλότο εφαρμογής και οι βασικοί συμβολισμοί.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξηγείται η διαδικασία παραγωγής των συνθετικών χρονοσειρών ζήτησης της ενέργειας. Συγκεκριμένα, συλλέγονται δεδομένα ζήτησης ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας, σε μηνιαία κλίμακα, τα οποία αδιαστατοποιούνται ως προς τη μέση τιμή τους. Με χρήση των αδιαστατοποιημένων δειγμάτων δημιουργείται μια συνθετική χρονοσειρά, η οποία πολλαπλασιάζεται με τον μηνιαίο μέσο όρο της ζήτησης ενέργειας του κάθε έτους. Στη συνέχεια, οι χρονοσειρές ανάγονται σε ημερήσιο χρονικό βήμα, θεωρώντας πως κάθε ημέρα του μήνα έχει την ίδια ζήτηση σε ενέργεια. Τέλος, οι ημερήσιες τιμές ανάγονται με βάση το μέγεθος του εξυπηρετούμενου πληθυσμού.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στην δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας, με χρήση του προγράμματος «Κασταλία». Πραγματοποιείται πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση των δύο παραπάνω φυσικών διεργασιών με δύο τρόπους. Η πρώτη αναπαράγοντας την

δυναμική Hurst στις συνθετικές χρονοσειρές ενώ στην άλλη με μειωμένο συντελεστή Hurst.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται ορισμένες βασικές έννοιες που αφορούν την αιολική ενέργεια (π.χ. καμπύλες ισχύος, υψομετρική αναγωγή ταχύτητας ανέμου) και αντιμετωπίζεται η επίδραση του ημερήσιου χρονικού βήματος στην παραγόμενη αιολική ενέργεια. Ειδικότερα, περιγράφονται οι σχέσεις που προσεγγίζουν την μεταβολή των στατιστικών χαρακτηριστικών της ημερήσιας παραγόμενης αιολικής ενέργειας, όπως αυτές προκύπτουν από τις ωριαίες μέσες ταχύτητες ανέμου. Τέλος, περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της παραγόμενης ενέργειας με χρήση της κατανομής γάμα τριών παραμέτρων και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πραγματικά δεδομένα.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια αντίστοιχη εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια. Περιγράφεται ο υπολογισμός της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδα διάφορων κλίσεων και αναλύεται η αναγκαιότητα διερεύνησης διαφόρων κλίσεων τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ακόμη, εξηγούνται ο τρόπος υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους και ο υπολογισμός της ενέργειας που παράγεται από ένα ηλιακό πάνελ.

Το όγδοο κεφάλαιο αφορά στην υδροηλεκτρική ενέργεια και τους ταμιευτήρες που είναι απαραίτητοι για την εκμετάλλευσή της. Μετά από μια σύντομη εισαγωγή, περιγράφονται το σύστημα των δύο ταμιευτήρων και η διαδικασία υπολογισμού της παραγόμενης ενέργειας και της απαιτούμενης ενέργειας άντλησης. Στη συνέχεια αναλύονται οι τρόποι συσχετισμού ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών του ταμιευτήρα που απαιτούνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στο ένατο κεφάλαιο εκτιμώνται τα πάγια κόστη και τα κόστη συντήρησης και αντικατάστασής του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, καθώς και το κόστος κατασκευής και συντήρησης των φραγμάτων.

Στο δέκατο κεφάλαιο περιγράφεται ο αλγόριθμος προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος, με αναλυτική εξήγηση του τρόπου λειτουργίας του υβριδικού σταθμού αλλά και της διαδικασίας υπολογισμού των σχετικών μεγεθών. Αναλύεται, επίσης, η

διαδικασία βελτιστοποίησης, όσον αφορά στην επιλογή του αλγορίθμου καθώς και τη διατύπωση της στοχικής συνάρτησης και των περιορισμών.

Στο ενδέκατο κεφάλαιο περιγράφονται τα σενάρια που εξετάστηκαν και δίνονται τα βασικά αποτελέσματα. Αυτά αναφέρονται στις βέλτιστες διατάξεις του συστήματος, τη βέλτιστη γωνία τοποθέτησης των ηλιακών πάνελ και την ευαισθησία των αποτελεσμάτων στο μέγεθος του εξυπηρετούμενου πληθυσμού. Ακόμη, εξηγείται γιατί δεν εξετάστηκαν σενάρια με τις επιδοτούμενες από το κράτος τιμές για ΑΠΕ.

Στο δωδέκατο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, που αφορούν στα χαρακτηριστικά μεγέθη του έργου, την οικονομική του βιωσιμότητα και την ευαισθησία των αποτελεσμάτων.

Στο Παράρτημα Α και Β βρίσκονται τα ραβδογράμματα σύγκρισης των στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών για τις δύο στοχαστικές προσομοιώσεις. Στο Παράρτημα Γ δίνονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των κλάσεων της αιολικής ενέργειας υπολογισμένης με την μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου. Στο Παράρτημα Δ απεικονίζονται τα διαγράμματα της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας της ημέρας του χρόνου και της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας του χρόνου, για διάφορες γωνίες κλίσεις στην τοποθεσία που εξετάζεται.

2 Εισαγωγή στα υβριδικά συστήματα

Η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα έχει απασχολήσει έντονα την επιστημονική και πολιτική κοινότητα τις τελευταίες δεκαετίες παγκοσμίως. Φυσικά έναν από τους βασικούς λόγους αποτελεί το γεγονός ότι τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων δεν είναι ανεξάντλητα, χωρίς όμως και να υπάρχουν όμως αξιόπιστες εκτιμήσεις για το μεγεθός τους. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται στην καύση τους. Το περισσότερο βάρος δίνεται στο περιορισμό του λεγόμενου φαινομένου της κλιματικής αλλαγής και έχουν παρθεί πολιτικές αποφάσεις για την αντιμετώπισή του όπως, για παράδειγμα, το πρωτόκολλο του Κιότο. “Το πρωτόκολλο του Κιότο που διαδέχεται τη σύμβαση-πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές μεταβολές [...]. Περιλαμβάνει τις δεσμεύσεις που έχουν αναλάβει οι εκβιομηχανισμένες χώρες για τον περιορισμό των οικείων εκπομπών ορισμένων αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, υπεύθυνων για τη θέρμανση του πλανήτη. Οι συνολικές εκπομπές των ανεπτυγμένων χωρών πρέπει να μειωθούν τουλάχιστον κατά 5 % την περίοδο 2008-2012 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.”

(http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/128060_el.htm). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, ο πλέον ένθερμος υποστηρικτής του Πρωτοκόλλου του Κιότο έθεσε τον φιλόδοξο στόχο του ελέγχου του κλίματος, δηλαδή θέτει ως στόχο η συνολική μέση ετήσια αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του πλανήτη να μην υπερβαίνει τους 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Για αυτό τον σκοπό δημιουργήθηκε το «σχέδιο 20-20-20», θέτει στόχους για το έτος 2020 τη μείωση κατά 20% των αερίων θερμοκηπίου, τη βελτίωση κατά 20% της ενεργειακής αποδοτικότητας και την αύξηση κατά 20% της προσφοράς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η οδηγία θεσπίζει υποχρεωτικούς στόχους σύμφωνα με τους οποίους το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας της ΕΕ θα ανέλθει τουλάχιστον στο 20% έως το 2020 και καθορίζει εθνικούς συνολικούς στόχους για κάθε κράτος μέλος. Πρέπει να σημειωθεί πως μία όλο και αυξανόμενη μερίδα της επιστημονικής κοινότητας αντιμετωπίζει με έντονο σκεπτικισμό το λεγόμενο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής.

Τα παραπάνω έχουν ενταχθεί στον δημόσιο διάλογο σε ένα πλαίσιο ένταξης της πράσινης ενέργειας ως μοχλό ανάπτυξης. Η λεγόμενη πράσινη ανάπτυξη χαίρει

υψηλής δημοφιλίας τα τελευταία χρόνια ενώ αποτέλεσε στόχο πολλών κυβερνήσεων στην Γηραιά Ήπειρο κερδίζοντας τελευταία έδαφος και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αφορά την δημιουργία σταθμών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με συγχρηματοδότηση από το κράτος – αφού οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τουλάχιστον ακόμα δεν είναι ανταγωνιστικές – δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο θέσεις εργασίας. Υπάρχει έντονη κριτική υποστηρίζοντας πως στις χώρες που εφαρμόστηκε καταστράφηκαν περισσότερες θέσεις εργασίας από εκείνες που δημιουργήθηκαν ενώ έχουν παρατηρηθεί και φαινόμενα διαφθοράς (Green, 2011).

Ένας ακόμη λόγος που οι Α.Π.Ε. έχουν έρθει στο προσκήνιο είναι η έντονη μεταβλητότητα των τιμών των ορυκτών καυσίμων. Οι τιμές των ορυκτών καυσίμων διαμορφώνονται από την προσφορά και την ζήτηση. Η ζήτηση εξαρτάται από τις οικονομικές συνθήκες ενώ η προσφορά από πληθώρα παραγόντων πολιτικών, τεχνικών κ.α.. Επίσης τα ορυκτά καύσιμα ανήκουν στα παράγωγα που εμπορεύονται στο χρηματιστήριο εγείροντας ερωτήματα για το εάν η τιμή τους σπεκουλάρεται. Στα Σχήματα 2.1 και 2.2 απεικονίζεται η μεταβολή των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου (Πηγή: Wolfram alpha). Παρατηρείται η έντονη μεταβλητότητα τους. Συγκεκριμένα έως το ξέσπασμα της διεθνούς οικονομικής κρίσης υπήρχε έντονη αυξητική τάση ακολουθούμενη από μια κατακόρυφη πτώση.



Σχήμα 2.1 Η μεταβολή της τιμής του βαρελιού πετρελαίου (Δολλάρια) καθώς και η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη τιμή του για τα χρόνια που απεικονίζονται στο διάγραμμα.



(from Feb 17, 2004 to Sep 21, 2012)

minimum	average	maximum
\$1.91/MBTU	\$5.28/MBTU	\$13.58/MBTU
(Thursday, Apr 19, 2012)		(Thursday, Jul 3, 2008)

Computed by Wolfram|Alpha

Σχήμα 2.2 Η μεταβολή της τιμής του φυσικού αερίου (Δολάρια) καθώς και η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη τιμή του για τα χρόνια που απεικονίζονται στο διάγραμμα.

Υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας καλείται ένα σύστημα με δύο ή παραπάνω ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα ένα υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας χρησιμοποιεί ανεξάντλητες και περιβαλλοντικά φιλικές μορφές ενέργειας με το κόστος του να παρουσιάζει συγκριτικά μειωμένη αστάθεια. Τα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας θεωρείται πως είναι πιο αποδοτικά και αξιόπιστα σε σύγκριση με συστήματα που χρησιμοποιούν μία μόνο πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται αρκετές φορές σε απομακρισμένες περιοχές που δεν είναι διασυνδεδεμένες στο ηλεκτροδοτικό δίκτυο ώστε να αντικαταστήσουν την ενέργεια που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι η αιολική και η ηλιακή. Όσον αφορά την αιολική ενέργεια εκτιμάται πως στο τέλος του 2011 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικών μηχανών ήταν 238 GW. Η παγκόσμια αγορά αιολικής ενέργειας αναπτύχθηκε κατά περίπου 6% σε σύγκριση με το 2010 ενώ μόνο το 2011 εισήλθαν 40 GW καινούριας αιολικής ισχύος που αντιστοιχούν σε 50 δισεκατομμύρια ευρώ (Global Wind Energy Council). Όσον αφορά την ηλιακή ενέργεια μέχρι το τέλος του 2010 η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στοιχείων ήταν περίπου 40 GW. Το 2000 η εγκατεστημένη ισχύς

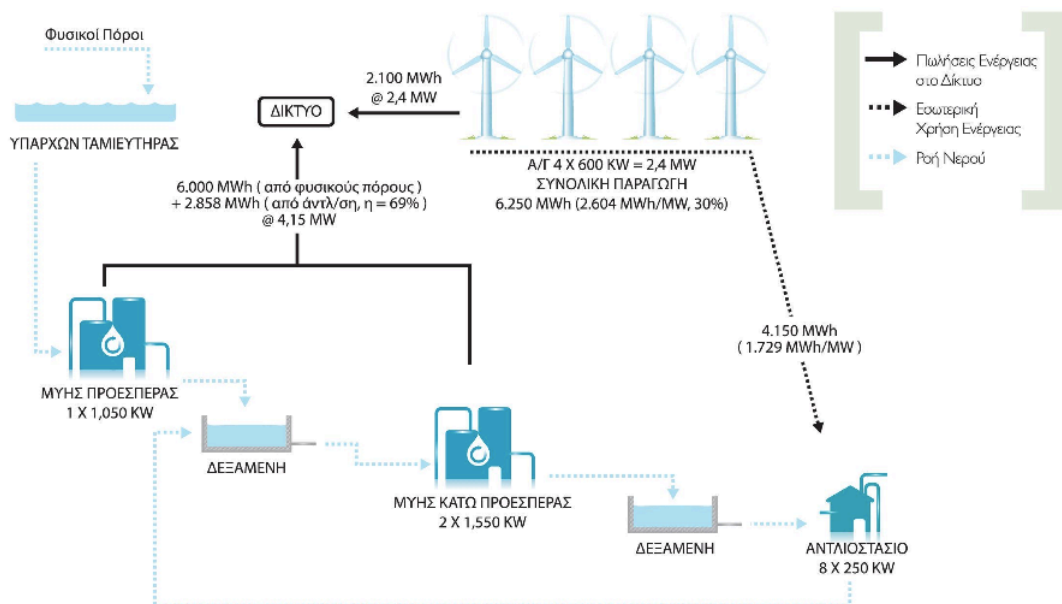
φωτοβολταϊκών ήταν 1.4 GW με μέση ετήσια ανάπτυξη περίπου 49% (Timilsina et al., 2011).

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ασταθείς πηγές, αφού δεν μπορεί να υπάρξει εγγυημένος προγραμματισμός της παραγωγής ενέργειας. Επομένως, χωρίς κάποιο μέσο αποθήκευσης ενέργειας δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Μία τέτοια μέθοδος αποθήκευσης είναι αυτή της αντλησιοταμίευσης. Η μέθοδος αυτή, απαιτεί την ύπαρξη δύο ταμιευτήρων, αποθηκεύει ενέργεια στην υδάτινη μορφή αντλώντας νερό από τον κατάντη στον ανάντη ταμιευτήρα. Όταν είναι απαραίτητο το αντλημένο νερό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω στροβίλων. Εκτιμάται πως μέχρι το 2009 η εγκατεστημένη ισχύς αντλησιοταμίευσης ήταν 104 GW (U.S. Energy Information Administration).

Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης – άρα και χαμηλής αξίας – ώστε να αξιοποιείται τις περιόδους υψηλής ζήτησης αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την πρόσοδο. Ένα έργο που κατασκευάστηκε για αυτό τον σκοπό είναι ο σταθμός αντλησιοταμίευσης Kazunogawa. Ολοκληρώθηκε το 2001 στην περιοχή Yamnashi-Ken της Ιαπωνίας, έχει ισχύ 1600 MW και αποτελείται από δύο ταμιευτήρες χωρητικότητας 19.2 και 18.4 hm³ με υψομετρική διαφορά 685 m (Μαμάσης, 2011). Ένα άλλο αξιοσημείωτο έργο είναι ο σταθμός της Okinawa που λειτούργησε το 1999 στο νησί Okinawa της Ιαπωνίας. Είναι το πρώτο έργο άντλησης-ταμίευσης που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό. Η ισχύς του είναι 30 MW με μέγιστο ύψος πτώσης 140 m (Μαμάσης, 2011).

Μία άλλη χρήση αυτής της μεθόδου αποθήκευσης ενέργειας – η οποία εξετάζεται στην παρούσα εργασία – είναι για την αντιμετώπιση της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής και ζήτησης ενέργειας σε Α.Π.Ε. Η ποσότητα ενέργειας και ο χρόνος που παράγεται δεν μπορεί να προσδιορισθεί εκ των προτέρων στις Α.Π.Ε.. Επομένως απαιτείται η αποθήκευσή της όταν υπάρχει περίσσεια ώστε να διατεθεί όταν η παραγωγή υπολείπεται της ζήτησης. Ένα τέτοιο σύστημα κατασκευάζεται στην Ικαρία και αποτελεί το πρώτο ανάλογο υβριδικό σύστημα στην Ευρώπη. Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας εκμεταλλεύεται την αιολική ενέργεια και την

υδροηλεκτρική ενέργεια. Αποτελείται από δύο μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΜΥΗΣ) στις θέσεις Προεσπέρα και Κάτω Προεσπέρα, ένα Αιολικό Πάρκο, στη θέση Στραβοκουντούρα, δύο δεξαμενές νερού, ένα αντλιοστάσιο και το Κέντρο Ελέγχου και Κατανομής Φορτίου Αγίου Κηρυκου. Ο ΜΥΗΣ Προεσπέρας, ισχύος 1.05 MW, εκμεταλλεύεται τις υπερχειλίσεις του υπάρχοντος ταμιευτήρα (θέση Πέζι) για την παραγωγή ενέργειας. Το νερό, εξερχόμενο από τον πρώτο ΜΥΗΣ φορτίζει την παρακείμενη δεξαμενή. Στη συνέχεια, κατευθύνεται στον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, ισχύος 3.1 MW, όπου χρησιμοποιείται για την παραγωγή πρόσθετης ενέργειας και καταλήγει στη δεύτερη κατά σειρά δεξαμενή. Το Αιολικό Πάρκο, συνολικής ισχύος 2.4 MW, παράγει ενέργεια η οποία διοχετεύεται στο δίκτυο ηλεκτροδότησης και στο αντλιοστάσιο όπου χρησιμοποιείται για τη μεταφορά νερού από την κάτω στην επάνω δεξαμενή και την εκ νέου παραγωγή ενέργειας από τον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας. Η Ετήσια Καθαρή Παραγωγή Ενέργειας του Υβριδικού Ενεργειακού Έργου Ικαρίας φτάνει τις 10.96 GWh. Η ενέργεια αυτή επαρκεί για την κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους των ενεργειακών αναγκών του νησιού για όλο το έτος, περιορίζοντας σημαντικά την ανάγκη λειτουργίας του Θερμικού Τοπικού Σταθμού Παραγωγής. (ΔΕΗ Ανανεώσιμες). Το σκαρίφημα στο Σχήμα 2.3 περιγράφει την λειτουργία του.



Σχήμα 2.3 Σκαρίφημα της λειτουργίας του Υβριδικού Ενεργειακού έργου Ικαρίας (πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)

Στην Ελλάδα η ένταξη των Α.Π.Ε. μπορεί να αποτελέσει λύση τόσο για τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου όσο και στο πρόβλημα των μη διασυνδεδεμένων με το ηλεκτροδοτικό σύστημα περιοχών. Τα νησιά της Ελλάδας δεν συνδέονται με το ηλεκτροδοτικό σύστημα της ηπειρωτικής χώρας με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος παραγωγής ενέργειας και την εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα. Ένα υβριδικό σύστημα ανανεώσιμης ενέργειας με δυνατότητα αποθήκευσης είναι ένας εναλλακτικός τρόπος ηλεκτροδότησης. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ένα τέτοιο σύστημα με πηγές την ηλιακή και αιολική ενέργεια που αποθηκεύει ενέργεια με την μέθοδο της αντλησιοταμίευσης.

3 Τοποθέτηση του προβλήματος σχεδιασμού υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας

3.1 Περιγραφή και ανάλυση της προσέγγισης του προβλήματος σχεδιασμού

Εξετάζεται ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα μεγάλης κλίμακας που αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία, αιολικές μηχανές, δύο ταμιευτήρες με κατάλληλη υψομετρική διαφορά και έναν αντλιοστρόβιλο. Η ενέργεια παράγεται από τις αιολικές μηχανές και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ο αντλιοστρόβιλος χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και την αξιοποίηση της ενέργειας με αποκλειστική πηγή τον άνεμο και την ηλιακή ακτινοβολία. Γίνεται η παραδοχή πως δεν υπάρχουν εισροές και απώλειες στους ταμιευτήρες.

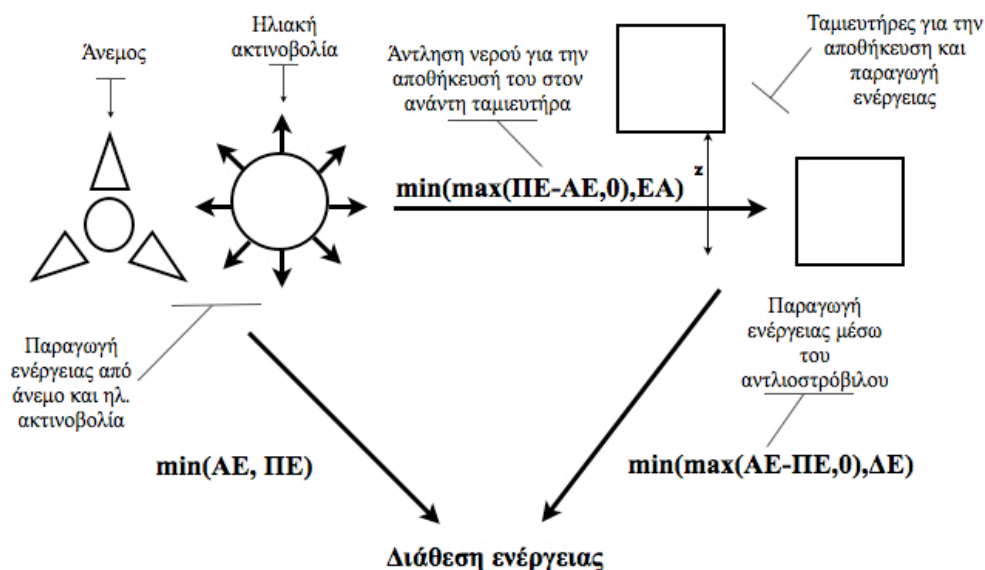
Ζητούμενο του σχεδιασμού είναι η κατάλληλη εκτίμηση των μεγεθών του συστήματος ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση ενέργειας αξιόπιστα και με το μικρότερο κόστος. Συγκεκριμένα προσδιορίζεται ο συνδυασμός πλήθους ανεμογεννητριών, πλήθους ηλιακών πάνελ, όγκου των ταμιευτήρων και γωνία κλίσης φωτοβολταϊκών στοιχείων ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του κόστους ενώ αποδίδεται η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται.

Η προσέγγιση που επιλέγεται για την αντιμετώπιση του προβλήματος σχεδιασμού είναι μέσω ενός στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος. Η επιλογή στοχαστικού μοντέλου γίνεται διότι για να υπολογιστεί με αξιοπιστία η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος θα πρέπει η προσομοίωση να έχει επαρκές μήκος. Για να γίνει εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας β σε ετήσια βάση με ένα αποδεκτό λάθος $\pm \epsilon \beta$ και συντελεστή εμπιστοσύνης γ απαιτούνται $m = (z_{(1+\gamma)/2} / \epsilon)^2 (1/\beta - 1)$ χρόνια, όπου z_p είναι το p ποσοστημόριο της τυποποιημένης κανονικής κατανομής. Υποθέτοντας $\beta = 6\%$, $\epsilon = 10\%$ και $\gamma = 95\%$ προκύπτουν περίπου $m = 6\,000$ χρόνια (Koutsoyiannis and Economou, 2003). Το μήκος δηλαδή είναι της τάξης των χιλιάδων χρόνων, οπότε είναι προφανές πως πρέπει να δημιουργηθούν συνθετικές χρονοσειρές των μεταβλητών εισόδου που να αναπαράγουν την στοχαστική δομή και τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών χρονοσειρών.

Συγκεκριμένα δημιουργείται η συνθετική χρονοσειρά της ζήτησης ενέργειας χρησιμοποιώντας την ιστορική χρονοσειρά της κατανάλωσης ενέργειας στην ηπειρωτική Ελλάδα. Επίσης δημιουργούνται οι συνθετικές χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας με χρήση πολυμεταβλητού μοντέλου που διατηρεί την εμμογή. Για την διερεύνηση της επιρροής της εμμογής στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δημιουργούνται επίσης συνθετικές χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας με χρήση πολυμεταβλητού μοντέλου που δεν ενσωματώνουν την δυναμική Hurst.

Η λειτουργία του συστήματος χωρίζεται σε ημερήσια χρονικά βήματα. Οι μεταβλητές εισόδου που εισάγονται σε κάθε χρονικό βήμα είναι η ζήτηση ενέργειας, η ταχύτητα ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Για κάθε χρονικό βήμα υπολογίζεται η ενέργεια από τα ηλιακά πάνελ και τις ανεμογεννήτριες που παράγεται και εξετάζεται αν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης ενέργειας. Εάν η ενέργεια που παράγεται είναι περισσότερη από αυτή που απαιτείται και ο ανάντη ταμιευτήρας δεν είναι πλήρης αντλείται νερό από τον κατάντη ώστε να αποθηκευθεί ενέργεια. Στην περίπτωση που η ενέργεια που παράγεται δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης διοχετεύεται νερό από τον ανάντη ταμιευτήρα εφόσον αυτός έχει επαρκή ποσότητα. Σε άλλη περίπτωση δεν ικανοποιείται η ζήτηση ενέργειας. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο σκαρίφημα στο Σχήμα 3.1.

Επιλέγεται το μήκος χρονικών βημάτων στο οποίο το σύστημα πρέπει να μην αστοχεί – δηλαδή να μην καλύπτεται η ζήτηση ενέργειας - περισσότερες φορές από ένα ορισμένο όριο. Σε κάθε χρονικό βήμα προσομοιώνεται με έναν αλγόριθμο η λειτουργία του συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω, υπολογίζονται η παραγόμενη ενέργεια, η αντλούμενη/διοχετευόμενη ποσότητα ενέργειας, το αποθηκευμένο νερό στον ανάντη/κατάντη ταμιευτήρα και άλλα στοιχεία του συστήματος, καθώς και η αστοχία εάν υπάρχει. Στο τέλος της προσομοίωσης υπολογίζεται το κόστος. Εξετάζονται με αυτόν τον τρόπο διάφοροι συνδυασμοί πλήθους ανεμογεννητριών, πλήθους ηλιακών πάνελ και όγκου των ταμιευτήρων - με χρήση της μεθόδου των γενετικών αλγόριθμων – ώστε να προσδιορισθεί αυτός που καλύπτει το κριτήριο της αστοχίας με το ελάχιστο κόστος.



Σχήμα 3.1 Σκαρίφημα περιγραφής της λειτουργίας του συστήματος όπου ΑΕ είναι η απαιτούμενη ενέργεια δηλαδή η ενέργεια που ζητείται, ΠΕ είναι η παραγόμενη ενέργεια από τις αιολικές μηχανές και τα φωτοβολταϊκά, ΕΑ η ενέργεια που απαιτείται ώστε να αντληθεί όλη η διαθέσιμη ποσότητα νερού του κατάντη ταμιευτήρα, ΔΕ είναι η διαθέσιμη υδροηλεκτρική ενέργεια του ανάντη ταμιευτήρα.

Για τις ανάγκες της εργασίας αναλύεται η μεθοδολογία μετατροπής της διάρκειας ηλιοφάνειας, που αποτελεί την μεταβλητή της συνθετικής χρονοσειράς που δημιουργήθηκε, σε ηλιακή ακτινοβολία που είναι το μέγεθος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας. Όσον αφορά την αιολική ενέργεια αντιμετωπίζεται η επιρροή του ημερήσιου χρονικού βήματος στον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας. Συγκεκριμένα εάν η κατανομή των ταχυτήτων ανέμου κατά την διάρκεια της ημέρας είναι διαφορετική για ημέρες με ίδια μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου τότε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι διαφορετική. Αναπτύσσεται μια μεθοδολογία ώστε να υπολογίζεται η παραγόμενη ενέργεια με χρήση της μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου χωρίς να αμελείται η διακύμανση που μπορεί αυτή να έχει.

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας και της ενέργειας άντλησης στο μοντέλο προσομοίωσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του ύψους

του νερού στον ταμιευτήρα σε κάθε χρονικό βήμα. Για τον σκοπό αυτό επιλέγεται μια θεωρητική σχέση που συσχετίζει την χωρητικότητα, το μέγιστο ύψος, το αποθηκευμένο νερό και το ύψος του νερού στον ταμιευτήρα. Δημιουργείται μια θεωρητική σχέση που συσχετίζει το μέγιστο ύψος ταμιευτήρα με την χωρητικότητα του ώστε κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης να είναι δυνατός ο υπολογισμός του ύψους του νερού στον ταμιευτήρα για τις διάφορες χωρητικότητες ταμιευτήρα που εξετάζονται.

Για την εκτίμηση του κόστους απόκτησης και εγκατάστασης όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες και τα ηλιακά πάνελ θεωρείται για το καθένα ένα κόστος που αντιστοιχεί σε ένα MW εγκατεστημένης ισχύος. Το κόστος αντλιοστρόβιλου θεωρείται πως εξαρτάται από την εγκατεστημένη ισχύ της αντλίας και από την μέγιστη παροχή που θα διέλθει. Το κόστος κατασκευής των ταμιευτήρων υπολογίζεται δημιουργώντας μια θεωρητική σχέση που συσχετίζει την μεταβολή του κόστους με τον όγκο του ταμιευτήρα. Για όλα τα παραπάνω υπολογίζεται το ετήσιο κόστος συντήρησης ως ένα ποσοστό του αρχικού κόστους.

Το κόστος ανά MW εγκατεστημένης ισχύος των ηλιακών πάνελ είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος των ανεμογεννητριών (τα παραπάνω κόστη αναφέρονται στο Κεφάλαιο 9). Αυτό δεν συνεπάγεται όμως πως το κόστος ανά MWh, δηλαδή το κόστος της παραγόμενης ενέργειας, είναι μεγαλύτερο για την ηλιακή ενέργεια αφού αυτό εξαρτάται από την ταχύτητα ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή που εξετάζεται. Δηλαδή είναι δυνατόν μικρότερη εγκατεστημένη ισχύς να αποδίδει μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας. Επίσης η χρονική κατανομή της παραγωγής ενέργειας επηρεάζει την απαιτούμενη χωρητικότητα του ταμιευτήρα, άρα και το τελικό κόστος. Εάν η μεταβολή της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας προσεγγίζει περισσότερο την μεταβολή της ζήτησης ενέργειας από αυτήν της αιολικής ενέργειας τότε η ηλιακή ενέργεια που πρέπει να αποθηκευθεί είναι λιγότερη. Τέλος, η απαιτούμενη χωρητικότητα του ταμιευτήρα εξαρτάται και από την ετεροσυσχέτιση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας ανέμου. Δηλαδή στην περίπτωση που η διαθέσιμη ενέργεια με πηγή το ένα φυσικό φαινόμενο είναι μειωμένη ενώ η άλλη είναι αυξημένη τότε επίσης μειώνεται η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης που περιγράφηκε γίνεται για διάφορες γωνίες κλίσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων ώστε να προσδιορισθεί η βέλτιστη, δηλαδή η γωνία για την οποία ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος του υβριδικού σταθμού. Εξετάζονται στο μοντέλο προσομοίωσης διάφορες γωνίες κλίσης επιπέδου, ενώ μπορεί να προσδιορισθεί εκ των προτέρων η γωνία του επιπέδου που προσπίπτει η περισσότερη ενέργεια, γιατί ανάλογα με την γωνία μεταβάλλεται και η χρονική κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως αναλύθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η χρονική κατανομή της παραγωγής επηρεάζει την ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας άρα και το κόστος.

3.2 Πιλοτική εφαρμογή

Στην πιλοτική εφαρμογή του μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας επιλέγεται μήκος προσομοίωσης 500 χρόνια, δηλαδή περίπου 182 500 ημέρες, το οποίο εξασφαλίζει ικανοποιητική ακρίβεια και ευχέρεια στους υπολογισμούς. Επιλέγεται η αστοχία να είναι μικρότερη ή ίση του 100 σε όλο το μήκος προσομοίωσης, δηλαδή ο αριθμός των ημερών που η ζήτηση ενέργειας δεν καλύπτεται να είναι το πολύ 100. Οι συνθετικές χρονοσειρές ζήτησης ενέργειας που δημιουργούνται αντιστοιχούν σε 100 000 άτομα και υπολογίζονται με βάση την κατανάλωση ενέργειας στην ηπειρωτική χώρα της Ελλάδας ενώ θεωρείται πως η συνολική ετήσια ζήτηση ενέργειας παραμένει σταθερή. Για την δημιουργία των συνθετικών χρονοσειρών της ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας χρησιμοποιούνται μετεωρολογικά δεδομένα από σταθμό στην νότια Αττική (37.89N 23.71W). Γίνεται η παραδοχή πως οι δύο ταμειευτήρες του υβριδικού σταθμού έχουν την ίδια χωρητικότητα και χαρακτηριστικά. Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς είναι η E-126 / 7.5 MW της Enercon. Το ηλιακό πάνελ που επιλέχθηκε έχει ισχύ 280 Wp.

3.3 Σύμβολα

Ακολουθούν οι βασικοί συμβολισμοί που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία.

- ζ : Παράμετρος που λαμβάνεται ίση με 3
 Σ_k : Συνολικό κόστος κατασκευής και συντήρησης υβριδικού σταθμού
 H : Υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού στους δύο ταμιευτήρες
 k : Χωρητικότητα ταμιευτήρα
 L : Πιθανότητα αστοχίας
 \max_a
 $:$ Μέγιστη ισχύς άντλησης
 \max_q
 $:$ Μέγιστη παροχή άντλησης
 n_w : Αριθμός εγκατεστημένων ανεμογεννητριών
 n_s : Αριθμός εγκατεστημένων ηλεκτρικών πάνελ
 RE : Ζήτηση ενέργειας
 s : Αποθηκευμένο νερό στον ταμιευτήρα
 SE : Ενέργεια που παράγεται από ένα ηλεκτρικό πάνελ για δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία
 SSE : Ενέργεια που παράγεται από το σύνολο των ηλεκτρικών πάνελ στην εγκατάσταση για δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία
 SWE Ενέργεια που παράγεται από το σύνολο των ανεμογεννητριών στην
 $:$ εγκατάσταση για δεδομένη ταχύτητα ανέμου
 WE : Ενέργεια που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια για δεδομένη ταχύτητα ανέμου
 z : Στάθμη νερού στον ταμιευτήρα
 z_{\max} : Μέγιστη στάθμη ταμιευτήρα

4 Συνθετικές χρονοσειρές ζήτησης ενέργειας

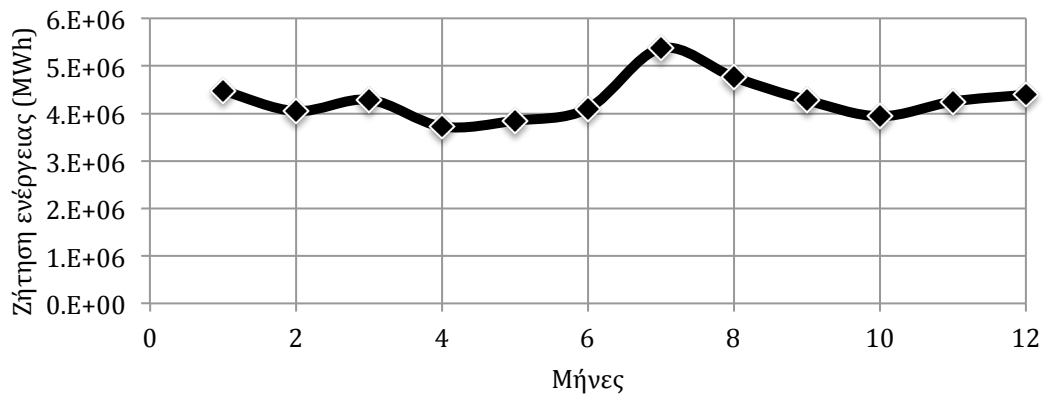
4.1 Εισαγωγή

Δημιουργείται η συνθετική χρονοσειρά της ζήτησης της ενέργειας που αποτελεί μεταβλητή εισόδου του συστήματος. Το μήκος της είναι ίσο με το μήκος προσομοίωσης, δηλαδή 500 χρόνια. Για τη δημιουργία των συνθετικών χρονοσειρών ζήτησης ενέργειας επιλέγεται μηνιαίο χρονικό βήμα, καθώς σε μικρότερες χρονικές κλίμακες – όπως η ημερήσια που χρησιμοποιείται από το μοντέλο προσομοίωσης - δημιουργούνται έντονες μεταβολές της ζήτησης, που οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες.

4.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Αρχικά συλλέχτηκαν τα δεδομένα ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας για την ηπειρωτική Ελλάδα από τον ΑΔΜΗΕ, για τα έτη 2004, 2005, 2007, 2008, 2010 και 2011. Τα έτη 2006 και το 2009 αποκλείστηκαν λόγω της έλλειψης δεδομένων για κάποια χρονικά διαστήματα. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η συνολική κατανάλωση ενέργειας κάθε μήνα και ο μέσος όρος των μηνιαίων καταναλώσεων για κάθε χρόνο. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται, ενδεικτικά, το διάγραμμα της μηνιαίας κατανάλωσης ενέργειας για το έτος 2011.

Διαιρώντας την μηνιαία κατανάλωση ενέργειας με τον μέσο όρο της μηνιαίας κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει το αντίστοιχο ποσοστό, που εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη ή μικρότερη είναι η κατανάλωση ενέργειας του μήνα σε σχέση με τον μέσο όρο. Αδιαστατοποιώντας τα μεγέθη ζήτησης είναι δυνατή η σύγκριση ετών με διαφορετικές καταναλώσεις ενέργειας. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται για όλα τα έτη. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.1 Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας, το έτος 2011.

Πίνακας 4.1 Λόγοι μηνιαίας κατανάλωσης ενέργειας προς τον ετήσιο μέσο όρο της μηνιαίας κατανάλωσης ενέργειας και στατιστικά χαρακτηριστικά τους (μέση τιμή, μ , και τυπική απόκλιση, σ).

	2004	2005	2007	2008	2010	2011	μ	σ
I	1.052	1.031	0.998	1.050	1.042	1.044	1.036	0.020
Φ	0.929	0.952	0.913	0.938	0.916	0.945	0.932	0.016
M	0.974	0.967	0.960	0.909	0.962	1.001	0.962	0.030
A	0.881	0.902	0.862	0.871	0.869	0.867	0.875	0.014
M	0.899	0.923	0.930	0.940	0.934	0.895	0.920	0.019
I	0.991	0.994	1.056	1.074	1.026	0.954	1.016	0.045
I	1.212	1.194	1.267	1.251	1.208	1.250	1.230	0.029
A	1.112	1.096	1.119	1.145	1.234	1.109	1.136	0.051
Σ	0.972	0.958	0.949	0.986	0.956	0.998	0.970	0.019
O	0.933	0.934	0.944	0.916	0.925	0.918	0.928	0.011
N	0.972	0.988	0.953	0.921	0.909	0.992	0.956	0.035
Δ	1.073	1.062	1.048	0.998	1.018	1.025	1.037	0.029

4.3 Δημιουργία συνθετικής χρονοσειράς ζήτησης ενέργειας

Για κάθε μήνα υπολογίζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των δεδομένων του Πίνακα 4.1. Στη συνέχεια, αφαιρώντας τη μέση τιμή και διαιρώντας με την τυπική απόκλιση του αντίστοιχου μήνα, εφαρμόζεται ο γραμμικός μετασχηματισμός :

$$Z = (X - \mu) / \sigma$$

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια αδιαστατοποιημένη χρονοσειρά χωρίς περιοδικότητα, με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση ένα, για την οποία υπολογίζεται η αυτοσυσχέτιση πρώτης τάξης. Με χρήση των παραπάνω στατιστικών μεγεθών υπολογίζονται οι συντελεστές του μοντέλου αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1, AR(1) το οποίο δίνεται από τη σχέση $X_i = \alpha X_{i-1} + V_i$, όπου X_i η στάσιμη ανέλιξη σε διακριτό χρόνο, α η αυτοσυσχέτιση πρώτης τάξης και V_i ο λευκός θόρυβος σε διακριτό χρόνο (Κουτσογιάννης, 2007).

Το μοντέλο AR(1) εφαρμόζεται για την παραγωγή μιας συνθετικής χρονοσειράς μηνιαίου χρονικού βήματος, μήκους πεντακοσίων ετών. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής και συνθετικής χρονοσειράς απεικονίζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής μετασχηματισμένης και της συνθετικής χρονοσειράς

Ιστορική χρονοσειρά		Συνθετική χρονοσειρά	
μ	0	α	0.08
σ	1	μ_ϵ	0
$\rho(1)$	0.08	σ_ϵ	0.997

Στη συνέχεια, όλες οι τιμές της χρονοσειράς πολλαπλασιάζονται με την τυπική απόκλιση και προστίθεται η μέση τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε μήνα. Θεωρώντας την ζήτηση ενέργειας του 2011 ως την ζήτηση που πρέπει να ικανοποιεί το σύστημα που εξετάζεται, οι αδιαστατοποιημένες τιμές που προκύπτουν πολλαπλασιάζονται με τον μέσο όρο κατανάλωσης ενέργειας των μηνών του 2011. Η ζήτηση αυτή ανέρχεται σε 4 290 GWh.

Θεωρώντας πώς η ζήτηση ενέργειας παραμένει σταθερή στη διάρκεια κάθε μήνα, γίνεται επιμερισμός της διαιρώντας την μηνιαία ζήτηση με τις ημέρες του μήνα. Φυσικά τα παραπάνω αναφέρονται στην ζήτηση ενέργειας όλου του πληθυσμού της ηπειρωτικής χώρας, ο οποίος, σύμφωνα με την απογραφή του 2001, ανέρχεται στα 9 626 424 άτομα. Ο πληθυσμός που εξετάζεται στον πιλότο εφαρμογής, όπως έχει αναφερθεί, είναι τα 100 000 άτομα. Επομένως, για τον υπολογισμό της τελικής

χρονοσειράς, όλες οι τιμές ζήτησης ενέργειας πολλαπλασιάζονται με τον όρο 100 000 / 9 626 424. Τελικά στην χρονοσειρά που δημιουργήθηκε η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας των 100 000 ατόμων προκύπτει περίπου 534.8 GWh.

5 Συνθετικές χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιακής ακτινοβολίας

Πραγματοποιείται η ταυτόχρονη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μήκους πεντακοσίων χρόνων. Η ηλιακή ακτινοβολία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενέργειας που παράγουν τα ηλιακά πάνελ προσδιορίζεται με χρήση της μεταβλητής της διάρκειας ηλιοφάνειας. Τα μετεωρολογικά δεδομένα προήλθαν από τον μετεωρολογικό σταθμό Άγιος Κοσμάς στη νότια Αττική (37.89N 23.71W, The Hydrological Observatory of Athens) από όπου χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές της περιόδου 27/02/2005 – 25/06/2012.

Ιδιαίτερος σημαντικός είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή Hurst, η ύπαρξη μακροχρόνιας μνήμης ή εμμονής στις ιστορικές χρονοσειρές που παρουσιάζεται σε αρκετές περιβαλλοντικές ποσότητες, αφού η παράληψή του στα έργα πολιτικού μηχανικού μπορεί να οδηγήσει στην λανθασμένη διαστασιολόγηση του έργου. Ειδικότερα στην συγκεκριμένη εργασία αν αμεληθεί ο συντελεστής Hurst αμελείται η συγκέντρωση χαμηλών ή υψηλών τιμών της ταχύτητας ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στην υποδιαστασιολόγηση του ταμιευτήρα αφού θα αμελούταν το ενδεχόμενο χαμηλών εισροών ενέργειας στο σύστημα διαδοχικά έτη. Ο συντελεστής Hurst που χρησιμοποιήθηκε είναι $H_a=0.84$ για την ταχύτητα ανέμου και $H_\eta=0.84$ για την διάρκεια ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι παραπάνω τιμές του συντελεστή Hurst αντλήθηκαν από την ερευνητική εργασία του Γ. Τσεκούρα “Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών μεταβλητών ανέμου και ήλιου”. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των τιμών του συντελεστή Hurst στα δύο αυτά μεγέθη ήταν αρχικά η κατασκευή συνθετικών χρονοσειρών για κάθε μία από τις δύο μεταβλητές, μέση ταχύτητα ανέμου και διάρκεια ηλιοφάνειας, με την μέθοδο των τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας (Koutsoyiannis 2002). Για την σύνθεση τους χρησιμοποιήθηκε μία θεωρητική τιμή του συντελεστή Hurst στη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης η οποία είναι κοινή για όλες τις συνθετικές χρονοσειρές. Στο τέλος της διαδικασίας υπολογίστηκε η πραγματική τιμή του συντελεστή Hurst που προέκυψε για κάθε μία από αυτές με την μέθοδο LSSD. Με δοκιμές θεωρητικών τιμών του συντελεστή Hurst

και σύγκριση των ιστογραμμάτων των συντελεστών Hurst των συνθετικών χρονοσειρών με αυτά των ιστορικών προέκυψαν οι τιμές του συντελεστή.

Με χρήση των στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών χρονοσειρών της ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας του σταθμού και των συντελεστών Hurst που αναφέρθηκαν γίνεται η πολυμεταβλητή στοχαστική τους προσομοίωση για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών διάρκειας 500 ετών. Η δημιουργία πολυμεταβλητού μοντέλου είναι ιδιαιτέρως σημαντική αφού λαμβάνει υπ όψιν την ετεροσυσχέτιση των δύο μεγεθών που προφανώς επηρεάζει τον σχεδιασμό του συστήματος.

Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα «Κασταλία» (<http://itia.ntua.gr/el/softinfo/2/>) σε συνεργασία με τον Γ. Τσεκούρα. Το σύστημα «Κασταλία» πραγματοποιεί στοχαστική ανάλυση πλήθους δειγμάτων μεταβλητών οι οποίες αναφέρονται σε διαφορετικές διεργασίες στην ίδια θέση ή σε διαφορετικές θέσεις. Αποτελεί δηλαδή ένα πολυμεταβλητό σύστημα γέννησης συνθετικών χρονοσειρών σε ετήσια, μηνιαία και ημερήσια κλίμακα. Στην γένεση συνθετικών χρονοσειρών περιλαμβάνεται η διαδικασία προσομοίωσης της εμμονής σε ετήσια κλίμακα για πολυμεταβλητές ανελίζεις. Γεννά έτσι συνθετικές χρονοσειρές πολύ μεγάλου μήκους οι οποίες διατηρούν στην ετήσια, μηνιαία και ημερήσια κλίμακα τα ουσιώδη στατιστικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών των ιστορικών χρονοσειρών δηλαδή τις μέσες τιμές, διασπορές, ασυμμετρίες, αυτοσυσχετίσεις πρώτης τάξης και ετεροσυσχετίσεις μηδενικής υστέρησης.

Ο χειρισμός του συστήματος <<Κασταλία>> (η επιλογή παραμέτρων κ.α.) έγινε με τον τρόπο που περιγράφεται από τον Τσεκούρα (2012). Δημιουργήθηκαν έτσι οι συνθετικές χρονοσειρές της διάρκειας ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ανέμου με τον συντελεστή Hurst να ισούται με 0.85 για την μέση ταχύτητα ανέμου και με 0.83 για την διάρκεια ηλιοφάνειας. Στο Παράρτημα Α βρίσκονται τα ραβδογράμματα σύγκρισης των στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών και των συνθετικών χρονοσειρών.

Ο ετήσιος συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της ιστορικής χρονοσειράς ανέμου είναι -0.30 το οποίο πιθανώς οφείλεται στο μικρό μήκος δείγματος. Στο

σύστημα <<Κασταλία>> τέθηκε αυτός ο συντελεστής ίσος με 0.30. Επίσης πρόβλημα παρατηρείται με την αναπαραγωγή της ασυμμετρίας σε όλες τις κλίμακες για την ταχύτητα ανέμου. Η συνθετική χρονοσειρά υποεκτιμά τον συντελεστή ασυμμετρίας. Πρέπει να σημειωθεί πως η ιστορική χρονοσειρά δεν περιγράφεται ικανοποιητικά από την κατανομή γάμα που χρησιμοποιεί η «Κασταλία» για να παράξει την συνθετική χρονοσειρά - κάτι που πιθανώς οφείλεται στο μικρό μήκος του δείγματος.

Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης στην ημερήσια κλίμακα για την διάρκεια ηλιοφάνειας υπερεκτιμάται στην συνθετική χρονοσειρά. Στην μηνιαία κλίμακα της διάρκειας ηλιοφάνειας υπάρχουν αποκλίσεις στον συντελεστή ασυμμετρίας και στον συντελεστή αυτοσυσχέτισης όμως δεν θεωρείται πως αυτό επηρεάζει ιδιαίτερα το ημερήσιο μοντέλο. Τα υπόλοιπα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών χρονοσειρών στην ημερήσια και την ετήσια κλίμακα διατηρούνται ικανοποιητικά.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η παράληψη του συντελεστή Hurst ενδεχομένως να οδηγήσει σε λανθασμένο σχεδιασμό. Για την διερεύνηση της επιρροής του συντελεστή Hurst στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το σύστημα «Κασταλία» για την πολυμεταβλητή στοχαστική προσομοίωση των ιστορικών χρονοσειρών χωρίς την δυναμική Hurst. Στην πραγματικότητα οι συνθετικές χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν δεν αποτελούσαν λευκό θόρυβο. Όσον αφορά την μέση ταχύτητα ανέμου ο συντελεστής Hurst που προέκυψε είναι 0.64 ενώ για την διάρκεια ηλιοφάνειας 0.61. Στο Παράρτημα Β βρίσκονται τα ραβδογράμματα σύγκρισης των στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών και των συνθετικών χρονοσειρών. Η αναπαραγωγή των στατιστικών χαρακτηριστικών παρουσίασε τα προβλήματα που αναφέρθηκαν και παραπάνω.

6 Αιολική ενέργεια

6.1 Εισαγωγή¹

Η αιολική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου, χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα στη ναυσιπλοΐα και αργότερα με την κατασκευή των πρώτων ανεμόμυλων (6ος-9ος μΧ.) για άλεσμα δημητριακών και για άντληση νερού. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται ανεμόμυλοι από τον 13ο αιώνα. Το 1888 κατασκευάστηκε ο πρώτος ανεμόμυλος για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Χρησιμοποιώντας την αιολική ενέργεια μειώνεται η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα με αποτέλεσμα την προστασία έναντι της μεταβλητότητας των τιμών των ορυκτών καυσίμων καθώς και λιγότερους ρύπους. Λόγω της μείωσης των ρύπων αλλά και των αμελητέων επιδράσεων στην πανίδα θεωρείται φιλική στο περιβάλλον μορφή ενέργειας. Είναι, επίσης, μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, με τεχνολογικά ώριμο εξοπλισμό εκμετάλλευσής της, ανεξάρτητη από τα κεντρικά δίκτυα διανομής και με χαμηλό λειτουργικό κόστος.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται ο εκπεμπόμενος θόρυβος και η οπτική όχληση που φυσικά είναι υποκειμενική. Τα ποσοστά των πουλιών που σκοτώνονται από πρόσκρουση σε ανεμογεννήτριες είναι αμελητέο σε σύγκριση με το ποσοστό λόγω πρόσκρουσης με οχήματα και γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο παραπάνω παράγοντας σε περίπτωση προστατευόμενων περιοχών. Μειονέκτημα αποτελεί και η απρόβλεπτη διακύμανση ενέργειας των αιολικών μηχανών που μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αιολική μηχανή αποτελείται από τον πύργο που είναι κυλινδρικής μορφής από χάλυβα και συνήθως περιλαμβάνει δύο ή τρία συνδεδεμένα τμήματα, τον θάλαμο που περιέχει τα μηχανικά υποσυστήματα (κύριος άξονας, σύστημα πέδησης, κιβώτιο ταχυτήτων ηλεκτρογεννήτρια), τα ηλεκτρονικά συστήματα έλεγχου ασφαλούς

¹ Το υποκεφάλαιο αυτό αποτελεί σύμπτυξη του Μαμάσης Ν. (2011)

λειτουργίας και τα πτερύγια.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της αιολικής μηχανής είναι η διάμετρος της πτερωτής, το ύψος τοποθέτησης, το πλήθος των πτερυγίων – συνήθως τρία - το είδος των πτερυγίων δηλαδή το πάχος και το υλικό, η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής που σχετίζεται με την συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου και την αντοχή των πτερυγίων σε φυγόκεντρες τάσεις, η ονομαστική ισχύς δηλαδή η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράξει η ανεμογεννήτρια.

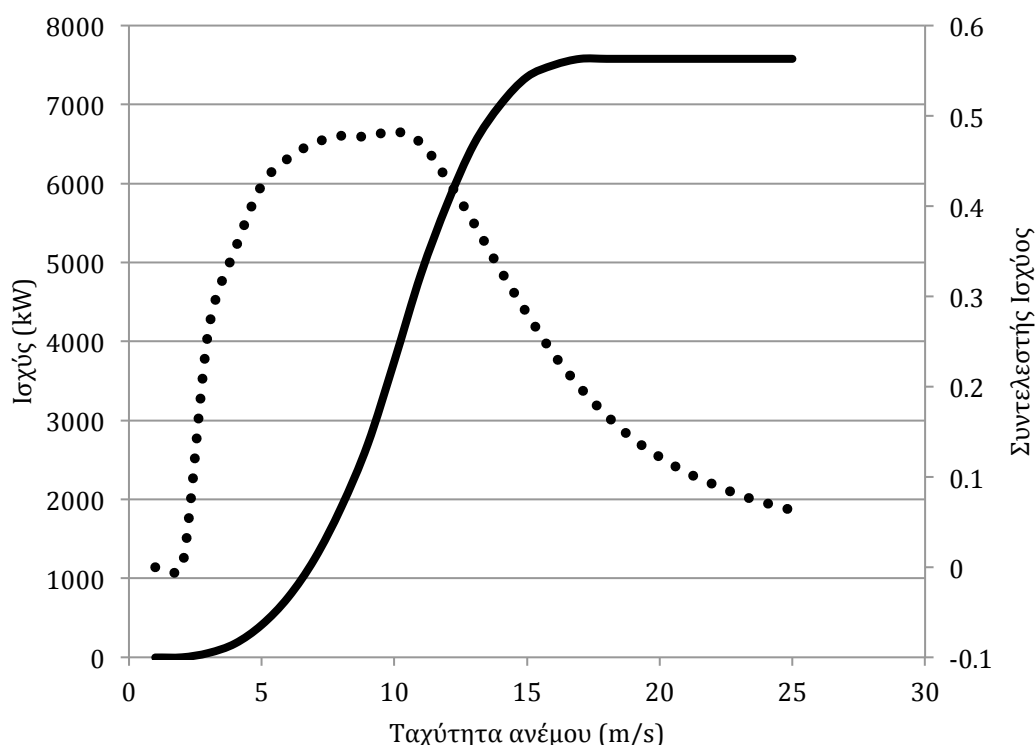
6.2 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας και συντελεστής ισχύος

Η καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας είναι η καμπύλη που περιγράφει την σχέση μεταξύ της καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια και της ταχύτητας του ανέμου στη συγκεκριμένη θέση. Οι καμπύλες ισχύος συνήθως εκτιμώνται εμπειρικά, από μετρήσεις πεδίου της ταχύτητας ανέμου με ανεμόμετρο και μέτρηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1 η σχέση δεν είναι γραμμική. Η ανεμογεννήτρια δεν αποδίδει καθόλου ισχύ για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από κάποιο κάτω όριο όπως και για ταχύτητες μεγαλύτερες από κάποιο άνω όριο. Από το κάτω όριο μέχρι ενός σημείου η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται με μη σταθερή κλίση με την αύξηση της ταχύτητας ανέμου και στη συνέχεια παραμένει σταθερή με την αύξηση της ταχύτητας ανέμου μέχρι το ανώτερο όριο στο οποίο η παραγωγή σταματάει.

Ο συντελεστής ισχύος είναι ο λόγος της ισχύος που παράγει η ανεμογεννήτρια σε κάθε ταχύτητα ανέμου προς τη θεωρητική, δηλαδή είναι ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης πτερωτής και έχει μέγιστο όριο την τιμή $C \leq 16/27 = 0.593$ (όριο Betz, 1919). Άρα υψηλός συντελεστής ισοδυναμεί με υψηλή εκμετάλλευση της διατιθέμενης ενέργειας και αντίστοιχα ο χαμηλός συντελεστής σε χαμηλή εκμετάλλευση. Στο Σχήμα 6.1 μπορεί να παρατηρηθεί πως ο συντελεστής αυξάνεται έντονα με την έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και συνεχίζει να αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας ανέμου έως ένα μέγιστο. Έπειτα ο συντελεστής μειώνεται συνεχώς μέχρι το σημείο που σταματά να λειτουργεί η ανεμογεννήτρια, ο συντελεστής σε εκείνη την περιοχή του διαγράμματος έχει πολύ χαμηλή τιμή αφού με

την αύξηση της ταχύτητας ανέμου η αποδιδόμενη ισχύς είναι σταθερή.



Σχήμα 6.1 Η καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας αναπαριστάται με συνεχή γραμμή και ο συντελεστής ισχύος με διακεκομμένη.

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ,για πρακτικούς λόγους, ο Πίνακας 6.1 που προκύπτει από την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας. Ο πίνακας αυτός περιέχει την αποδιδόμενη ισχύ για διάφορες ταχύτητες ανέμου που αλλάζουν με σταθερό βήμα. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα αυτόν υπολογίζεται η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια της οποίας το γινόμενο με το χρονικό διάστημα που πνέει άνεμος με αυτή την ταχύτητα ισούται με την παραγόμενη ενέργεια.

Ο Πίνακας 6.1 αντιστοιχεί στην ανεμογεννήτρια E-126 / 7.5 MW της Enercon που χρησιμοποιείται στην πιλοτική εφαρμογή της παρούσας εργασίας της οποίας οι τεχνικές προδιαγραφές παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Σημειώνεται πως είναι από τις ισχυρότερες αιολικές μηχανές που υπάρχουν διαθέσιμες στο εμπόριο.

Πίνακας 6.1 Αποδιδόμενη ισχύς και συντελεστής ισχύος για διάφορες ταχύτητες ανέμου

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ισχύς (kW)	Συντελεστής ισχύος
1	0	0
2	0	0
3	55	0.263
4	175	0.352
5	410	0.423
6	760	0.453
7	1250	0.47
8	1900	0.478
9	2700	0.477
10	3750	0.483
11	4850	0.47
12	5750	0.429
13	6500	0.381
14	7000	0.329
15	7350	0.281
16	7500	0.236
17	7580	0.199
18	7580	0.168
19	7580	0.142
20	7580	0.122
21	7580	0.105
22	7580	0.092
23	7580	0.08
24	7580	0.071
25	7580	0.063

Πίνακας 6.2 Τεχνικές προδιαγραφές

Ισχύς:	7 500 kW	Ταχύτητα περιστροφής:	Κυμαινόμενη, 5-11.7 rpm
Διάμετρος ρότορα:	127 m	Pitch control:	ENERCON single blade pitch system;
Ύψος κόμβου:	135 m		one independent pitch system per rotor
Wind zone (DIBt):	WZ III		blade with allocated emergency supply
Wind class (IEC):	IEC/NVN IA	Drive train with generator	
Ρότορας		Κόμβος:	Rigid
Τύπος:	Upwind rotor with active pitch control	Main bearing:	Single-row tapered roller bearing
Κατεύθυνση περιστροφής:	Ωρολογιακή	Generator:	ENERCON direct-drive annular generator
Αριθμός πτερυγίων	3	Grid feed:	ENERCON inverter
Περιοχή σάρωσης:	12 668 m ²	Brake systems:	– 3 independent pitch control systems
Υλικό λεπίδας:	GRP (epoxy resin) / GRP;		with emergency power supply
	GRP (epoxy resin) / steel;		– Rotor brake
	Built-in lightning protection	Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
		Cut-out wind speed:	28 – 34 m/s
		Remote monitoring:	ENERCON SCADA

6.3 Υπολογισμός ταχύτητας ανέμου στο ύψος τοποθέτησης

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας η ταχύτητα ανέμου πρέπει να αναχθεί στο ύψος του κόμβου της ανεμογεννήτριας (hub height). Η ταχύτητα ανέμου μεταβάλλεται με το υψόμετρο, αυτή η μεταβολή μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω σχέση (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}} \quad (6.1)$$

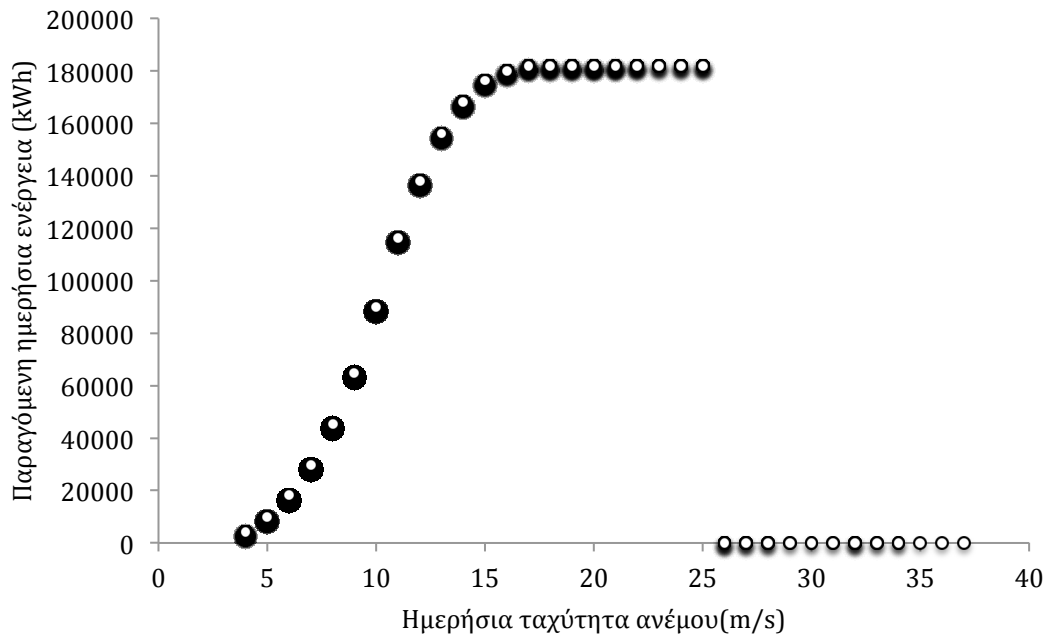
όπου u_1 , u_2 η ταχύτητα ανέμου σε ύψη z_1 και z_2 αντίστοιχα και z_0 η παράμετρος της τραχύτητας του εδάφους. Το ύψος μέτρησης της ταχύτητας ανέμου στον σταθμό ήταν $z_1 = 6$ m, το ύψος κόμβου της επιλεγμένης ανεμογεννήτριας είναι $z_2 = 135$ m ενώ επιλέχθηκε συντελεστής τραχύτητας $z_0 = 2$.

6.4 Διερεύνηση της επιρροής του χρονικού βήματος στον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας

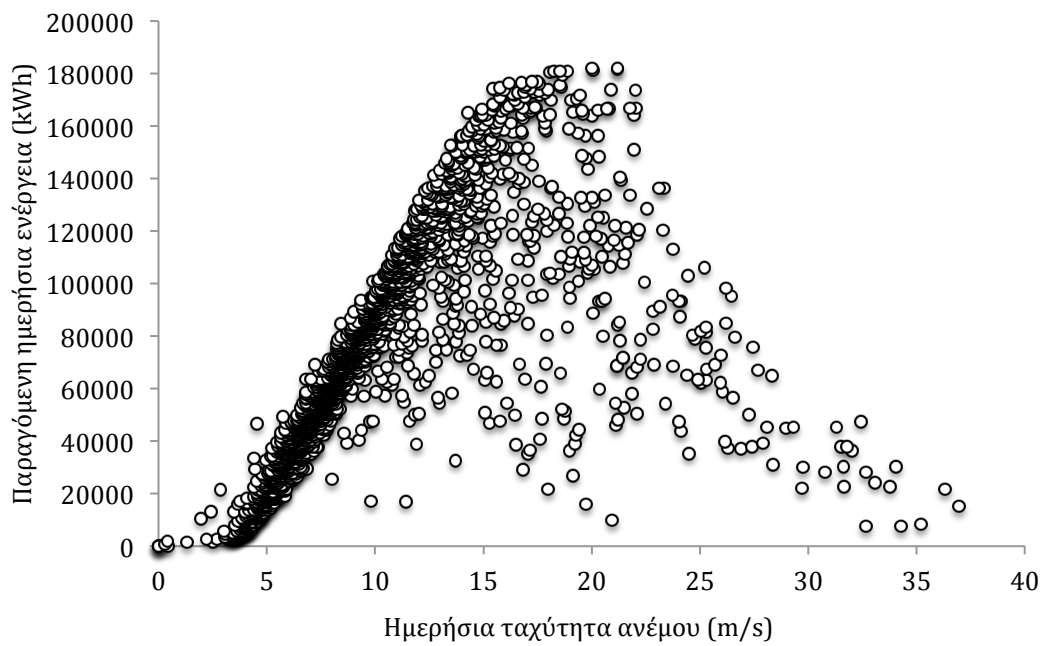
Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζονται οι ημερήσιες παραγόμενες ενέργειες μίας ανεμογεννήτριας χρησιμοποιώντας τις μέσες ημερήσιες ταχύτητες ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Άγιος Κοσμάς. Επίσης υπολογίζονται οι ημερήσιες παραγόμενες ενέργειες μίας ανεμογεννήτριας με χρήση των μέσων ωριαίων ταχυτήτων ανέμου των καταγραφών του ίδιου σταθμού οι οποίες αντιστοιχίζονται με τις μέσες ημερήσιες ταχύτητες ανέμου. Το Σχήμα 6.3 απεικονίζει τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών.

Είναι προφανές πως χρησιμοποιώντας ημερήσιο χρονικό βήμα για τον υπολογισμό της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας αμελείται η διακύμανση που έχει αυτή για την ίδια μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου. Αυτή η διακύμανση οφείλεται στην μη γραμμικότητα της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας. Εάν δηλαδή η κατανομή των ταχυτήτων ανέμου κατά την διάρκεια της ημέρας είναι διαφορετική για ημέρες με ίδια μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου τότε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι διαφορετική.

Για αυτόν τον λόγο, θεωρώντας ως ανεκτή προσέγγιση της πραγματικής παραγόμενης ενέργειας την ενέργεια που προκύπτει από την ωριαία μέση ταχύτητα ανέμου, επιχειρείται η περιγραφή της μεταβολής των στατιστικών χαρακτηριστικών της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας - που υπολογίζεται με μέσες ωριαίες ταχύτητες ανέμου – ως προς την μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου. Με χρήση αυτών των περιγραφών είναι δυνατός ο υπολογισμός της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας με ημερήσιο χρονικό βήμα λαμβάνοντας υπ όψιν την διακύμανση που αυτή έχει.



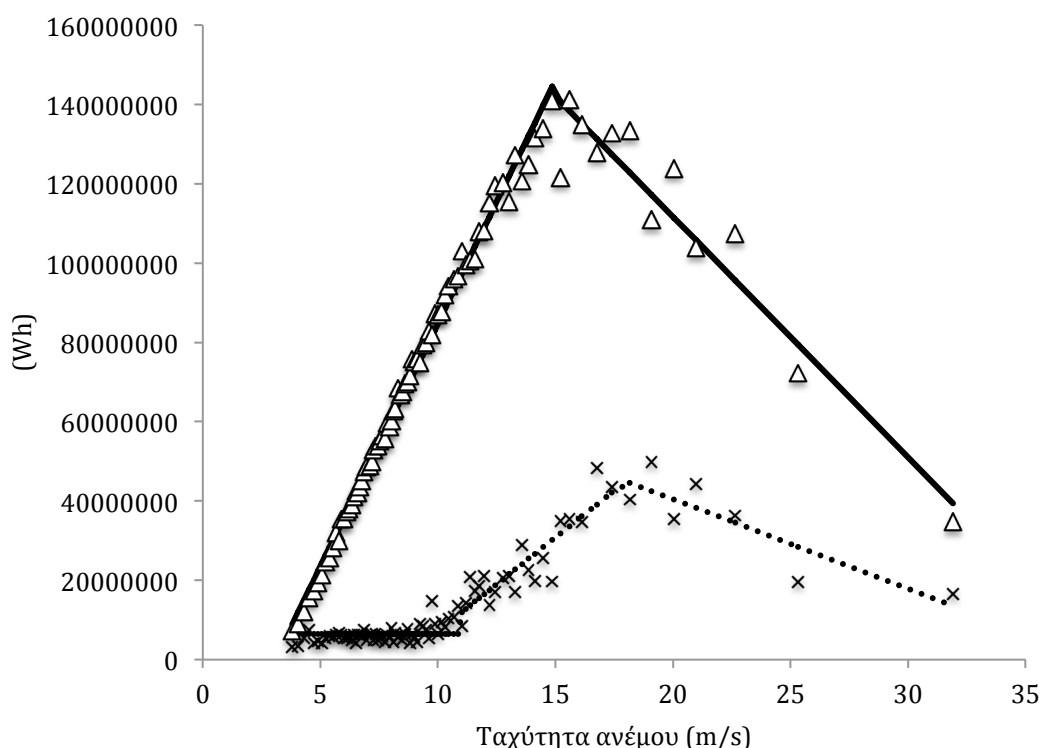
Σχήμα 6.2 Η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ημερήσιας ταχύτητας ανέμου με χρήση των μέσων ημερήσιων ταχυτήτων ανέμου



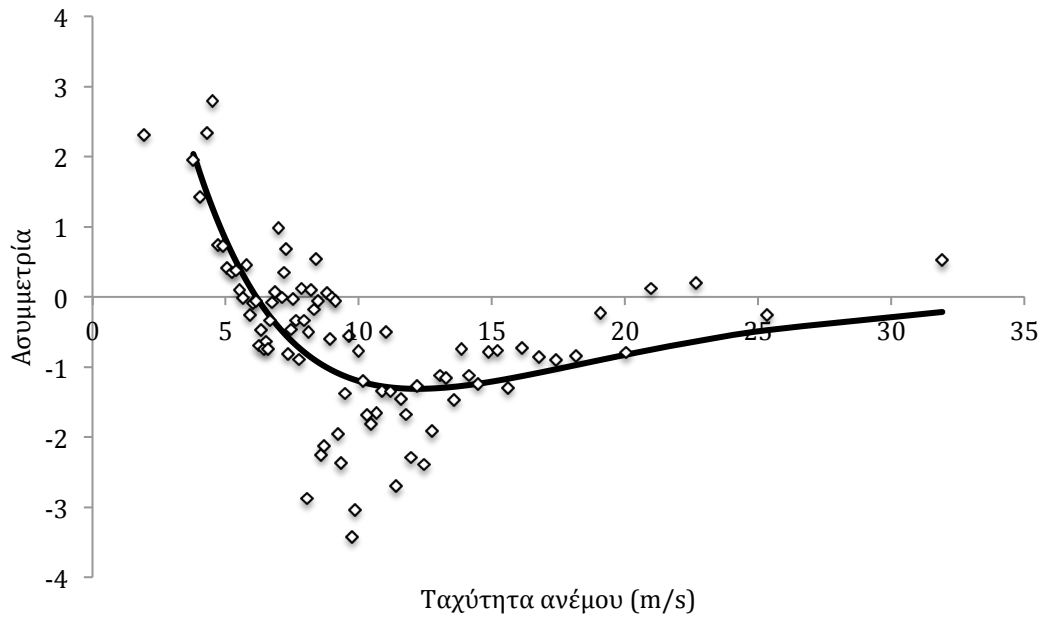
Σχήμα 6.3 Η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ημερήσιας ταχύτητας ανέμου με χρήση των μέσων ωριαίων ταχυτήτων ανέμου

6.5 Διερεύνηση της μεταβολής των στατιστικών χαρακτηριστικών της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας

Οι τιμές της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας με χρήση μέσων ωριαίων ταχυτήτων ανέμου που υπολογίστηκαν χωρίστηκαν σε κλάσεις, αφού είχαν διαταχθεί σε αύξουσα σειρά με βάση την ημερήσια ταχύτητα ανέμου. Κάθε κλάση έχει 30 τιμές και για κάθε κλάση υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η ασυμμετρία. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Γ. Στο Σχήμα 6.4 απεικονίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για κάθε κλάση αντιστοιχισμένες με το μέσο της κλάσης. Στο Σχήμα 6.5 απεικονίζεται με τον ίδιο τρόπο ο συντελεστής ασυμμετρίας. Παρατηρείται πως η μεταβολή των στατιστικών χαρακτηριστικών δεν είναι τυχαία, δηλαδή ακολουθεί κάποια μορφή. Κάνοντας χρήση αυτού του χαρακτηριστικού προσαρμόζονται συναρτήσεις στις τιμές των στατιστικών χαρακτηριστικών ώστε να υπάρχει μια συνεχής περιγραφή τους.



Σχήμα 6.4 Με Δ απεικονίζονται οι μέσες τιμές των κλάσεων και με \times οι τυπικές αποκλίσεις των κλάσεων. Η συνεχής γραμμή απεικονίζει την καμπύλη της σχέσης που περιγράφει την μεταβολή της μέσης τιμής ενώ η διακεκομμένη την καμπύλη της σχέσης της τυπικής απόκλισης.



Σχήμα 6.5 Με \blacklozenge απεικονίζονται οι συντελεστές ασυμμετρίας των κλάσεων ενώ με συνεχή γραμμή απεικονίζεται η καμπύλη της σχέσης που περιγράφει την μεταβολή του συντελεστή ασυμμετρίας.

6.5.1 Μέση τιμή

Έστω x η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου (m/s). Η μέση τιμή μ (Wh) περιγράφεται, εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων θεωρώντας μία ευθεία $y=ax+b$ για τις κλάσεις με μέσο μικρότερο ή ίσο των 15 m/s και μία άλλη ευθεία για τις κλάσεις με μέσο μεγαλύτερο των 15 m/s. Δηλαδή έχουμε:

$$\mu(x)=\begin{cases} 12251706 * x - 37706954, & 3 \leq x \leq 15 \\ -6061236 * x + 232903334, & x > 15 \end{cases} \quad (6.2)$$

Η καμπύλη της μ απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4.

6.5.2 Τυπική απόκλιση

Η μεταβολή της τυπικής απόκλισης σ (Wh) περιγράφεται από την συνάρτηση:

$$\sigma(x) = \begin{cases} 6435438, & 3 \leq x \leq 11 \\ 4732172 * x - 40149931, & 11 < x \leq 18 \\ -2260694 * x + 85697841, & x > 18 \end{cases} \quad (6.3)$$

όπου ο πρώτος κλάδος είναι ο μέσος όρος των τυπικών αποκλίσεων των κλάσεων με μέσο μικρότερο ίσο των 11 m/s, ενώ οι υπόλοιποι δύο κλάδοι προέκυψαν προσαρμόζοντας δύο ευθείες με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, μία για τις κλάσεις με μέσο μεγαλύτερο του 11 m/s και μικρότερο ίσο του 18 m/s και μία για τις κλάσεις με μέσο μεγαλύτερο του 18 m/s. Η καμπύλη της απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4.

6.5.3 Ασυμμετρία

Η μεταβολή του συντελεστή ασυμμετρίας περιγράφεται από την συνάρτηση:

$$\alpha(x) = 10 * \left(1 - \frac{x}{6.148}\right) * \exp\left(-\frac{x}{6.053}\right), \quad x \geq 3 \quad (6.4)$$

Η παραπάνω συνάρτηση προέκυψε προσαρμόζοντας την

$$y = a * \left(1 - \frac{x}{L1}\right) * \exp\left(-\frac{x}{L2}\right)$$

στις τιμές του συντελεστή ασυμμετρίας για όλες τις κλάσεις. Οι τιμές του συντελεστή ασυμμετρίας για κάθε κλάση καθώς και η προσαρμοσμένη σε αυτές συνάρτηση απεικονίζονται στο Σχήμα 5.4.

Με την χρήση των παραπάνω συναρτήσεων περιγράφεται η μεταβολή της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και της ασυμμετρίας της παραγόμενης ημερήσιας ενέργειας συναρτήσει της μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου.

6.6 Υπολογισμός της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας

Θεωρείται πως η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια για τις διάφορες τιμές της μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου περιγράφεται από την

κατανομή γάμα τριών παραμέτρων. Χρησιμοποιώντας την κατανομή αυτή για γνωστή μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου μπορεί να βρεθεί η τιμή της παραγόμενης ενέργειας που αντιστοιχεί σε τυχαία πιθανότητα και στα στατιστικά χαρακτηριστικά της όπως αυτά προκύπτουν από τις συναρτήσεις που τα περιγράφουν. Για αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιείται η εντολή `gammainv` του προγράμματος “Microsoft Excel” :

$$\text{Gammainv}(\text{probability}, \text{alpha}, \text{beta})$$

Η εντολή αυτή είναι η αντίστροφη της αθροιστικής κατανομής γάμα δύο παραμέτρων, όμως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της γάμα δυο παραμέτρων είναι :

$$f_x(x) = \frac{\lambda^\kappa}{\Gamma(\kappa)} x^{\kappa-1} e^{-\lambda x}$$

Ενώ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής γάμα τριών παραμέτρων :

$$f_x(x) = \frac{\lambda^\kappa}{\Gamma(\kappa)} (x - c)^{\kappa-1} e^{-\lambda(x-c)}$$

(Κουτσογιάννης, 1996). Όπως παρατηρείται από τις παραπάνω δύο συναρτήσεις η αντίστροφη της αθροιστικής κατανομής γάμα τριών παραμέτρων ισούται με την αντίστροφη της αθροιστικής κατανομής γάμα δύο παραμέτρων προσθέτοντας την παράμετρο c .

Οι παράμετροι α , β , c προκύπτουν από:

$$\alpha = \frac{4}{a(x)^2} \quad (6.5)$$

$$\beta = \frac{1}{(\alpha^{0.5} / \sigma(x))} \quad (6.6)$$

$$c = \mu(x) - \alpha * \beta \quad (6.7)$$

Τελικά η παραγόμενη ημερήσια ενέργεια WE (Wh) προκύπτει ως εξής :

$$WE = c + \text{gammmainv}(\text{rand}(), \alpha, \beta) \quad (6.8)$$

όπου $\text{rand}()$ εντολή του προγράμματος “Microsoft Excel” που δημιουργεί τυχαίους αριθμούς από το 0 έως το 1.

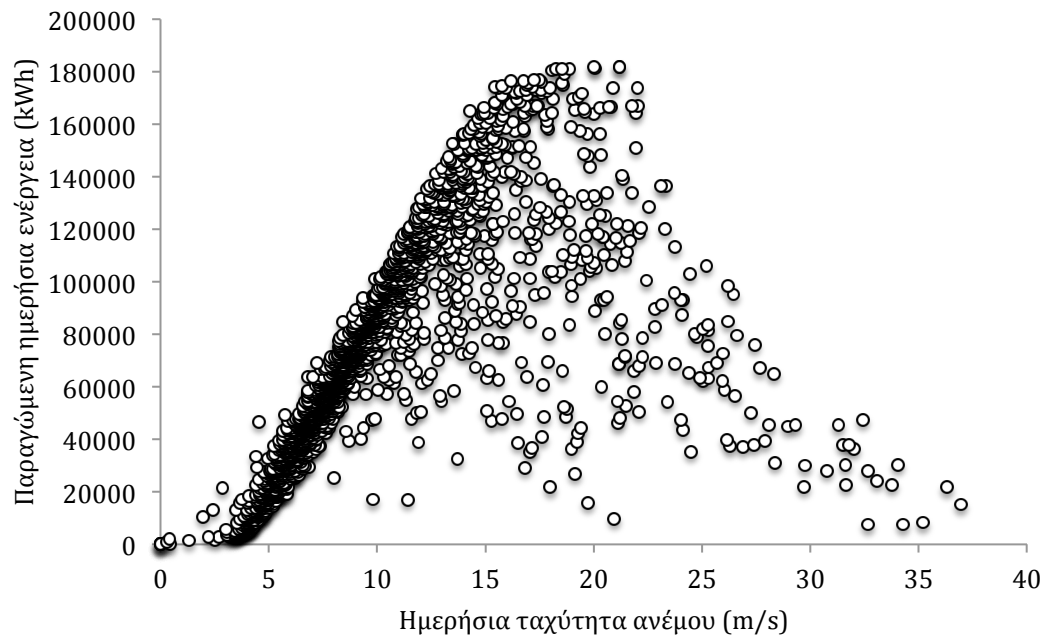
Πρέπει να σημειωθεί πως η κατανομή γάμα τριών παραμέτρων ορίζεται μόνο για θετικές τιμές της ασυμμετρίας. Όταν οι τιμές αυτής είναι αρνητικές υπολογίζεται η παραγόμενη ημερήσια ενέργεια WE χρησιμοποιώντας την απόλυτη τιμή της ασυμμετρίας. Στη συνέχεια διορθώνεται ως εξής:

$$WE' = \mu(x) + \mu(x) - WE \quad (6.9)$$

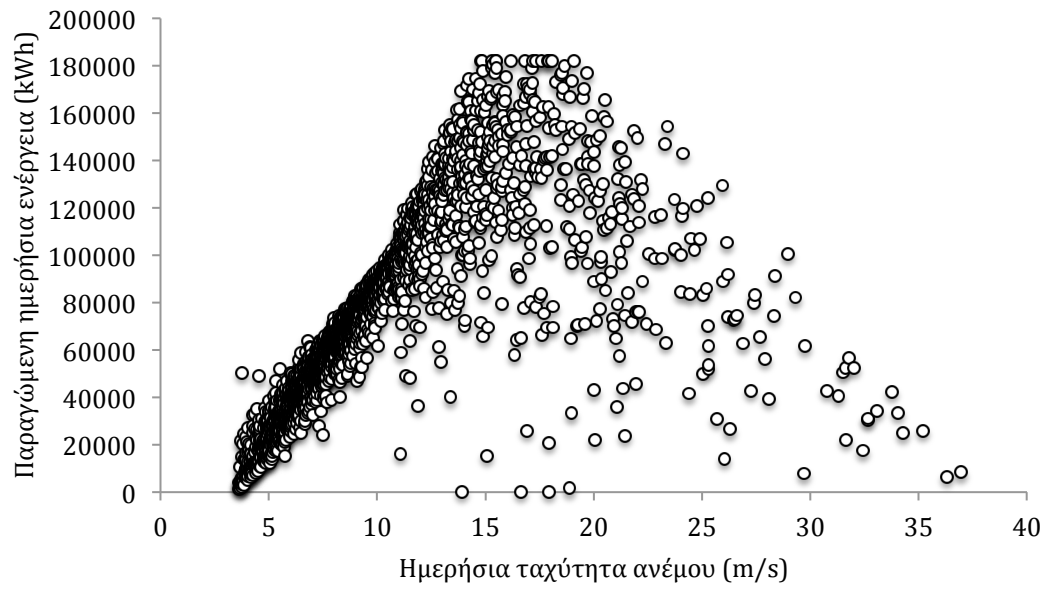
Κάποιες τιμές της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας προκύπτουν αρνητικές, αυτές τίθενται μηδέν, και κάποιες μεγαλύτερες από την μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας της ανεμογεννήτριας $7.58 \text{ MW} * 24 \text{ h} = 181.92 \text{ MWh}$ οι οποίες τίθενται 181.92 MWh . Επίσης οι σχέσεις που περιγράφουν την μεταβολή της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και του συντελεστή ασυμμετρίας ορίζονται για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες ή ίσες του τρία, για ταχύτητες ανέμου μικρότερες θεωρείται πως δεν παράγεται ενέργεια.

Χρησιμοποιώντας τις ημερήσιες μέσες ταχύτητες ανέμου από τον σταθμό του Αγίου Κοσμά υπολογίστηκαν με την παραπάνω μέθοδο οι ημερήσιες παραγόμενες ενέργειες. Ο λόγος της συνολικής παραγόμενης ενέργειας υπολογισμένης με την παραπάνω μέθοδο προς την συνολική παραγόμενη ενέργεια υπολογισμένη με χρήση των ωριαίων μέσων ταχυτήτων ανέμου ήταν – κάνοντας αρκετές δοκιμές για τον έλεγχο της επίδρασης της τυχαίας πιθανότητας – πάντα σχεδόν ένα. Το Σχήμα 6.6 - παρατίθεται ξανά για λόγους άμεσης σύγκρισης - απεικονίζει την ημερήσια παραγόμενη ενέργεια που προκύπτει από τις μέσες ωριαίες ταχύτητες ανέμου ενώ στο Σχήμα 6.7 απεικονίζεται η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε.

Με χρήση των παραπάνω υπολογίζεται η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια από μία ανεμογεννήτρια για τις μέσες ημερήσιες ταχύτητες ανέμου της συνθετικής χρονοσειράς που χρησιμοποιείται στο σύστημα.



Σχήμα 6.6 Η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας - όπως προκύπτει από τις ωριαίες μέσες ταχύτητες ανέμου των καταγραφών του σταθμού.



Σχήμα 6.7 Η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας όπως προκύπτει από τις ημερήσιες μέσες ταχύτητες ανέμου των καταγραφών του σταθμού με χρήση της μεθοδολογίας που περιγράφηκε.

7 Ηλιακή ενέργεια

7.1 Εισαγωγή²

Ο ήλιος είναι μια πυρακτωμένη αεριώδης μάζα που αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο. Στον πυρήνα του ήλιου γίνονται θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, από όπου προέρχεται η ηλιακή ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στην επιφάνεια μέσω της ακτινοβολίας ή μέσω της κατακόρυφης μεταφοράς υδρογόνου. Η μέση απόσταση του ήλιου με την γη είναι $149.5 \cdot 10^6$ km ενώ η ηλιακή σταθερά είναι 1367 W/m^2 .

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα, από το ύψος και το αζιμούθιο του ηλίου που είναι συνάρτηση του χρόνου (ώρα, ημέρα) και του γεωγραφικού πλάτους, από την νεφοκάλυψη και την δομή της ατμόσφαιρας. Η ακτινοβολία χωρίζεται στην άμεση, που είναι η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς να σκεδαστεί στην ατμόσφαιρα και την διάχυτη που ορίζεται ως η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνση της λόγω ανάκλασης ή σκέδασης της στην ατμόσφαιρα.

Υπάρχουν διάφορα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας με και χωρίς χρήση μηχανικών μέσων. Τα ηλιακά ηλεκτρικά πλαίσια είναι ένα σύστημα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας που αποτελείται από μια διάταξη ή σύνολο διατάξεων που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα αυτό αναφέρεται και ως φωτοβολταϊκό σύστημα. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο κατασκευάζεται συνήθως από άμορφο ή κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά όπως το Κάδμιο - Τελλούριο και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός.

Ως βαθμός απόδοσης νοείται το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η απόδοση των πρώτων φωτοβολταϊκών στοιχείων τον 19ο αιώνα ήταν 1-2% ενώ σήμερα η απόδοση κυμαίνεται στο 13-15%.

² Το υποκεφάλαιο αυτό αποτελεί σύμπτυξη του Μαμάσης Ν. (2010)

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια άφθονη πηγή ενέργειας που είναι δωρεάν ενώ κατά την διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν παράγονται ρύποι. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν αθόρυβη λειτουργία και μικρό κόστος συντήρησης. Μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος απόκτησης των φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδυασμένο με την χαμηλή απόδοσή τους.

7.2 Υπολογισμός εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας

Χρησιμοποιώντας την υπολογιστική διαδικασία που ανέπτυξε η Κολλάρου (2011) υπολογίζεται η ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία - δηλαδή η ροή ηλιακής ενέργειας στο όριο της ατμόσφαιρας - για επίπεδα διάφορων κλίσεων. Οι απαραίτητες είσοδοι για τον υπολογισμό είναι το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της τοποθεσίας που εξετάζεται, η κλίση και ο προσανατολισμός της επιφάνειας. Ως αποτέλεσμα δίνεται η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία για κάθε ώρα της ημέρας για όλες τις ημέρες του χρόνου, από όπου υπολογίζεται η ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για το γεωγραφικό πλάτος και μήκος του επιλεγμένου σταθμού (37.89N 23.71W) με προσανατολισμό της επιφάνειας 180° από τον Βορρά και για διάφορες γωνίες κλίσης. Στον Πίνακα 7.1 απεικονίζεται το σύνολο της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επίπεδα με κλίσεις από 26° έως 38° με βήμα 2° σε διάρκεια ενός έτους.

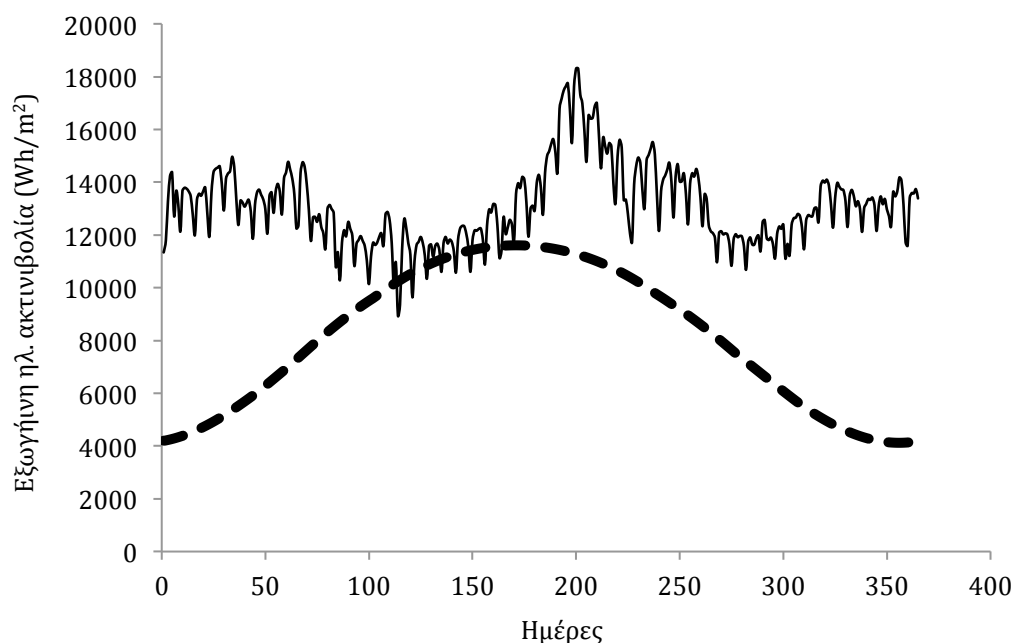
Πίνακας 7.1 Συνολική ηλιακή ακτινοβολία (Wh/m²) σε διάρκεια ενός έτους.

Γωνίες κλίσης (μοίρες)						
26	28	30	32	34	36	38
3 585 926	3 609 312	3 628 591	3 643 870	3 654 738	3 661 154	3 663 108

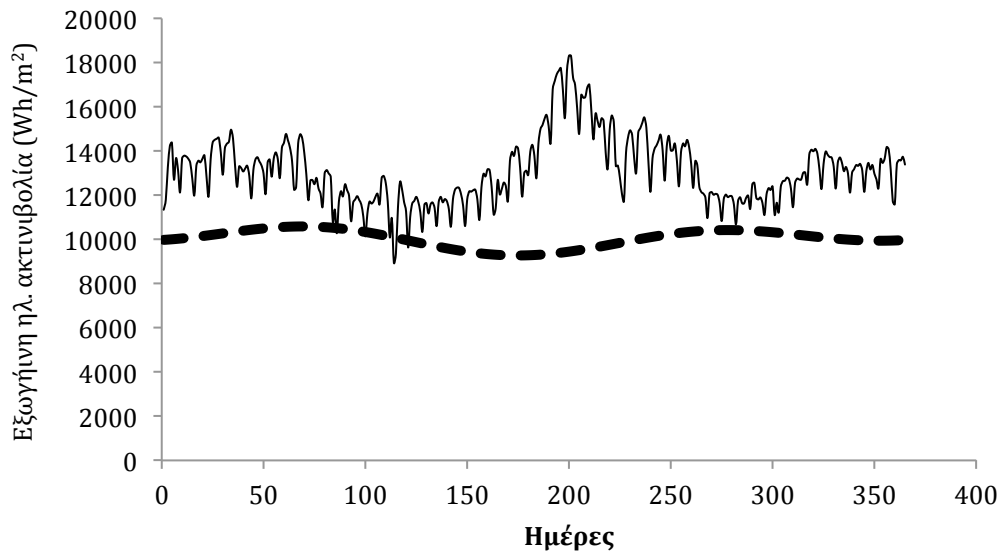
Η γωνία τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.1, στην οποία προσπίπτει η μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας - για το επιλεγμένο γεωγραφικό πλάτος και μήκος - είναι η γωνία των 38°. Στο Σχήμα 7.1 απεικονίζεται η προσπίπτουσα ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία για την γωνία των 38° και στο Σχήμα 7.2 για την γωνία των 0° ενώ και στα δύο σχήματα απεικονίζεται η ημερήσια ζήτηση ενέργειας. Σημειώνεται πως τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις άλλες κλίσεις επιπέδου που εξετάστηκαν βρίσκονται στο Παράρτημα Δ.

Η γωνία κλίσης του επιπέδου επηρεάζει το σύνολο της ηλιακής προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλλά και την κατανομή της στον χρόνο. Για παράδειγμα παρατηρείται πως για την γωνία των 38° – που μεγιστοποιείται η συνολική ηλιακή ακτινοβολία – στην περιοχή αιχμής της ζήτησης ενέργειας η καμπύλη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κάνει κοίλη, αντίθετα με την μικρότερη γωνία. Ταυτόχρονα η γωνία 0° έχει πολύ χαμηλή απόδοση τους χειμερινούς μήνες ενώ η ηλιακή ακτινοβολία που αντιστοιχεί στην γωνία των 38° δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις κατά την διάρκεια ενός έτους.

Η χρονική αναντιστοιχία παραγωγής-ζήτησης ενέργειας μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη κατασκευής ταμιευτήρα μεγαλύτερης χωρητικότητας. Επομένως για το αντικείμενο της βελτιστοποίησης, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του κόστους, του υβριδικού σταθμού δεν είναι δυνατός ο εκ των προτέρων προσδιορισμός της γωνίας τοποθέτησης των ηλιακών πάνελ. Στο μοντέλο προσομοίωσης θα εξεταστούν γωνίες κλίσης φωτοβολταϊκού στοιχείου από 26° έως 38° με βήμα 2° .



Σχήμα 7.1 Με την συνεχή γραμμή απεικονίζεται η κατανάλωση ενέργειας τις ημέρες του χρόνου ενώ με διακεκομμένη η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 0° .



Σχήμα 7.2 Με την συνεχή γραμμή απεικονίζεται η κατανάλωση ενέργειας τις ημέρες του χρόνου ενώ με διακεκομμένη η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 38°.

7.3 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος είναι μικρότερη από την εξωγήινη αφού ένα μέρος της απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Για τον προσδιορισμό του μεγέθους αυτού απαιτείται να υπολογιστεί η αστρονομική διάρκεια ημέρας N , δηλαδή ο αριθμός των ωρών από την ανατολή έως την δύση του ηλίου. Αρχικά προσδιορίζεται η ηλιακή απόκλιση δ (rad), που είναι το γεωγραφικό πλάτος όπου οι ακτίνες πέφτουν κάθετα το μεσημέρι :

$$\delta = -0.409 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J + 0.16\right) \quad (7.1)$$

όπου J ο αριθμός της ημέρας με $J=1$ την 1^η Ιανουαρίου και $J=365$ την 31^η Δεκεμβρίου. Στην συνέχεια προσδιορίζεται η γωνία ώρας δύσης ω_s (rad) του ηλίου :

$$\omega_s = \sin^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (7.2)$$

όπου φ το γεωγραφικό πλάτος σε rad ενώ για $|\varphi| > 1.161 \text{ rad} = 66.5^\circ$ δεν ορίζεται καθώς στα πλάτη αυτά δεν δύει ο ήλιος. Τελικά η αστρονομική διάρκεια ημέρας N (h) προκύπτει ως εξής:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (7.3)$$

Οι καταγραφές της διάρκειας ηλιοφάνειας n μίας ημέρας είναι προφανώς πάντα μικρότερες ίσες της αστρονομικής διάρκειας ημέρας N . Ορίζεται έτσι η σχετική ηλιοφάνεια ως ο λόγος n/N , ο λόγος δηλαδή της διάρκειας ηλιοφάνειας προς την αστρονομική διάρκεια ημέρας που κυμαίνεται μεταξύ μηδέν και ένα.

Για να υπολογιστεί η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος χρησιμοποιείται ο αδιάστατος συντελεστής απορρόφησης της ατμόσφαιρας f_s , που είναι ο λόγος της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος προς την εξωγήινη ακτινοβολία. Ο συντελεστής προκύπτει ως εξής:

$$f_s = a_s + b_s * \frac{n}{N} \quad (7.4)$$

όπου a_s , b_s συντελεστές με τυπικές τιμές – οι οποίες χρησιμοποιούνται - $a_s=0.25$, $b_s=0.5$ και n / N η σχετική ηλιοφάνεια όπως προαναφέρθηκε. Τελικά η ακτινοβολία S_n που φτάνει στο έδαφος είναι :

$$S_n = S_o * f_s \quad (7.5)$$

όπου S_o η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (Κουτσογιάννης 2000). Με χρήση των συνθετικών χρονοσειρών διάρκειας ηλιοφάνειας n που δημιουργήθηκαν (Κεφάλαιο 5) υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος, με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, για γωνίες κλίσης πάνελ 26° - 38° .

7.4 Υπολογισμός της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας

Οι κατασκευαστές διενεργούν δοκιμές στα ηλιακά πάνελ με βάση το STC (standard test conditions), δηλαδή με ακτινοβολία 1000 W/m^2 , $AM=1.5$ και θερμοκρασία

πάνελ 25°C. Από τις μετρήσεις σε συνθήκες STC προκύπτει η ισχύς Pmax (Wpeak) του ηλιακού πάνελ η οποία στην πραγματικότητα είναι η ισχύς που αποδίδεται από το πάνελ για τις παραπάνω συνθήκες και όχι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει. Στην πιλοτική εφαρμογή θεωρήθηκε ηλιακό πάνελ με ισχύ 280 Wp σε συνθήκες STC.

Ο υπολογισμός της ενέργειας SE (Wh) που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ γίνεται με χρήση της:

$$SE = S_n * \frac{P_{max}}{1000} * n \quad (7.6)$$

όπου S_n (Wh/m²) η ηλιακή ακτινοβολία, Pmax (Wp) η αποδιδόμενη ισχύς σε συνθήκες STC και n ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάνελ που λαμβάνεται ίσος με 0.85.

8 Υδροηλεκτρική ενέργεια και ταμιευτήρες

8.1 Εισαγωγή³

Υδροηλεκτρική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια του νερού το οποίο μέσω υδατοπτώσεων κινεί υδροστροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Είναι μια μορφή ενέργειας που αξιοποιείται από την αρχαιότητα μέσω των υδρόμυλων για το άλεσμα των δημητριακών και την κοπή ξυλείας. Ειδικά στην Ελλάδα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς υδροηλεκτρικών έργων είναι 3 060 MW με μέση συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 8-10%.

Τα έργα για την αξιοποίηση της υδροηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής, πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, και μεγάλη αξιοπιστία και κάλυψη των αιχμών της ζήτησης. Επιπρόσθετα οφέλη προκύπτουν από τις υποδομές που αναπτύσσονται όπως άρδευση, ύδρευση, αντιπλημμυρική προστασία. Ως Α.Π.Ε. παρουσιάζει μηδενικές εκπομπές ρύπων - με μεγάλο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις άλλες Α.Π.Ε. – ενώ η δημιουργία υδροβιότοπου, μέσω των ταμιευτήρων, οδηγεί στην αναβάθμιση του τοπίου και πολλές φορές σε ανάπτυξη δραστηριοτήτων όπως αλιεία, περιβαλλοντική εκπαίδευση, εναλλακτικός τουρισμός κ.α.

Φυσικά, πιθανή είναι η οικολογική υποβάθμιση ως αποτέλεσμα της κατασκευής μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων όπως η οπτική όχληση, η υποβάθμιση της χλωρίδας και πανίδας (αποψίλωση της βλάστησης, εμπόδια στην κίνηση της ιχθυοπανίδας κ.α.), ανύψωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, μεταβολή στην κοίτη του ποταμού.

Μια άλλη εφαρμογή, λιγότερο συχνή, είναι αυτή της άντλησης-ταμίευσης που απαιτεί όμως έναν επιπλέον ταμιευτήρα και αντλίες σε σύγκριση με τα συνηθισμένα υδροηλεκτρικά έργα. Με αυτό το σύστημα όταν παρουσιάζεται περίσσεια ενέργειας, λόγω ανελαστικότητας της παραγωγής της, χρησιμοποιείται για άντληση του νερού

³ Το υποκεφάλαιο αυτό αποτελεί σύμπτυξη του Μαμάσης Ν. (2011)

από τον κατάντη ταμιευτήρα στον ανάντη. Είναι δυνατή έτσι η αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα άρα και ο περιορισμός της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής με την ζήτηση. Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας έχει χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτροδοτικά δίκτυα με αδυναμία περιορισμού της παραγωγής με την μείωση της ζήτησης το βράδυ και σε Α.Π.Ε. όπου το μέγεθος και ο χρόνος παραγωγής ενέργειας δεν μπορεί να προσδιορισθεί εκ των προτέρων.

Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή ενός έργου αποθήκευσης της ενέργειας αφού στόχος είναι η κάλυψη της ζήτησης κάτι που δεν μπορεί να εξασφαλιστεί από τις αιολικές μηχανές και τα φωτοβολταϊκά πάνελ δεδομένου ότι η παραγωγή από τις πηγές αυτές είναι τυχαία και δεν μπορεί να προγραμματιστεί. Ο τρόπος αποθήκευσης που επιλέχθηκε είναι της άντλησης-ταμίευσης.

8.2 Περιγραφή του συστήματος των δύο ταμιευτήρων

Όπως έχει αναφερθεί θεωρείται πως ο ανάντη και ο κατάντη ταμιευτήρας έχουν την ίδια χωρητικότητα και τα ίδια χαρακτηριστικά. Επίσης υπενθυμίζεται πως αμελούνται οι εισροές και οι εκροές στους ταμιευτήρες δηλαδή θεωρείται σταθερή η ποσότητα του νερού που υπάρχει σε αυτούς. Η παραγωγή ενέργειας καθώς και η άντληση γίνεται από έναν αντλιοστρόβιλο. Θεωρείται πως ο νεκρός όγκος ΝΟ του ταμιευτήρα είναι :

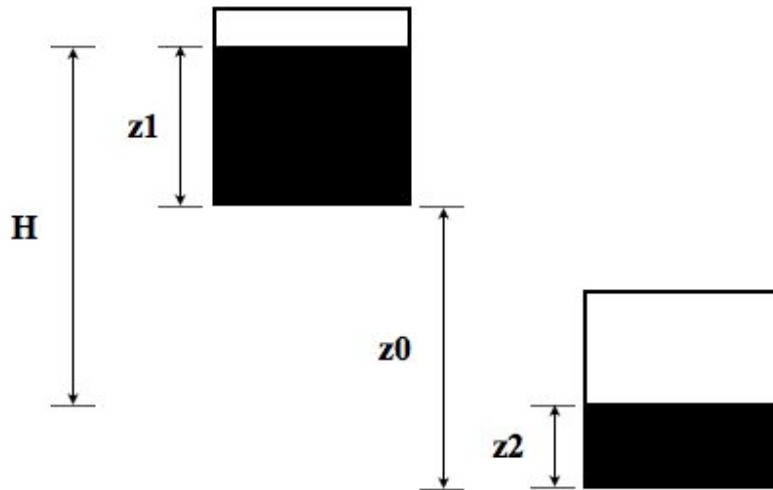
$$NO = 0.2 * k \quad (8.1)$$

όπου k είναι η συνολική χωρητικότητα του ενός ταμιευτήρα. Επομένως ο συνολικός όγκος νερού στους δύο ταμιευτήρες είναι $1.2 * k$.

Επιλέγεται η υψομετρική διαφορά των πυθμένων των δύο ταμιευτήρων $z_0 = 200$ m. Η υψομετρική διαφορά H των επιφανειών νερού των δύο ταμιευτήρων ορίζεται από:

$$H = z_0 + z_1 - z_2 \quad (8.2)$$

όπου z_1 και z_2 είναι το ύψος του νερού στον ανάντη και κατάντη ταμιευτήρα αντίστοιχα (Σχήμα 8.1).



Σχήμα 8.1 Σκαρίφημα περιγραφής της υψομετρικής διαφοράς H των επιφανειών νερού των δύο ταμιευτήρων.

8.3 Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας και απαιτούμενης ενέργειας άντλησης

Η ενέργεια E (Wh) που παράγεται από τον υδροστρόβιλο προκύπτει από:

$$E = \frac{\rho * g * V * H * n * 2.77778}{10\,000} \quad (8.3)$$

Η ενέργεια E (Wh) που απαιτείται ώστε να αντληθεί μια ποσότητα νερού V (m^3) προκύπτει από:

$$E = \frac{\rho * g * V * H * 2.77778}{10\,000 * n} \quad (8.4)$$

όπου ρ η πυκνότητα του νερού $1\,000$ (kg / m^3), g η επιτάχυνση της βαρύτητας 9.81 (m / s^2), V (m^3) ο όγκος του νερού που διέρχεται από τον αντλιοστρόβιλο, H (m) η υψομετρική διαφορά και n ο συνολικός βαθμός απόδοσης που λαμβάνεται ίσος με 0.85 .

8.4 Συσχέτιση βασικών μεγεθών του ταμιευτήρα

Ο προσδιορισμός του ύψους του νερού στον ταμιευτήρα σε κάθε χρονικό βήμα είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας ή της ενέργειας άντλησης. Θεωρείται η παρακάτω σχέση του υψομέτρου του νερού στον ταμιευτήρα z (m) με τον όγκο του αποθηκευμένου νερού s (m³):

$$s = k * \left(\frac{z}{z_{max}}\right)^\zeta \quad (8.7)$$

(Koutsoyiannis & Economou, 2003) όπου z_{max} το μέγιστο ύψος νερού στον ταμιευτήρα και ζ σταθερά η οποία λαμβάνεται ίση με το τρία. Πρέπει επομένως να είναι δυνατός ο προσδιορισμός του z_{max} για τις διάφορες χωρητικότητες ταμιευτήρα. Επίσης πρέπει να είναι εφικτός ο υπολογισμός του κόστους κατασκευής του ταμιευτήρα για τους διάφορους όγκους που εξετάζονται.

Για το λόγο αυτό δημιουργούνται δύο σχέσεις που περιγράφουν την αλλαγή των μεγεθών του ταμιευτήρα που αναφέρθηκαν συναρτήσει του όγκου του. Για τον σκοπό αυτό συλλέχτηκαν - από ταμιευτήρες κατασκευασμένους στην Ελλάδα – δεδομένα τα οποία αφορούσαν το έτος κατασκευής, το ύψος φράγματος, τον όγκο του ταμιευτήρα και το κόστος κατασκευής. Κύρια πηγή ήταν η Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ΕΕΜΦ, <http://www.eemf.gr>) .

8.4.1. Συσχέτιση μέγιστου ύψους και χωρητικότητας ταμιευτήρα

Από του ταμιευτήρες για τους οποίους υπήρχαν στοιχεία, για τον προσδιορισμό της σχέσης μέγιστου ύψους ταμιευτήρα-όγκου ταμιευτήρα, επιλέχθηκαν εκείνοι με όγκο μεγαλύτερο των 2 500 000 m³. Μικρότεροι όγκοι ταμιευτήρα δεν προκύπτουν σε έργο της κλίμακας που εξετάζεται ενώ πιθανόν να αλλοίωναν την συσχέτιση των μεγεθών στους μεγαλύτερους όγκους. Τα στοιχεία των ταμιευτήρων που επιλέχθηκαν απεικονίζονται στον Πίνακα 8.1. Η συσχέτιση των δύο μεγεθών γίνεται με χρήση της:

$$z_{max} = 0.533 * k^{0.27} \quad (8.5)$$

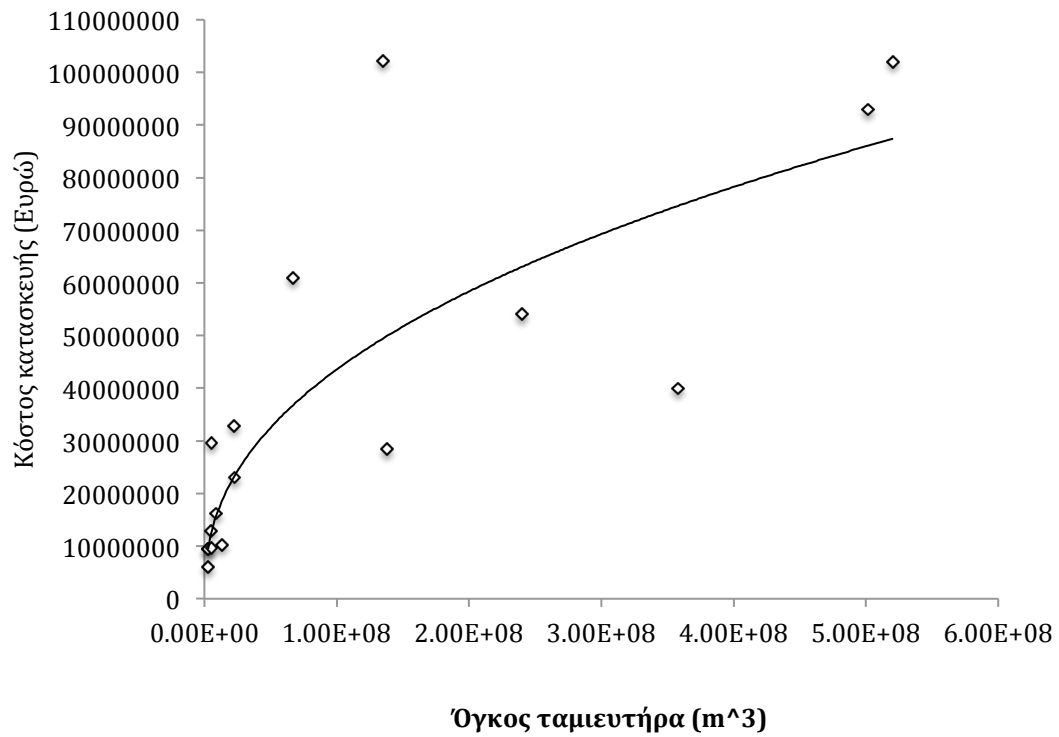
όπου z_{\max} (m) είναι το μέγιστο ύψος ταμιευτήρα και k (m^3) είναι ο όγκος του. Στο Σχήμα 8.2 απεικονίζεται η καμπύλη της σχέσης μέγιστου ύψους ταμιευτήρα - όγκου ταμιευτήρα που έχει επιλεχθεί καθώς και η συσχέτιση $z_{\max} - k$ των ταμιευτήρων από τους οποίους προέκυψε η παραπάνω σχέση.

Πίνακας 8.1 Απεικονίζονται τα στοιχεία των ταμιευτήρων που χρησιμοποιήθηκαν για την συσχέτιση όγκου-μέγιστου ύψους ταμιευτήρα.

Όνομα φράγματος	Ύψος ταμιευτήρα (m)	Όγκος m^3	Όνομα φράγματος	Ύψος ταμιευτήρα (m)	Όγκος m^3
Αγ. Βαρβάρα	20	3 000 000	Μαράθι	30	2 950 000
Αγιονέρι	48	15 380 000	Μαραθώνα	54	41 000 000
Απολακιά	39	8 100 000	Μαρμαρά	50	5 000 000
Αποσελέμη	62	36 200 000	Μεσοχώρα	150	358 000 000
Αρτζάν-Αμάτοβο	10	8 600 000	Μπραμιανός	44	16 400 000
Ασώματα	52	53 000 000	Παπαδιά	67	14 000 000
Βαλσαμιώτη	66	5 000 000	Περδίκας	30	10 000 000
Γαδουρά	67	67 000 000	Πηγές Αώου	78	180 000 000
Γρατινή	53	12 800 000	Πηγή Παιονίας / Μεταλλείο	38	2 750 000
Γυρτώνη	16	5 000 000	Πηνειός Ηλείας	50	420 000 000
Δαφνοζωνάρα	28	2 550 000	Πλακιώτισσας	53	18 600 000
Ερεσσός	41	2 755 000	Πλατανόβρυση	95	57 000 000
Εύηνος	127	138 000 000	Ποταμών Ν.Ρεθύμνης (Αμαρίου)	55	22 500 000
Ιλαρίωνας	130	520 000 000	Πουρνάρι II	15	4 500 000
Ιασίου	52.5	22 600 000	Πραμόριτσα	57	5 586 000
Καλαμωτής-Κατράρη	40	5 000 000	Σμόκοβο	109	240 000 000
Καλύβα-Κομαρών, ρέμα	39	8 500 000	Συκιά	170	502 000 000
Κόρης Γεφύρι	41	3 080 000	Σφηκιά	82	99 000 000
Λάδωνας	56	57 600 000	Φενεός (Δόξα Φενεού)	56	5 300 000
Κρητηνία	41	12 990 000	Φιλιατρινό	55	9 000 000

Πίνακας 8.2 Απεικονίζονται τα στοιχεία των ταμιευτήρων που χρησιμοποιήθηκαν για την συσχέτιση όγκου-κόστους κατασκευής ταμιευτήρα.

Όνομα φράγματος	Έτος Κατασκευής	Όγκος (hm ³)	Επικαιροποιημένο Κόστος Κατασκευής (εκ. Ευρώ)
Αρτζάν-Αμάτοβο	2009	8.6	16.3
Γαδουρά	2007	67	61
Ερεσσός	2002	2.7	9.4
Εύηνος	2001	138	28.4
Ιασίου	2011	22.6	23
Ιλαρίωνας	2009	520	102
Κάρλα	2010	135	102.3
Λευκόγεια	1994	12.99	10.2
Μαράθι	1992	2.95	9.4
Μαρμαρά	2010	5	12.9
Μεσοχώρα	2009	358	39.9
Πηγή Παιονίας / Μεταλλείο	1999	2.75	5.9
Ποταμών Ν.Ρεθύμνης (Αμαρίου)	2008	22.5	32.8
Πραμόριτσα	2007	5.59	29.6
Σμόκοβο	1996	240	54.1
Συκιά	1996	502	92.9
Φενεός (Δόξα Φενεού)	1996	5.3	9.6



Σχήμα 8.3 Η συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στη $k_d = 18\,222 \cdot k^{0.42}$. Με ♦ συμβολίζεται η συσχέτιση $k_d - k$ των ταμιευτήρων που χρησιμοποιήθηκαν.

9 Οικονομική ανάλυση

9.1 Εισαγωγή

Για τον υπολογισμό του κόστους έγιναν απλοποιητικές παραδοχές που όμως προσεγγίζουν – κατά το δυνατό – την πραγματικότητα. Σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται το αρχικό κεφάλαιο που θα χρειαστεί για την απόκτηση και τοποθέτηση του απαραίτητου εξοπλισμού ή την κατασκευή έργων, την αντικατάσταση του εξοπλισμού εάν αυτή χρειάζεται καθώς και το κόστος συντήρησης. Ο ωφέλιμος χρόνος ζωής του υβριδικού σταθμού είναι τα 50 χρόνια, ως χρόνος απόσβεσης επιλέγονται επίσης τα 50 χρόνια και το αποπληθωρισμένο επιτόκιο i λαμβάνεται 6%.

Η αναγωγή σε αρχικό κόστος P που πρέπει να γίνει για τα κεφάλαια F που δαπανούνται υστέρτα από την αρχή της λειτουργίας του έργου γίνεται με τον εξής τύπο :

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (9.1)$$

όπου n τα έτη που μεσολαβούν από την αρχή μέχρι την εκταμίευση του ποσού. Η αναγωγή του αρχικού κόστους P σε ετήσια δαπάνη A υπολογίζεται με τον εξής τύπο :

$$A = \frac{P \cdot i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (9.2)$$

όπου n ο χρόνος απόσβεσης. (Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης, 2007)

9.2 Εκτίμηση κόστους

9.2.1 Κόστος ανεμογεννητριών

Θεωρήθηκε ως αντιπροσωπευτικό κόστος απόκτησης και εγκατάστασης ανεμογεννητριών το 1 150 000 Ευρώ ανά MW εγκατεστημένης ισχύος. Θεωρώντας ως χρόνο ζωής των ανεμογεννητριών τα 25 χρόνια, πρέπει να αντικατασταθούν μία

φορά στην διάρκεια του ωφέλιμου χρόνου ζωής του συνολικού έργου. Η επιλεγμένη αολική μηχανή έχει ισχύ 7.58 MW. Άρα το συνολικό κόστος απόκτησης και εγκατάστασης κ_w (Ευρώ) υπολογίζεται ως εξής :

$$\kappa_w = n_w * 7.58 * 1\,150\,000 + \frac{(n_w * 7.58 * 1\,150\,000)}{(1+i)^{25}} \quad (9.3)$$

όπου n_w ο αριθμός των ανεμογεννητριών. Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμάται πως αποτελεί το 2% του αρχικού κόστους. Επομένως το συνολικό κόστος συντήρησης κ_{ws} (Ευρώ) στον ωφέλιμο χρόνο ζωής του έργου προκύπτει από το άθροισμα:

$$\kappa_{ws} = \sum_{v=1}^{50} \frac{n_w * 7.58 * 1\,150\,000 * 0.02}{(1+i)^v} \quad (9.4)$$

9.2.2 Κόστος ηλιακών πάνελ

Όσον αφορά τα ηλιακά πάνελ η εξέλιξη της τεχνολογίας αλλά και η διείσδυση των ανερχόμενων οικονομιών στην συγκεκριμένη βιομηχανία έχει ως αποτέλεσμα την επικράτηση καθοδικής τάσης στις τιμές. Η έντονη μεταβλητότητα των τιμών τους καθιστά δυσκολότερη την εκτίμηση. Παρόλα αυτά το ποσό των 2 000 000 ευρώ ανά MW εγκατεστημένης ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως μία ασφαλής προσέγγιση. Με χρόνο ζωής ηλιακών πάνελ 25 χρόνια και ωφέλιμο χρόνο ζωής του συνολικού έργου 50 χρόνια θα πρέπει τα πάνελ αυτά να αντικατασταθούν μία φορά. Το επιλεγμένο φωτοβολταϊκό πάνελ έχει ισχύ 280 Wp. Έτσι το συνολικό κόστος απόκτησης και εγκατάστασης κ_s (Ευρώ) υπολογίζεται από την σχέση:

$$\kappa_s = n_s * 280 * 10^{-6} * 2\,000\,000 + \frac{(n_s * 280 * 10^{-6} * 2\,000\,000)}{(1+i)^{25}} \quad (9.5)$$

όπου n_s ο αριθμός των ηλιακών πάνελ. Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμάται πως αποτελεί το 1% του αρχικού κόστους. Επομένως το συνολικό κόστος συντήρησης κ_{ss} (Ευρώ) στον ωφέλιμο χρόνο ζωής του έργου προκύπτει ότι είναι:

$$\kappa_{ss} = \sum_{v=1}^{50} \frac{n_s * 280 * 10^{-6} * 2\,000\,000 * 0.01}{(1+i)^v} \quad (9.6)$$

9.2.3 Κόστος ταμιευτήρων

Το κόστος κατασκευής του ταμιευτήρα όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 8 προκύπτει από την σχέση:

$$\kappa_d = 18\,222 * k^{0.42} \quad (9.7)$$

αφού θεωρείται πως ο χρόνος ζωής του ταμιευτήρα είναι 50 χρόνια. Θα κατασκευαστούν όμως δύο ταμιευτήρες άρα το τελικό κόστος κατασκευής θα είναι :

$$\kappa'_d = 18\,222 * k^{0.42} * 2 \quad (9.8)$$

Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμάται πως αποτελεί το 0.5% του αρχικού κόστους. Άρα το συνολικό κόστος συντήρησης κ_{ds} (Ευρώ) στον ωφέλιμο χρόνο ζωής του έργου προκύπτει ότι θα είναι:

$$\kappa_{ds} = \sum_{v=1}^{50} \frac{\kappa'_d * 0.005}{(1+i)^v} \quad (9.9)$$

9.2.4 Κόστος αντλιοστρόβιλου

Η εκτίμηση του κόστους του αντλιοστρόβιλου κ_a (Ευρώ) προσδιορίστηκε έπειτα από προσωπική επικοινωνία με τον Ι. Στεφανάκο όπως έχει χρησιμοποιηθεί σε δικές του ερευνητικές εργασίες με βάση την εγκατεστημένη ισχύ της αντλίας και την μέγιστη παροχή άντλησης του αντλιοστρόβιλου. Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.1.

Με χρήση των τιμών του Πίνακα 9.1 υπολογίζεται το κόστος ως εξής :

$$\kappa_a = 470 * \max_a + 5000 * \max_q + \frac{470 * \max_a + 5000 * \max_q}{(1+i)^{25}} \quad (9.10)$$

όπου \max_a είναι η μέγιστη ισχύς της αντλίας σε kW και \max_q η μέγιστη παροχή που θα αντληθεί σε m³/s. Ο χρόνος ζωής του αντλιοστρόβιλου θεωρείται 25 χρόνια.

Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμάται πως αποτελεί το 1% του αρχικού κόστους. Άρα το συνολικό κόστος συντήρησης κ_{as} (Ευρώ) στον ωφέλιμο χρόνο ζωής του έργου προκύπτει ότι είναι:

$$\kappa_{as} = \sum_{v=1}^{50} \frac{(470 \cdot \max_a + 5000 \cdot \max_q) \cdot 0.01}{(1+i)^v} \quad (9.11)$$

Πίνακας 9.1 Κόστη αντλιοστροβίλου

Κύριος Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	300 €/KW εγκατεστημένης ισχύος
Βοηθητικός Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	120 €/KW εγκατεστημένης ισχύος
Σταθμός Παραγωγής (εκσκαφή-δομικά-αρχιτεκτονικά)	50 €/KW εγκατεστημένης ισχύος
Λοιπός Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	5.000 €/ m ³ /s μέγιστης παροχής

9.2.5 Συνολική ετήσια δαπάνη

Η συνολική ετήσια δαπάνη κ_{ε} (Ευρώ) του συνολικού κόστους για τον επιλεγμένο χρόνο απόσβεσης - 50 χρόνια - είναι :

$$\kappa_{\varepsilon} = \frac{(\kappa_w + \kappa_s + \kappa'_a + \kappa_{\alpha} + \kappa_{ws} + \kappa_{ss} + \kappa_{ds} + \kappa_{as}) \cdot i \cdot (1+i)^{50}}{(1+i)^{50} - 1} \quad (9.12)$$

10 Αλγόριθμος προσομοίωσης της λειτουργίας και βελτιστοποίηση του συστήματος

10.1 Αλγόριθμος προσομοίωσης

Εκτελείται ένας αλγόριθμος που προσομοιώνει την λειτουργία του συστήματος σε κάθε ημερήσιο χρονικό βήμα, υπολογίζει τα βασικά μεγέθη του και καταγράφει την αστοχία εάν αυτή υπάρχει. Με χρήση των συνθετικών χρονοσειρών της μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου και της διάρκειας ηλιοφάνειας υπολογίζονται οι είσοδοι του αλγόριθμου. Αυτές είναι η ενέργεια που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια και από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ σε κάθε χρονικό βήμα αξιοποιώντας τις μεθοδολογίες που αναφέρθηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια. Είσοδο του αλγόριθμου επίσης αποτελεί και η συνθετική χρονοσειρά ζήτησης ενέργειας.

Προσδιορίζεται η ενέργεια που παράγεται στο σύστημα σε κάθε χρονικό βήμα, για ένα συνδυασμό πλήθους ανεμογεννητριών και ηλιακών πάνελ και όγκου ταμιευτήρα, πολλαπλασιάζοντας την είσοδο της ηλιακής και αιολικής ενέργειας με τον αριθμό των πάνελ και των ανεμογεννητριών αντίστοιχα. Ελέγχεται αν η παραγόμενη ενέργεια επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης. Εάν επαρκεί ή υπάρχει περίσσεια τότε δεν παρατηρείται αστοχία στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Εφόσον ο ανάντη ταμιευτήρας δεν είναι πλήρης αντλείται νερό από τον κατάντη στον ανάντη εξαντλώντας την επιπλέον ενέργεια εκτός εάν πληρωθεί ο ταμιευτήρας νωρίτερα. Στην περίπτωση που η παραγόμενη ενέργεια δεν επαρκεί διατίθεται υδροηλεκτρική ενέργεια – μέσω του ανάντη ταμιευτήρα. Εάν η αποθηκευμένη ενέργεια δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης τότε καταγράφεται αστοχία. Καταγράφονται επίσης η ισχύς που απαιτείται να έχει η αντλία και η μέγιστη παροχή που θα αντληθεί, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του κόστους του αντλιοστρόβιλου.

Ο όγκος του νερού V_a (m^3) που θα αντληθεί από μια ποσότητα ενέργειας E (Wh) προκύπτει από την σχέση (8.4) και είναι :

$$V_a = \frac{E * 10\,000 * n}{\rho * g * H * 2.77778} \quad (10.1)$$

Ο όγκος του νερού V_{π} (m³) που θα χρειαστεί ώστε να παραχθεί μια ποσότητα ενέργειας E (Wh) προκύπτει από την σχέση (8.3) και είναι :

$$V_{\pi} = \frac{E * 10\ 000}{n * \rho * g * H * 2.77778} \quad (10.2)$$

Το ύψος το νερού z (m) στον ταμιευτήρα όπως προκύπτει από την σχέση (7.7) και είναι :

$$z = \left(\frac{s}{k}\right)^{\frac{1}{\zeta}} * z_{max} \quad (10.3)$$

Όπως έχει αναφερθεί θεωρείται πως ο όγκος νερού που υπάρχει κάθε στιγμή στους δύο ταμιευτήρες είναι $1.2 * k$ άρα προφανώς το αποθηκευμένο νερό s_2 (m³) στον κατάντη ταμιευτήρα είναι :

$$s_2 = 1.2 * k - s \quad (10.4)$$

Παρατίθεται ο αλγόριθμος όπου SWE , SSE (Wh) είναι η συνολική παραγόμενη ενέργεια από το αιολικό και το ηλιακό πάρκο αντίστοιχα, n_w , n_s είναι ο αριθμός των ανεμογεννητριών και των ηλιακών πάνελ αντίστοιχα, RE (Wh) είναι η ζήτηση ενέργειας, in (m³) είναι η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στον ταμιευτήρα, L η αστοχία ενώ ο δείκτης δύο αναφέρεται στον κατάντη ταμιευτήρα.

$$SWE = WE * n_w$$

$$SSE = SE * n_s$$

if $(SWE + SSE) \geq RE$ then

$$\text{if } \frac{(SWE + SSE - RE) * n * 10\ 000}{\rho * g * (H) * 2.77778} > (k - s) \text{ then}$$

$$in = k - s$$

$$s = s + in$$

$$s_2 = k * 1.2 - s$$

$$Z = \left(\frac{S}{k}\right)^{\frac{1}{\zeta}} * Z_{max}$$

$$Z_2 = \left(\frac{S_2}{k}\right)^{\frac{1}{\zeta}} * Z_{max}$$

if $\max_a < \frac{(k-s)*\rho*g*(H)*2.77778}{10\,000*n*24}$ then

$$\max_a = \frac{(k-s)*\rho*g*(H)*2.77778}{10\,000*n*24}$$

end if

if $\max_q < \frac{in}{86400}$ then

$$\max_q = \frac{in}{86400}$$

end if

else

$$in = \frac{(SWE+SSE-RE)*n*10\,000}{\rho*g*(H)*2.77778}$$

$$s = s+in$$

$$s_2 = k*1.2-s$$

$$Z = \left(\frac{S}{k}\right)^{\frac{1}{\zeta}} * Z_{max}$$

$$Z_2 = \left(\frac{S_2}{k}\right)^{\frac{1}{\zeta}} * Z_{max}$$

if $\max_a < \frac{SWE+SSE-RE}{24}$ then

$$\max_a = \frac{SWE+SSE-RE}{24}$$

end if

if $\max_q < \frac{in}{86400}$ then

$$\max_q = \frac{in}{86400}$$

end if

end if

else

if $\frac{(RE-SWE-SSE)*10\,000}{n*\rho*g*(H)*2.77778} \leq (s - 0.2 * k)$ then

$$s = s - \frac{(RE-SWE-SSE)*10\,000}{n*\rho*g*(H)*2.77778}$$

$$s_2 = k*1.2-s$$

$$Z = \left(\frac{S}{k}\right)^{\frac{1}{\zeta}} * Z_{max}$$

```


$$z_2 = \left(\frac{s_2}{k}\right)^{\frac{1}{\zeta}} * z_{max}$$

else
  L = L + 1
end if
end if

```

Ο αλγόριθμος αυτός επαναλαμβάνεται 182 621 φορές, όσες και οι ημέρες των 500 χρόνων. Θεωρείται πως αρχικά ο ανάντη ταμιευτήρας έχει πληρωθεί κατά το ήμισυ $s = 0.5*k$ και άρα ο κατάντη $s_2 = 0.7*k$.

10.2 Βελτιστοποίηση

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης γίνεται με την μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων που βασίζονται στις αρχές της Βιολογικής Εξέλιξης και είναι χρήσιμοι σε πολυπαραμετρικά προβλήματα. Γεννούν έναν πληθυσμό λύσεων και υπολογίζουν την επίδοση κάθε λύσης με βάση την αντικειμενική συνάρτηση. Από αυτόν τον πληθυσμό χρησιμοποιούνται οι λύσεις που ικανοποιούν καλύτερα τα κριτήρια οι οποίες μεταλλάσσονται τυχαία δημιουργώντας έναν νέο πληθυσμό. Διατηρείται έτσι ένας πληθυσμός πιθανών λύσεων ο οποίος εξελίσσεται εφαρμόζοντας γενετικές διαδικασίες δημιουργώντας ένα νέο πληθυσμό που αντικαθιστά τον προηγούμενο με βάση την επίδοση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές ώστε να καταλήξει στην λύση που ικανοποιεί καλύτερα την αντικειμενική συνάρτηση. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός πως η λύση που προκύπτει από τον γενετικό αλγόριθμο δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη.

Αντικείμενο της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και συντήρησης του υβριδικού σταθμού - που εξαρτάται από τον αριθμό των ανεμογεννητριών και ηλιακών πάνελ καθώς και από τον όγκο των ταμιευτήρων - ενώ η αστοχία είναι μικρότερη ή ίση ενός ορίου, συγκεκριμένα του 100, σε όλο το μήκος προσομοίωσης. Για την επίτευξη της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης - η οποία είναι η κ_e (9.12) – ο γενετικός αλγόριθμος μεταβάλλει τον αριθμό των ανεμογεννητριών n_w και των ηλιακών πάνελ n_s καθώς και τον όγκο του

ταμειυτήρα k με τον περιορισμό η αστοχία να είναι μικρότερη ή ίση του 100. Για κάθε ένα συνδυασμό n_w, n_s, k που προκύπτει εκτελείται ο επαναληπτικός αλγόριθμος που παρατέθηκε στο κεφάλαιο 10.1 από όπου υπολογίζεται η αστοχία, η μέγιστη ισχύς άντλησης και η μέγιστη παροχή άντλησης. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τα n_w, n_s, k , την μέγιστη ισχύ άντλησης και την μέγιστη παροχή άντλησης υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Έπειτα από πολλές επαναλήψεις ο αλγόριθμος συγκλίνει σε μία λύση.

Για την εφαρμογή των παραπάνω χρησιμοποιείται το υπολογιστικό σύστημα “Solver” που συμπεριλαμβάνεται στο πρόγραμμα “Microsoft Excel”.

11 Ανάλυση σεναρίων

11.1 Σεσάρια δίχως περιρισμούς στον αριθμό των ανεμογεννητριών για διαφορετικές γωνίες τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Χρησιμοποιώντας τις συνθετικές χρονοσειρές με τις τιμές του συντελεστή Hurst που αντιστοιχούν στα φαινόμενα, έγινε η διαδικασία βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση του κόστους επτά φορές για διαφορετικές γωνίες κλίσεις ηλιακών πάνελ από 26° έως 38° με βήμα 2° . Και στα έξι σεσάρια προέκυψε πως η χρήση ηλιακών πάνελ δεν είναι συμφέρουσα, δηλαδή προέκυψε $n_s=0$. Πράγματι τα ηλιακά πάνελ είναι ακριβότερα - ως προς την εγκατεστημένη ισχύ - όμως δεν θα ήταν σωστό να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα πως είναι ασύμφορη η χρήση τους εκ των προτέρων. Όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3 αυτό εξαρτάται και από την διαθεσιμότητα της ενέργειας (ηλιακή ακτινοβολία), την κατανομή της στο χρόνο αλλά και την ετεροσυσχέτισή της με την ταχύτητα ανέμου. Στον Πίνακα 11.1 φαίνεται η μία κοινή λύση των επτά σεναρίων.

Πίνακας 11.1 Κοινή λύση των επτά σεναρίων με χρήση των συνθετικών χρονοσειρών με τους συντελεστές Hurst που αντιστοιχούν στα φαινόμενα

n_w	23	\max_a (MW)	124
n_s	0	\max_q (m ³ /s)	63
k (hm ³)	250	L	89
κ_ϵ (εκ. Ευρώ)		33.6	

Η εγκατεστημένη ισχύς της παραπάνω λύσης είναι περίπου 174 MW ενώ η ισχύς της αντλίας 124 MW. Υπενθυμίζεται πως η ανεμογεννήτρια έχει ισχύ 7.58 MW. Η συνολική ενέργεια που παράγεται είναι το 1.20 της ενέργειας που ζητείται. Η ενέργεια που δεν αξιοποιείται, δηλαδή η περίσσεια ενέργειας που δεν ήταν δυνατό να αποθηκευθεί, είναι το 0.10 της συνολικής παραγόμενης ενέργειας.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης επαναλήφθηκε με χρήση των χρονοσειρών με μειωμένο συντελεστή Hurst. Στον Πίνακα 11.2 φαίνεται η μία κοινή λύση των επτά σεναρίων. Ο αριθμός των ανεμογεννητριών που απαιτείται είναι ο ίδιος ενώ προκύπτει μικρότερος όγκος ταμιευτήρα. Η ενέργεια που παράγεται καθώς και η μη αξιοποιήσιμη ενέργεια είναι σχεδόν ίδιες με αυτές που προκύπτουν από τις

χρονοσειρές με τους συντελεστές Hurst που αντιστοιχούν στα φαινόμενα.

Πίνακας 11.2 Κοινή λύση των επτά σεναρίων με χρήση των συνθετικών χρονοσειρών με μειωμένο συντελεστή Hurst

n_w	23	\max_a (MW)	125
n_s	0	\max_q (m ³ /s)	62
k (hm ³)	195	L	100
κ_ϵ (εκ. Ευρώ)		32.8	

11.2 Σενάρια με περιορισμό στον αριθμό των ανεμογεννητριών για διαφορετικές γωνίες τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Εκτελέστηκαν ακόμα επτά σενάρια - χρησιμοποιώντας τις συνθετικές χρονοσειρές με τις τιμές του συντελεστή Hurst που αντιστοιχούν στα φαινόμενα - με τον περιορισμό ο αριθμός των ανεμογεννητριών n_w να είναι 12. Τα αποτελέσματα αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 11.3 . Οι λύσεις είναι παρόμοιες μεταξύ τους με βέλτιστες τις γωνίες 36° και 38°. Παρατηρείται πως σε όλες τις γωνίες κλίσης προκύπτουν 480 000 ηλιακά πάνελ με τον όγκο των ταμιευτήρων να μειώνεται με την αύξηση της γωνίας.

Η εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών σε όλα τα σενάρια είναι περίπου 91 MW ενώ η εγκατεστημένη ισχύς των ηλιακών πάνελ είναι περίπου 134 MW. Το ποσοστό συμμετοχής στην εγκατεστημένη ισχύ της ηλιακής ενέργειας είναι 0.60. Τα ποσοστά συμμετοχής στην συνολική παραγόμενη ενέργεια της ηλιακής ενέργειας κυμαίνονται στο 0.43 σε κάθε σενάριο. Σε όλους τους παραπάνω λόγους προφανώς το υπόλοιπο καλυπτεται από την αιολική ενέργεια. Ο λόγος της συνολικής παραγόμενης ενέργειας προς την συνολική ζήτηση ενέργειας είναι για όλα τα σενάρια περίπου 1.10. Το κλάσμα της ενέργειας που δεν αξιοποιείται, δηλαδή η περίσσεια ενέργειας που δεν ήταν δυνατό να αποθηκευθεί, με την συνολική παραγόμενη ενέργεια είναι, επίσης για όλα τα σενάρια, περίπου 0.05. Σε όλους τους παραπάνω λόγους οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων εμφανίζονται στο τρίτο δεκαδικό.

Πίνακας 11.3 Αποτελέσματα των σεναρίων με περιορισμό στον αριθμό των ανεμογεννητριών

Γωνίες κλίσης (μοίρες)	26	28	30	32	34	36	38
n_w	12	12	12	12	12	12	12
n_s	480 000	480 000	480 000	480 000	480 000	480 000	480 000
$k \text{ (hm}^3\text{)}$	160	150	140	135	130	125	125
$\max_a \text{ (MW)}$	76	76	76	76	76	76	76
$\max_q \text{ (m}^3\text{/s)}$	35	35	34	34	34	34	34
L	95	90	96	94	100	100	95
$\kappa_\epsilon \text{ (ΕΚ. Ευρώ)}$	44.4	44.2	44	43.9	43.8	43.7	43.7

11.3 Ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος στον εξυπηρετούμενο πληθυσμό

Για την γωνία κλίσης των 38° εκτελέσθηκαν τρία επιπλέον σεσάρια - χρησιμοποιώντας τις συνθετικές χρονοσειρές με τις τιμές του συντελεστή Hurst που αντιστοιχούν στα φαινόμενα - με εξυπηρετούμενους πληθυσμούς 25 000 (1^ο σεσάριο), 50 000 (2^ο σεσάριο), 200 000 (4^ο σεσάριο). Τα αποτελέσματα αυτών των σεναρίων όπως και του σεναρίου που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 11.1 (3^ο σεσάριο) παρατίθενται στον Πίνακα 11.4. Σε όλες τις λύσεις των σεναρίων πρόεκυψε $n_s=0$. Παρατηρείται πως από το 1^ο σεσάριο στο 2^ο, δηλαδή στον διπλασιασμό του εξυπηρετούμενου πληθυσμού, υπάρχει διπλασιασμός του n_w και k . Το ίδιο συμβαίνει και στην μετάβαση από το 3^ο στο 4^ο σεσάριο - με ελαφρώς μικρότερο όγκο από το διπλάσιο. Στην μετάβαση από το 2^ο στο 3^ο παρατηρείται πως αυτό δεν συμβαίνει. Στην πραγματικότητα όμως για $n_w=24$ και $k=170 \text{ hm}^3$ προκύπτει πως καλύπτεται ο περιορισμός της αστοχίας.

Πίνακας 11.4 Αποτελέσματα των σεναρίων για διαφορετικούς εξυπηρετούμενους πληθυσμούς

Εξυπηρετούμενος πληθυσμός	25 000	50 000	100 000	200 000
n_w	6	12	23	46
n_s	0	0	0	0
$k \text{ (hm}^3\text{)}$	45	90	250	490
$\kappa_\epsilon \text{ (εκ. Ευρώ)}$	10.8	18.7	33.6	61.4

11.4 Διερεύνηση επιπλέον σεναρίων

Δεν εξετάστηκε κάποιο σενάριο με τις επιδοτούμενες από το κράτος τιμές. Αυτό θα μπορούσε να γίνει χρησιμοποιώντας τις τιμές αγοράς που υπάρχουν ξεχωριστά για ηλιακή και αιολική ενέργεια με στόχο την βελτιστοποίηση της προσόδου. Η αιολική ενέργεια όμως τιμολογείται στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα 99,45 Ευρώ / MWh για αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις ισχύος > 50 kW. Όσον αφορά την ηλιακή ενέργεια η τιμή μεταβάλλεται συνεχώς έως το 2015 και από εκεί και έπειτα – για τα μη διασυνδεδεμένα νησιά - θα είναι $1.4 \cdot \mu\text{OT}\Sigma_{v-1}$ (μέση οριακή τιμή συστήματος) (Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας). Αν προσεγγιστικά χρησιμοποιούταν η εκτίμηση της $\mu\text{OT}\Sigma$ του 2011 (Κάπρος, 2011) η προσφερόμενη τιμή που προκύπτει για την ηλιακή ενέργεια είναι μικρότερη από αυτή της αιολικής ενέργειας με το κόστος αγοράς και τοποθέτησης της ηλιακής ενέργειας να είναι μεγαλύτερο από αυτό της αιολικής. Άρα θα προέκυπτε η ίδια λύση με το πρώτο σενάριο. Το ίδιο προκύπτει για τις τιμές που αντιστοιχούν στο διασυνδεδεμένο σύστημα.

Ένας άλλος τρόπος προσέγγισης θα ήταν με την χρήση της σχετικής απόφασης που έχει δημοσιευθεί στην εφημερίδα της κυβέρνησης (Αρ. Φύλλου 448, 3 Απριλίου 2007) για υβριδικούς σταθμούς. Ο τρόπος τιμολόγησης προκύπτει ξεχωριστά για κάθε νησί - μετά από ανάθεση μελέτης από τη ΡΑΕ - με βάση το εκάστοτε κόστος συμβατικών σταθμών παραγωγής με στόχο την κάλυψη ενός μέρους της ζήτησης από το υβριδικό. Το πνεύμα αυτής της απόφασης δεν αντιστοιχεί με αυτό της παρούσας εργασίας όπου στόχος είναι να εξασφαλίζεται η αυτονομία αποκλειστικά από τον

υβριδικό σταθμό. Η εφαρμογή του λοιπόν θα οδηγούσε σε μη ουσιώδη αποτελέσματα.

12 Τελικά συμπεράσματα

Το βασικό σενάριο που εξετάστηκε απαιτούσε την ικανοποίηση της ζήτησης ενέργειας που αντιστοιχεί σε 100 000 άτομα. Υπενθυμίζεται πως τα μετεωρολογικά δεδομένα προέρχονται από σταθμό στην νότια Αττική (37.89N 23.71W), η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς έχει ισχύ 7.58 MW ενώ το ηλιακό πάνελ 280 Wp.

Όπως ήταν αναμενόμενο πρόέκυψε πως το έργο που θα καλύπτει τα κριτήρια που τέθηκαν είναι ένα απαιτητικό έργο μεγάλης κλίμακας, ετήσιου κόστους το λιγότερο 33.6 εκατομμύρια Ευρώ. Η λύση των σεναρίων χωρίς περιορισμούς στον αριθμό των ανεμογεννητριών αντιστοιχεί σε περίπου 174 MW εγκατεστημένης ισχύος αποκλειστικά από ανεμογεννήτριες. Στα υπόλοιπα σενάρια η εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών σε κάθε περίπτωση είναι περίπου 91 MW και των ηλιακών πάνελ είτε 132 MW είτε 134 MW. Στην Ελλάδα το 2011 η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας ήταν 1 636 MW και ηλιακής 626 MW (<http://government.gov.gr/2012/04/09/29058/>). Κατανοείται ευκολότερα το μέγεθος του έργου υπολογίζοντας πως η εγκατεστημένη ισχύς της πρώτης λύσης αποτελεί περίπου το 11% της ήδη εγκατεστημένης αιολικής ισχύος ενώ η εγκατεστημένη ισχύς της ηλιακής ενέργειας των σεναρίων με αυστηρά 12 ανεμογεννήτριες αποτελεί περίπου το 21% της ήδη εγκατεστημένης ηλιακής ισχύος. Φυσικά η οικονομική βιωσιμότητα του έργου δεν εξαρτάται από τα παραπάνω τα οποία καταδεικνύουν όμως την πρακτική δυσκολία του εγχειρήματος.

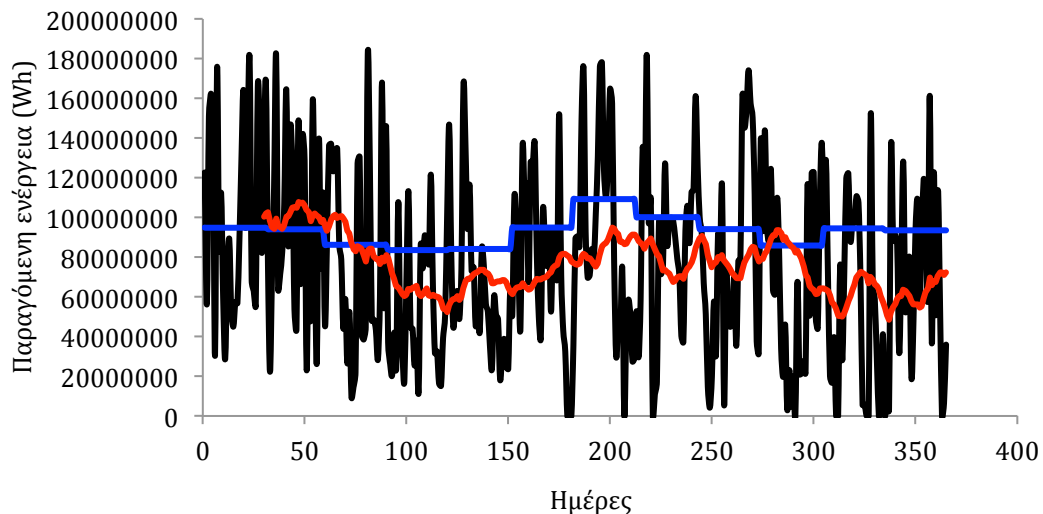
Το κόστος ανά MWh υπολογίζεται διαιρώντας το ετήσιο κόστος του έργου που αντιστοιχεί στην βέλτιστη λύση με την ετήσια ενέργεια που έχει σχεδιαστεί να παράξει ο υβριδικός σταθμός – δηλαδή την μέση ετήσια ζήτηση ενέργειας – το οποίο προκύπτει περίπου στα 63 Ευρώ/MWh. Η μέση οριακή τιμή συστήματος (μΟΤΣ) του 2011 εκτιμήθηκε στα 58 Ευρώ / MWh (Κάπρος, 2011). Δηλαδή το κόστος ανά MWh που αντιστοιχεί στον υβριδικό σταθμό που σχεδιάστηκε είναι περίπου 9% ακριβότερο από την μΟΤΣ. Πρέπει να τονιστεί πως στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα το κόστος παραγωγής ενέργειας είναι ακόμα μεγαλύτερο. Επομένως το έργο μπορεί να θεωρηθεί οικονομικά βιώσιμο.

Γίνεται εμφανής η σημασία του συντελεστή Hurst. Στο σενάριο που εξετάζεται με μειωμένο συντελεστή Hurst υποεκτιμάται ο αναγκαίος όγκος ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα ο όγκος που προκύπτει μη λαμβάνοντας υπ' όψιν τον συντελεστή Hurst είναι το 0.80 του όγκου που προκύπτει με χρήση του συντελεστή Hurst που αντιστοιχεί στα φαινόμενα. Επομένως εάν κατά τον σχεδιασμό του έργου αμεληθεί ο συντελεστής Hurst τότε το έργο αυτό θα υποδιαστασιολογηθεί με πιθανό αποτέλεσμα να μην δύναται να ικανοποιήσει την ζήτηση ενέργειας.

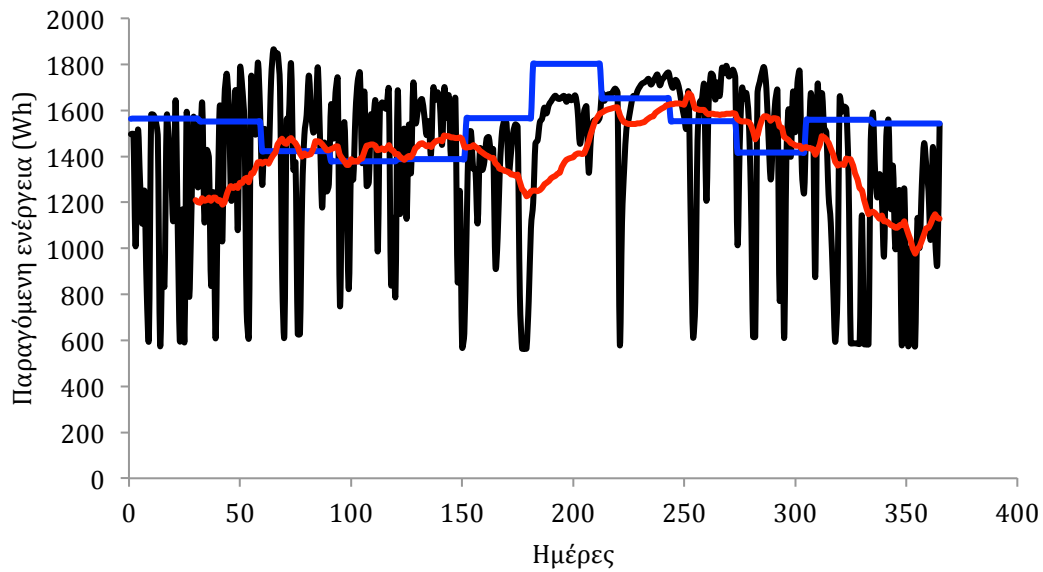
Προέκυψε πως για τα συγκεκριμένα μετεωρολογικά δεδομένα και εξοπλισμό δεν είναι συμφέρουσα η χρήση ηλιακών πάνελ. Στα σενάρια που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 11.2 παρατηρείται πως ενώ η εγκατεστημένη ισχύς της ηλιακής ενέργειας είναι το 0.60 της συνολικής, η παραγόμενη ηλιακή ενέργεια αποτελεί το 0.43 της συνολικής. Το κόστος ανά MW εγκατεστημένης ισχύος της ηλιακής ενέργειας είναι υψηλότερο από της αιολικής. Επομένως το κόστος ανά MWh είναι ακόμα υψηλότερο. Τονίζεται πως τα παραπάνω προκύπτουν για την ανεμογεννήτρια που έχει επιλεγεί, η οποία είναι από τις ισχυρότερες του εμπορίου, και για τα συγκεκριμένα μετεωρολογικά δεδομένα. Επίσης φαίνεται πως η γωνία τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού στοιχείου στην οποία προσπίπτει η μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας είναι και η βέλτιστη για την εφαρμογή του υβριδικού σταθμού.

Στο σενάριο του Κεφαλαίου 11.1 η συνολική ενέργεια που παράγεται είναι το 1.20 της ενέργειας που ζητείται ενώ η ενέργεια που δεν αξιοποιείται είναι το 0.10 της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Στα σενάρια του Κεφαλαίου 11.2 η συνολική ενέργεια που παράγεται είναι το 1.10 της ενέργειας που ζητείται ενώ η ενέργεια που δεν αξιοποιείται είναι το 0.05 της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Η λύση του σεναρίου με χρήση ηλιακών πάνελ απαιτεί μικρότερη χωρητικότητα ταμιευτήρα από ότι το σενάριο του Κεφαλαίου 11.1. Δηλαδή απαιτείται περισσότερη αποθήκευση ενέργειας ενώ η παραγωγή ενέργειας είναι επίσης περισσότερη στο σενάριο του Κεφαλαίου 11.1. Στο Σχήμα 12.1 απεικονίζεται η παραγωγή ενέργειας μιας ανεμογεννήτριας ένα τυχαίο έτος, ο κινούμενος μέσος όρος της με περίοδο 30 ημερών και η μεταβολή της ζήτησης ενέργειας. Στο Σχήμα 12.2 απεικονίζεται η παραγωγή ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού πάνελ ένα τυχαίο έτος, ο κινούμενος μέσος όρος της με περίοδο 30 ημερών και η μεταβολή της ζήτησης ενέργειας. Παρατηρώντας το Σχήμα 12.2 φαίνεται πως η μεταβολή της ηλιακής ενέργειας δεν

είναι παρόμοια με αυτή της ζήτησης ενέργειας. Επομένως δεν φαίνεται να είναι αυτή η αιτία της καλύτερης απόδοσης όσον αφορά την αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Εξετάζεται μήπως αυτό οφείλεται στην μη ομαλή μεταβολή στην εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος, λόγω της μεγάλης ισχύς της ανεμογεννήτριας. Εάν προστεθεί μια ανεμογεννήτρια αυξάνεται η ισχύς κατά 7.58 MW ενώ αν προστεθεί ένα ηλιακό πάνελ κατά $280 \cdot 10^6$ MW. Είναι πιθανό να απαιτείται η ισχύς των 22.5 – για παράδειγμα – ανεμογεννητριών αντί για την ισχύ των 23 του σεναρίου του Κεφαλαίου 11.1. Εξετάζοντας σε αυτό το σενάριο μη ακέραιες τιμές ανεμογεννητριών συμπεραίνεται πως δεν είναι αυτή η αιτία. Παρατηρείται πως οι τιμές της παραγόμενης αιολικής ενέργειας έχουν μεγάλη διακύμανση, έχοντας και μηδενικές τιμές, ενώ οι τιμές της ηλιακής ενέργειας φαίνεται να έχουν μικρότερη διακύμανση χωρίς να είναι ποτέ μηδενικές. Πράγματι ο συντελεστής μεταβλητότητας της παραγόμενης αιολικής ενέργειας είναι 0.63 ενώ της ηλιακής ενέργειας είναι 0.24. Συμπεραίνεται πως η μεγαλύτερη διακύμανση της αιολικής ενέργειας προκαλεί την χειρότερη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.



Σχήμα 12.1 Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η παραγόμενη ενέργεια μίας ανεμογεννήτριας για ένα τυχαίο έτος, με κόκκινο ο κινούμενος μέσος όρος της με περίοδο 30 ημέρες και με μπλε η μεταβολή της ζήτησης ενέργειας.



Σχήμα 12.2 Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η παραγόμενη ενέργεια ενός ηλιακού πάνελ για ένα τυχαίο έτος, με κόκκινο ο κινούμενος μέσος όρος της με περίοδο 30 ημέρες και με μπλε η μεταβολή της ζήτησης ενέργειας.

Όσον αφορά τα σενάρια του Κεφαλαίου 11.3 παρατηρούμε πως το κόστος δεν διπλάσιάζεται με τον διπλασιασμό του εξυπηρετούμενου πληθυσμού αλλά παρουσιάζεται μία οικονομία κλίμακας όπως είναι αναμενόμενο. Επίσης, παρατηρείται πως διπλασιάζοντας τον πληθυσμό διπλασιάζονται και τα μεγέθη σχεδιασμού. Αυτό ισχύει ακόμη και στην μετάβαση από το 2^ο στο 3^ο σενάριο, με την λύση που προκύπτει από τον διπλασιασμό των μεγεθών σχεδιασμού του 2^{ου} σεναρίου να έχει μικρή διαφορά από την βέλτιστη ως προς την αντικειμενική συνάρτηση. Η ζητούμενη ενέργεια και η παραγόμενη ενέργεια αυξάνονται γραμμικά κάτι που δεν συμβαίνει όμως για τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Το z_{\max} και το z μεταβάλλονται μη γραμμικά. Στον Πίνακα 12.1 απεικονίζονται για όλα τα σενάρια των διαφορετικών εξυπηρετούμενων πληθυσμών η μέγιστη υψομετρική διαφορά του ύψους του νερού των ταμιευτήρων $H_{\max} = z_0 + z_{\max} - z_{\min}$ χρησιμοποιώντας τον όγκο ταμιευτήρα 45 hm^3 για τα 25 000 άτομα, όπως προέκυψε στο Κεφάλαιο 11.3, πολλαπλασιάζοντάς τον επί δύο για κάθε αντίστοιχη αύξηση του πληθυσμού. Διπλασιάζοντας τον όγκο και αυξάνοντας την υψομετρική διαφορά αναμένεται η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευθεί να είναι πάνω από διπλάσια (Σχέση 8.3). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στον Πίνακα 12.1 ο όρος που αφορά την υψομετρική διαφορά πράγματι αυξάνεται αλλά ελάχιστα. Λόγω της σχετικά μεγάλης υψομετρικής

διαφοράς των πυθμένων των ταμιευτήρων $z_0=200\text{m}$ η αύξηση του z_{\max} δεν επιδρά σημαντικά στο H , όπως προκύπτει εξετάζοντας το H_{\max} . Επομένως η γραμμική αύξηση των μεγεθών σχεδιασμού είναι λογική χωρίς όμως να αποτελεί απαραίτητα την βέλτιστη λύση.

Πίνακας 12.1 Απεικονίζονται για του εξυπηρετούμενους πληθυσμούς που εξετάστηκαν τα k , z_{\min} ελάχιστη στάθμη ταμιευτήρα, z_{\max} , H_{\max} μέγιστη υψομετρική διαφορά του ύψους του νερού των ταμιευτήρων

	25 000	50 000	100 000	200 000
k (hm³)	45	90	180	360
zmin (m)	36.3	43.8	52.8	63.7
zmax (m)	62.1	74.9	90.3	108.9
Hmax (m)	$H_{\max1}=225.8$	$H_{\max2}=1.02H_{\max1}$	$H_{\max3}=1.03H_{\max2}$	$H_{\max4}=1.03H_{\max3}$

Φυσικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν εξαρτώνται από τις επιλογές της πιλοτικής εφαρμογής (εξοπλισμός, μετεωρολογικά δεδομένα κ.α.) και παραδοχές όπως την ταύτιση των χαρακτηριστικών των δύο ταμιευτήρων, τις σχέσεις που περιγράφουν τους ταμιευτήρες κ.α.. Απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση αξιοποιώντας το μεθοδολογικό πλαίσιο γενικού σκοπού που αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων στις παραπάνω παραμέτρους.

Αναφορές

Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ),
www.admie.gr

ΔΕΗ Ανανεώσιμες, <http://www.ppcr.gr>

Ελληνική Δημοκρατία Κυβέρνηση, <http://government.gov.gr/2012/04/09/29058/>

Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων (ΕΕΜΦ), <http://www.eemf.gr>

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛ.ΣΤΑΤ.),
<http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE>

Επίσημος ιστότοπος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, <http://europa.eu://europa.eu/>

Κάπρος Π., Το ειδικό τέλος ΑΠΕ ανάλυση και προβλέψεις,
http://www.eletaen.gr/drupal/sites/default/files/meleti_emp.pdf, Εθνικό Μετσόβιο
Πολυτεχνείο, 2011.

«Κασταλία» Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης και πρόγνωσης υδρολογικών
διεργασιών, <http://itia.ntua.gr/el/softinfo/2/>

Κολλάρου Κ., *Αξιοποίηση ηλιακής ακτινοβολίας σε κτήρια*, Διπλωματική εργασία,
168 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.

Κουτσογιάννης, Δ., και Α. Ευστρατιάδης, *Σημειώσεις Αστικών Υδραυλικών Έργων -
Μέρος 1: Υδρευτικά Έργα*, 146 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
– Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.

Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος Θ., *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418
σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
<http://www.itia.ntua.gr/g/docinfo/115/>.

Κουτσογιάννης, Δ., *Σημειώσεις Στοχαστικών Μεθόδων στους Υδατικούς Πόρους*,
Έκδοση 3, 100 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.

Κουτσογιάννης, Δ., *Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας - Μέρος Ι*, Έκδοση 2, 157 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.

Κουτσογιάννης, Δ., *Στατιστική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 307 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1996.

Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ), www.lagie.gr

Μαμάσης Ν., *Σημειώσεις Εισαγωγής στην Ενεργειακή Τεχνολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010

Μαμάσης Ν., *Σημειώσεις Εισαγωγής στην Ενεργειακή Τεχνολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011

Στεφανάκος Ι., Διπλ. Πολ. Μηχανικός ΕΜΠ, MSc και PhD Imperial College, jstef@tee.gr

Τσεκούρας Γ., *Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών μεταβλητών ανέμου και ήλιου*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.

Global Wind Energy Council, <http://gwec.net>

Green Keneth P., *The Myth of Green Energy Jobs: The European Experience*, *Energy and Environment Outlook*, 2011.

Koutsoyiannis, D., and A. Economou, Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems, *Water Resources Research*, 39 (6), 1170, 2003.

Koutsoyiannis, D., The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy, *Hydrological Sciences Journal*, 47 (4), 573–595, 2002.

The Hydrological Observatory of Athens, <http://hoa.ntua.gr>

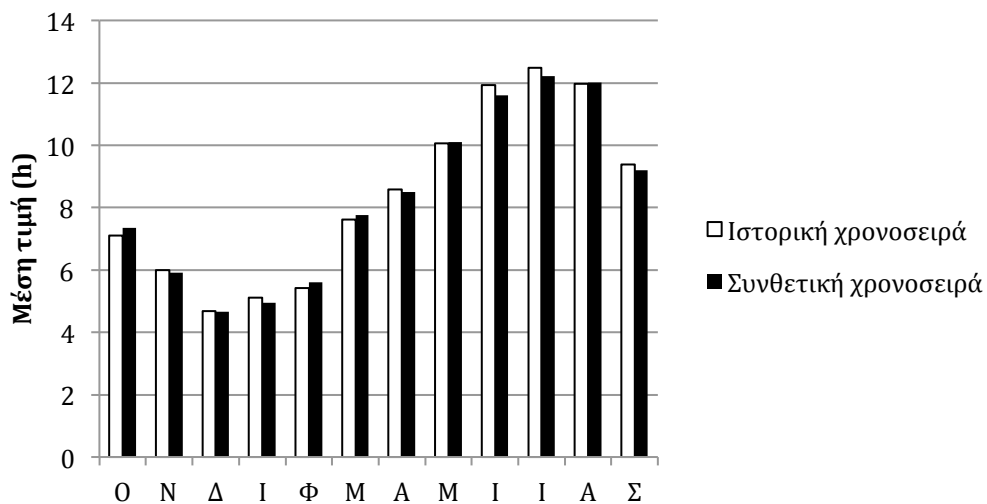
Timilsina G.R., Kurdgelashvili L., Narbel P.A., *A Review of Solar Energy Markets*,

Economics and Policies, Policy Research Working Paper, The World Bank Development Research Group Environment and Energy Team, 2011.

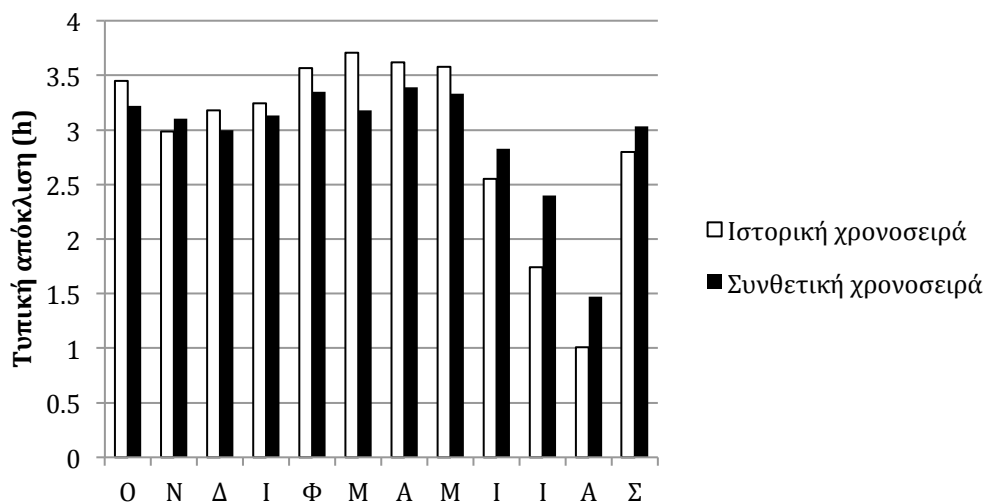
U.S. Energy Information Administration, <http://www.eia.gov>

Παράρτημα Α

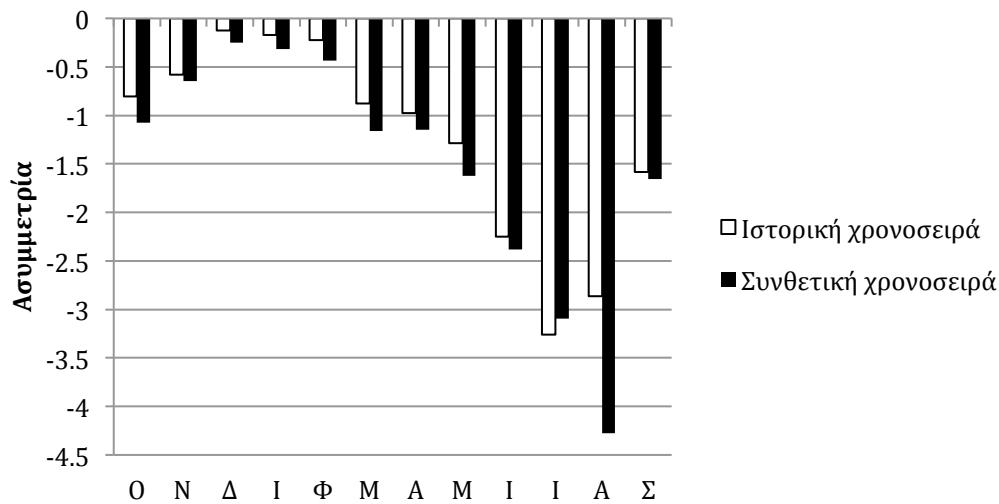
Ραβδόγραμμα σύγκρισης στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών με συντελεστή Hurst μέσης ταχύτητας ανέμου 0.84 και διάρκειας ηλιοφάνειας 0.82



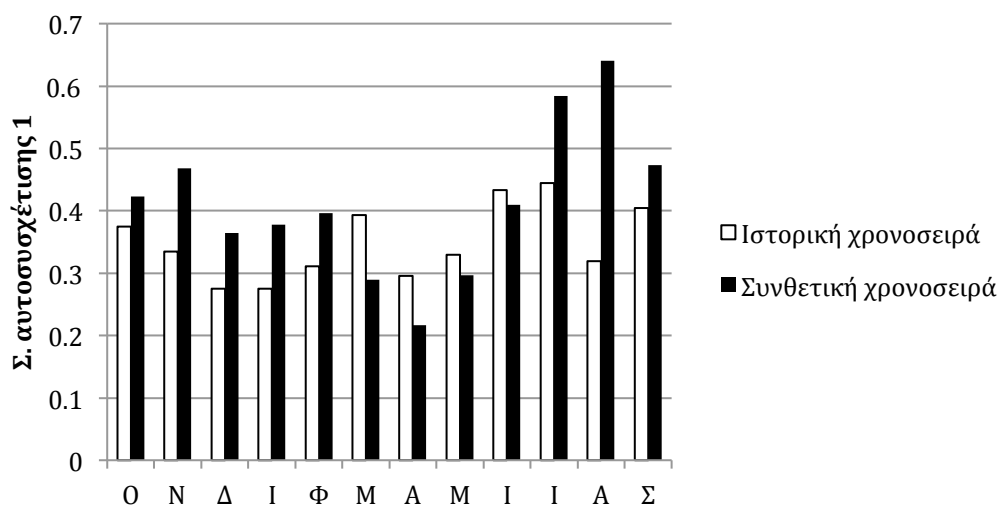
Σχήμα Α.1 Ραβδόγραμμα σύγκρισης μέσων τιμών της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



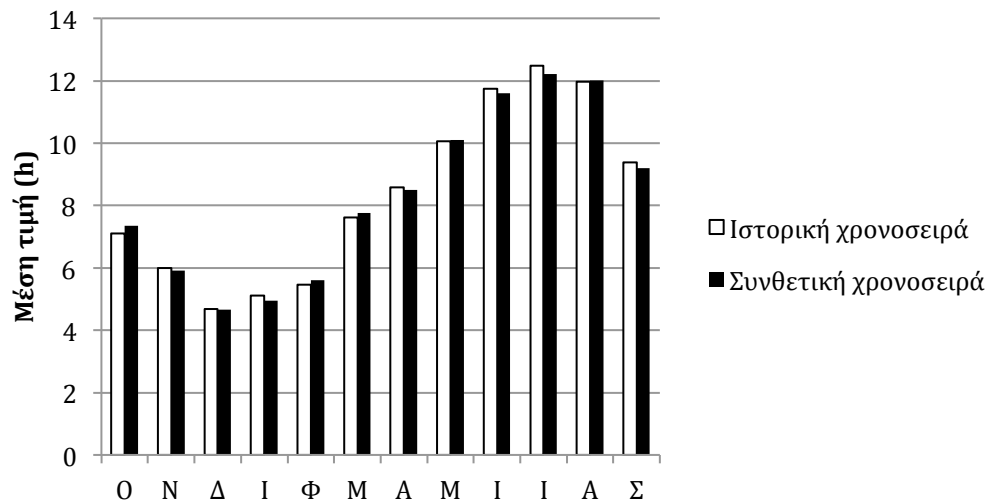
Σχήμα Α.2 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των τυπικών αποκλίσεων της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



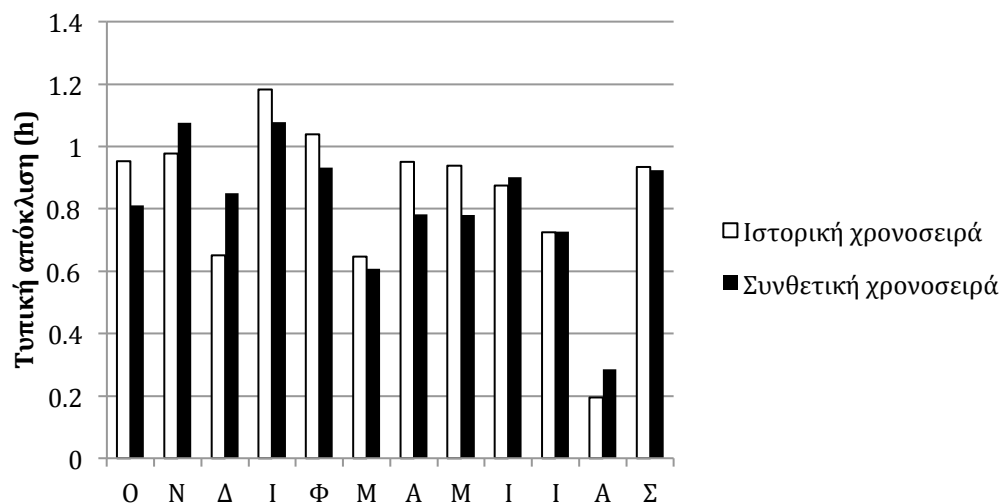
Σχήμα Α.3 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ασυμμετρίας της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



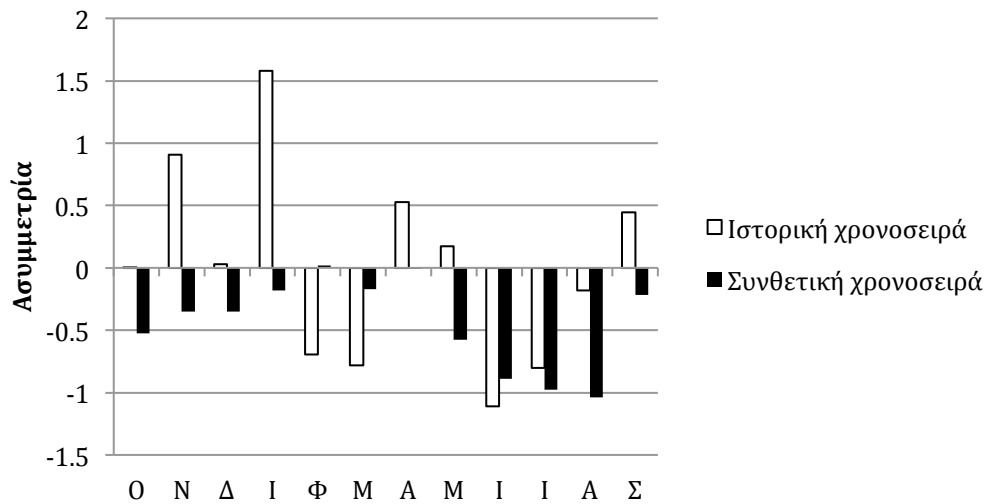
Σχήμα Α.4 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



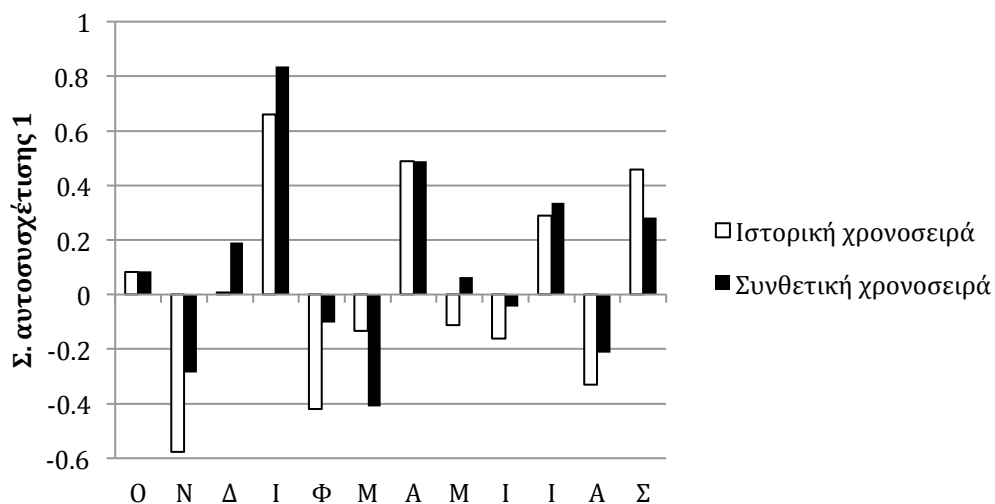
Σχήμα Α.5 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των μέσων τιμών της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



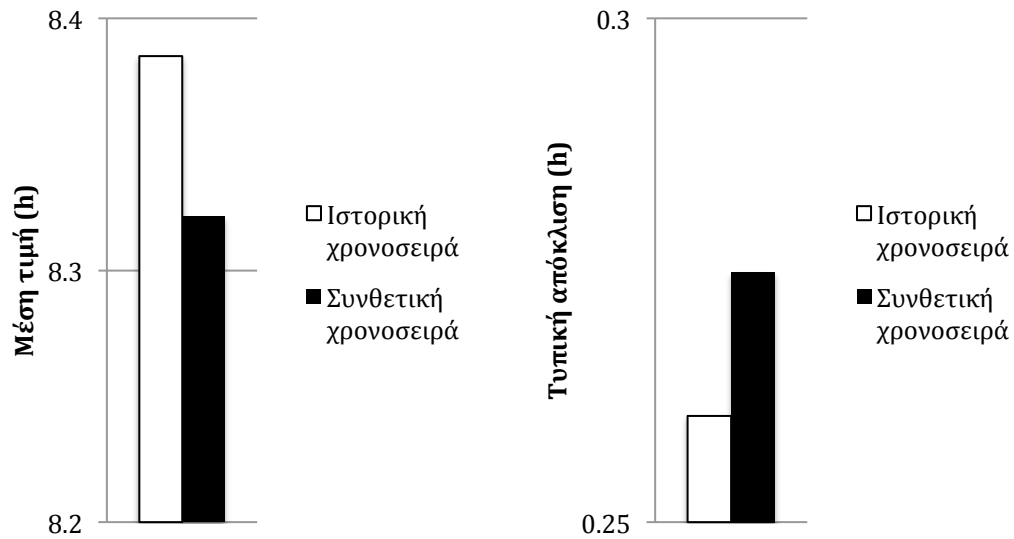
Σχήμα Α.6 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των τυπικών αποκλίσεων της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



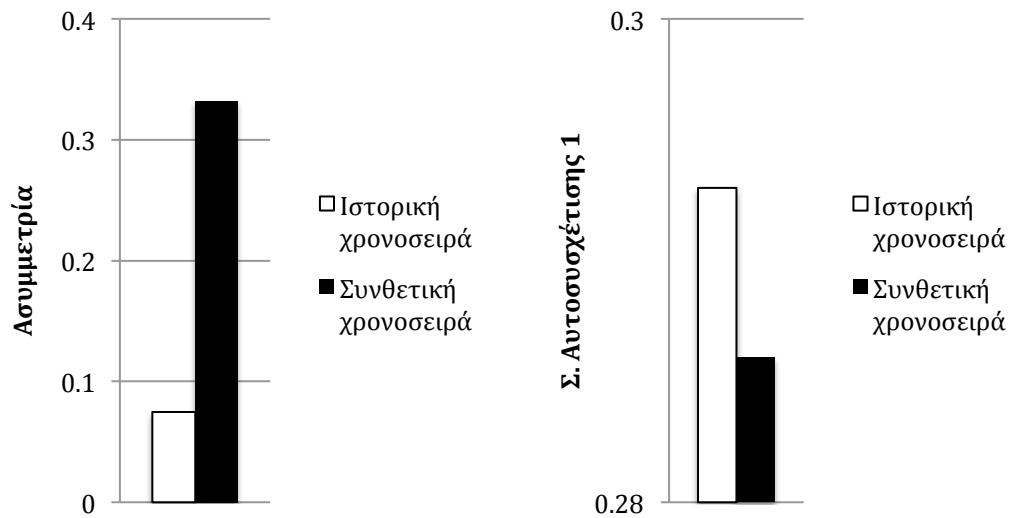
Σχήμα Α.7 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ασυμμετρίας της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



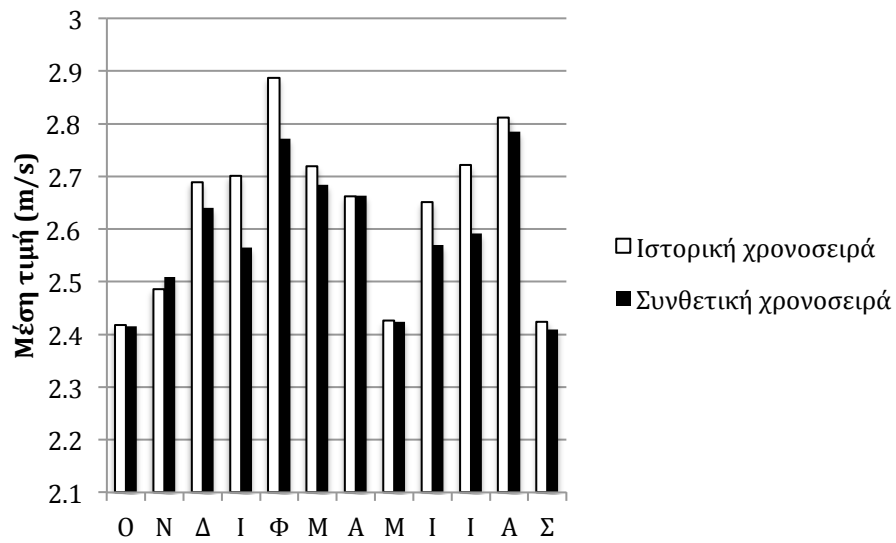
Σχήμα Α.8 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



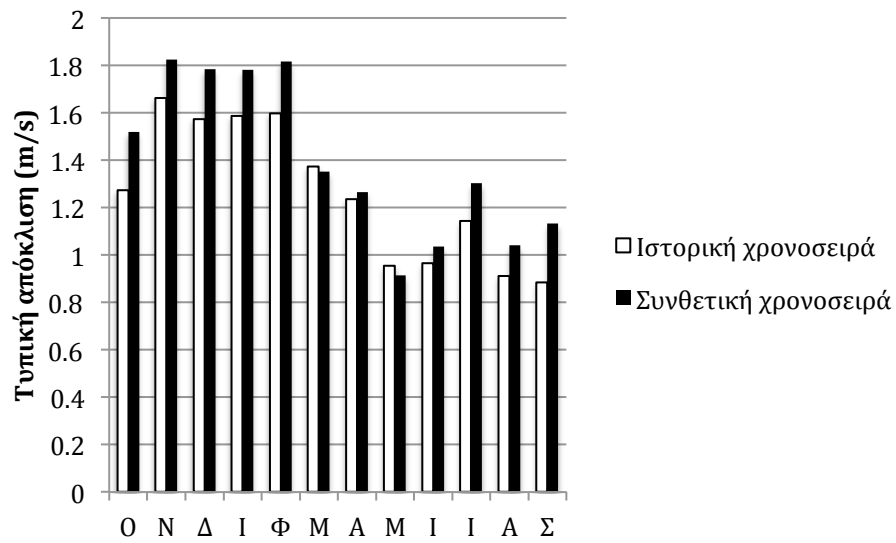
Σχήμα A.9,A.10 Ραβδογράμματα σύγκρισης της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ετήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



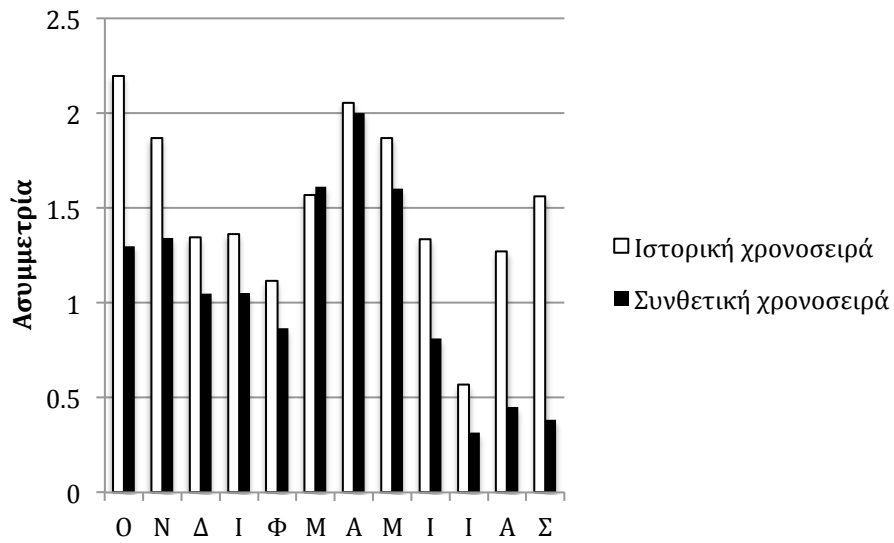
Σχήμα A.11,A.12 Ραβδογράμματα σύγκρισης της ασυμμετρίας και του συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ετήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



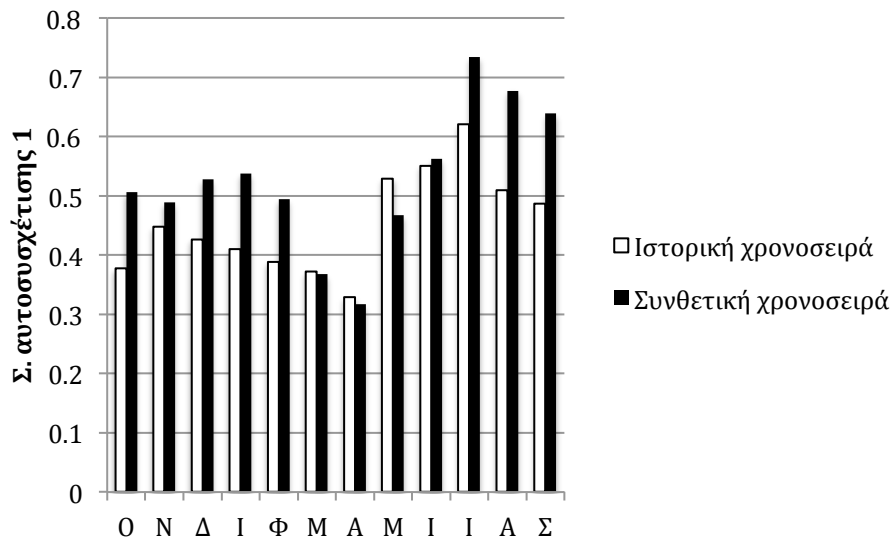
Σχήμα Α.13 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των μέσων τιμών της ταχύτητας ανέμου σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



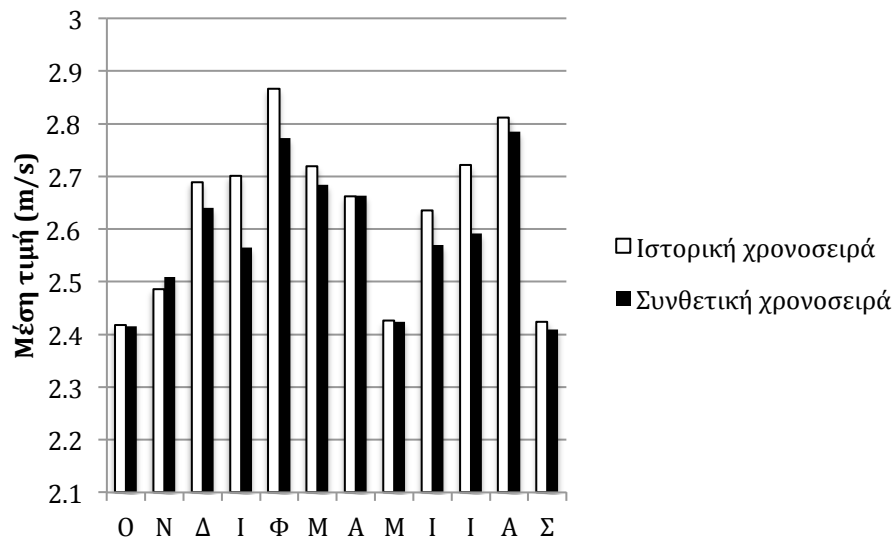
Σχήμα Α.14 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των τυπικών αποκλίσεων της ταχύτητας ανέμου σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



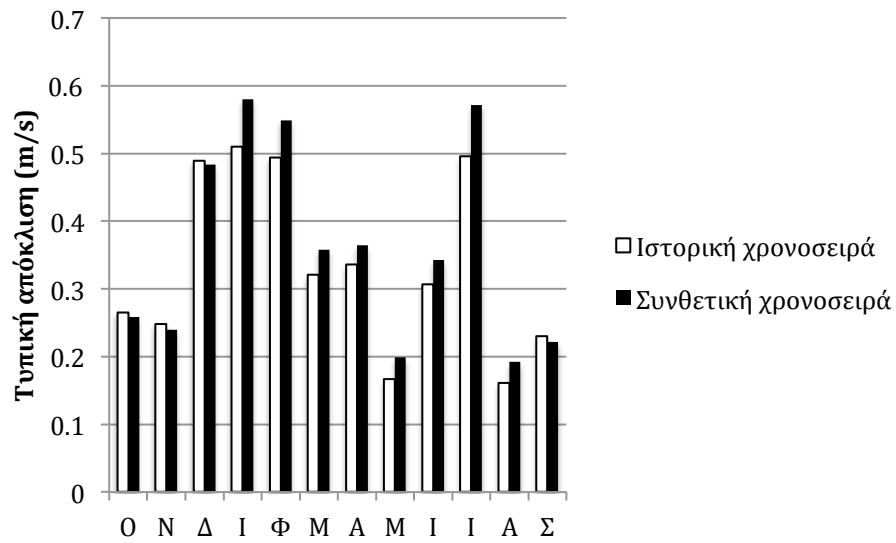
Σχήμα Α.15 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ασυμμετρίας της ταχύτητας ανέμου σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



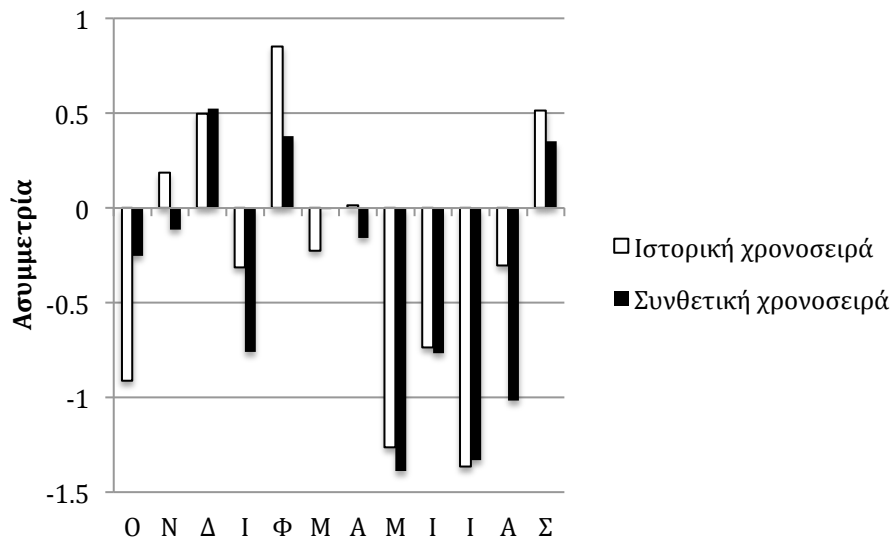
Σχήμα Α.16 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της ταχύτητας ανέμου σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



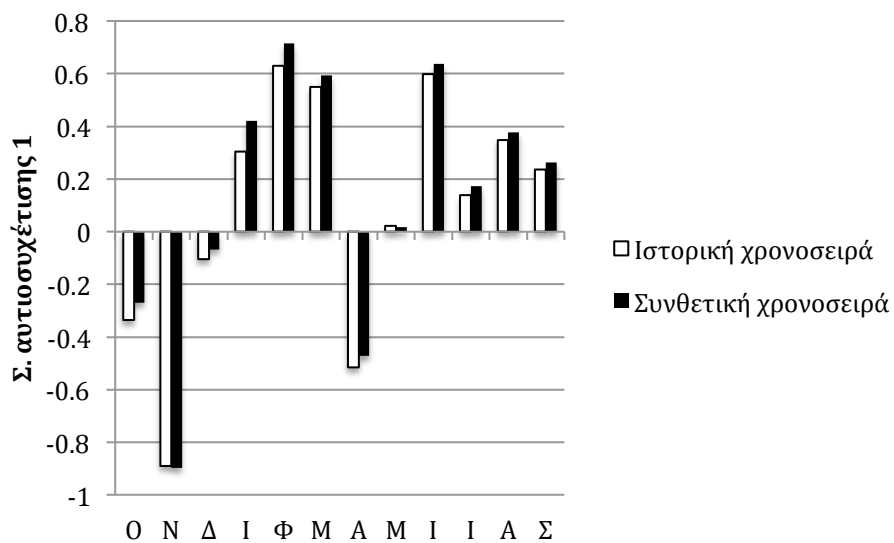
Σχήμα Α.17 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των μέσων τιμών της ταχύτητας ανέμου σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



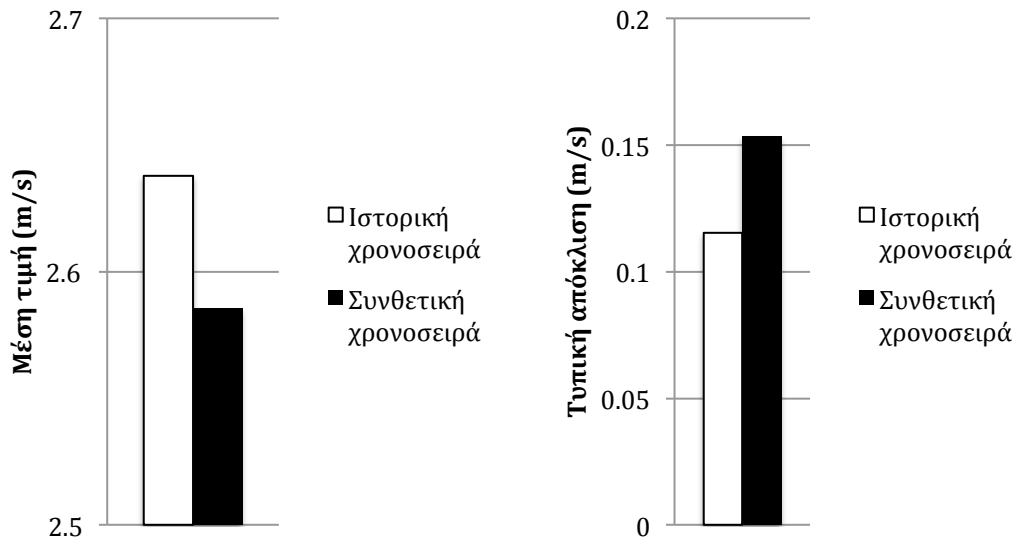
Σχήμα Α.18 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των τυπικών αποκλίσεων της ταχύτητας ανέμου σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



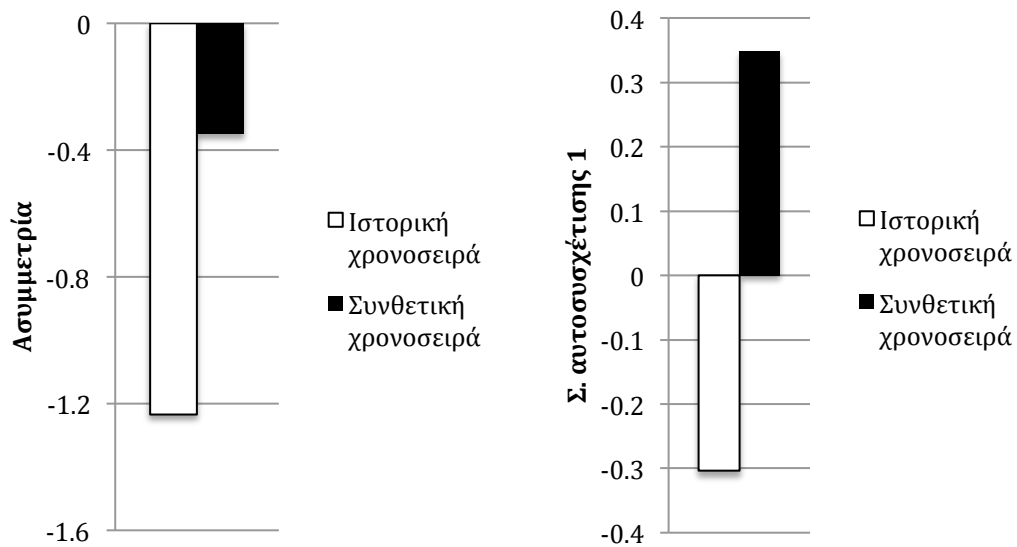
Σχήμα Α.19 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των ασυμμετριών της ταχύτητας ανέμου σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



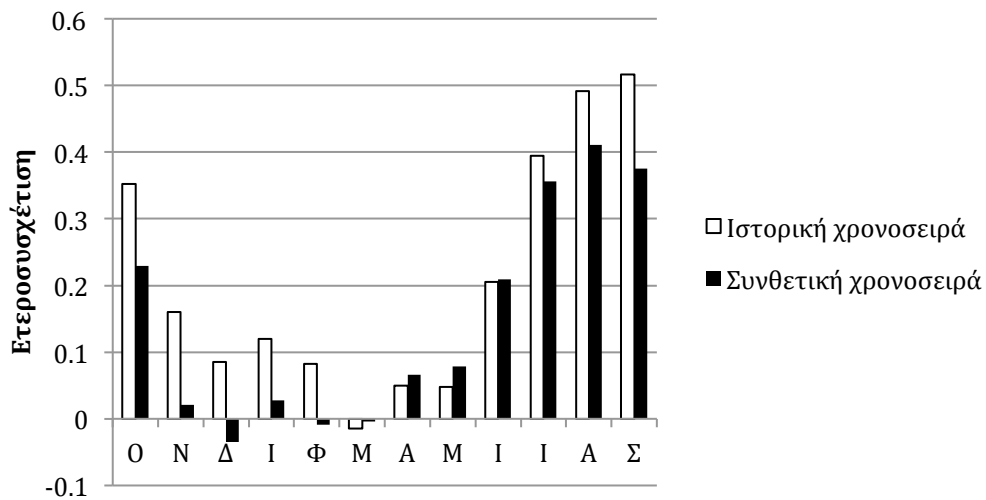
Σχήμα Α.20 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της ταχύτητας ανέμου σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



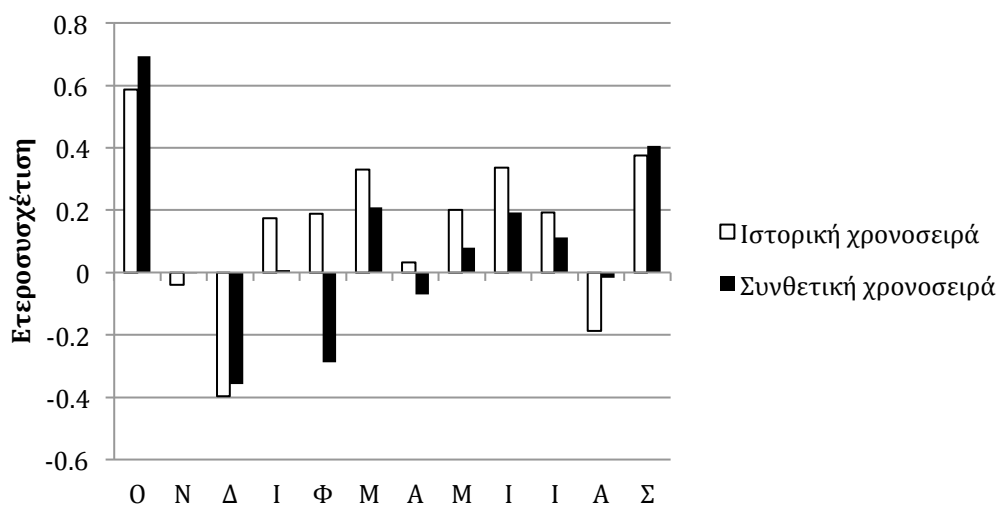
Σχήμα A.21,A.22 Ραβδογράμματα σύγκρισης της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου σε ετήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



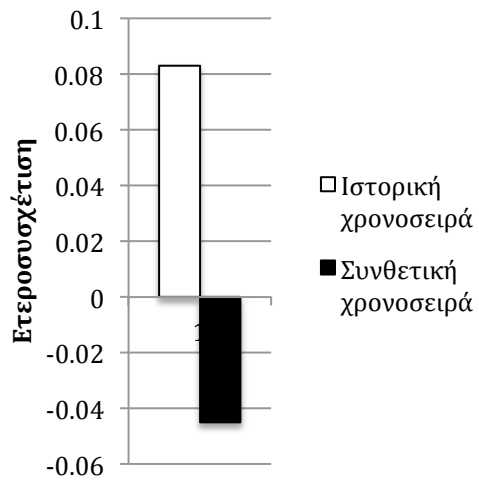
Σχήμα A.23,A.24 Ραβδογράμματα σύγκρισης της ασυμμετρίας και του συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της ταχύτητας ανέμου σε ετήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



Σχήμα Α.25 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ετεροσυσχέτισης μηδενικής υστέρησης της διάρκειας ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ανέμου για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά σε ημερήσια κλίμακα.



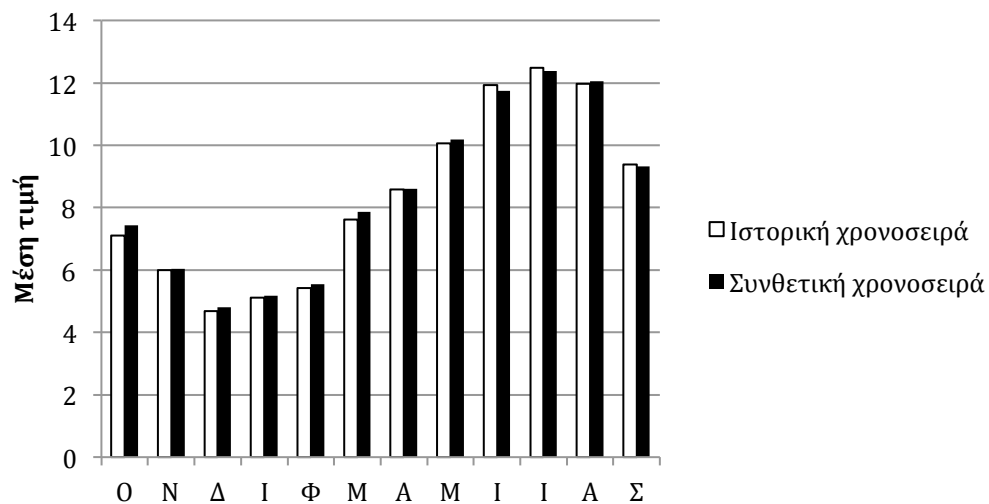
Σχήμα Α.26 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ετεροσυσχέτισης μηδενικής υστέρησης της διάρκειας ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ανέμου για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά σε μηνιαία κλίμακα.



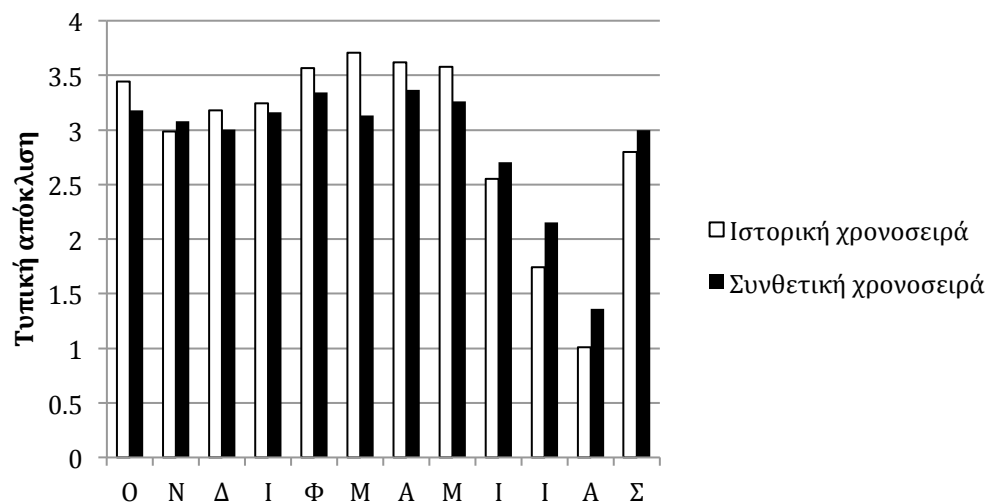
Σχήμα Α.27 Ραβδόγραμμα σύγκρισης του συντελεστή ετεροσυσχέτισης μηδενικής υστέρησης της διάρκειας ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ανέμου για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά σε ετήσια κλίμακα.

Παράρτημα Β

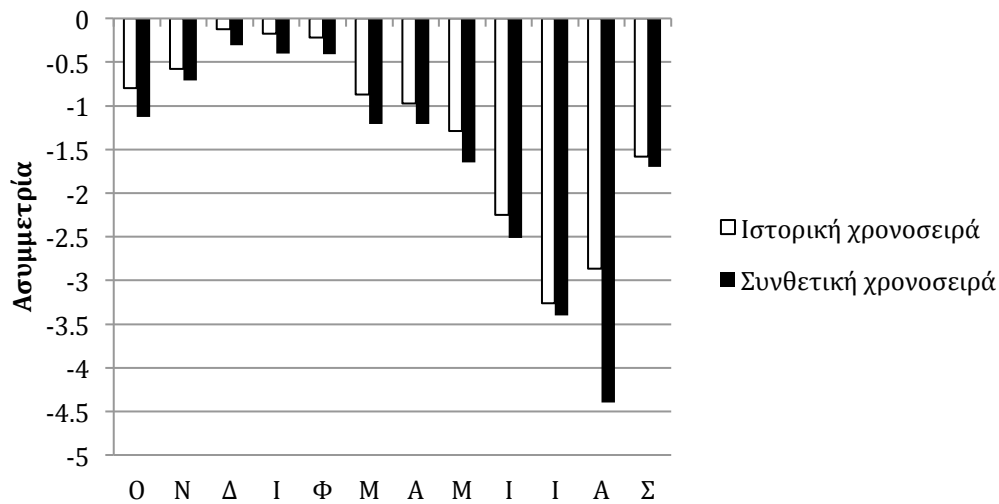
Ραβδόγραμμα σύγκρισης στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών με συντελεστή Hurst μέσης ταχύτητας ανέμου 0.64 και διάρκειας ηλιοφάνειας 0.61



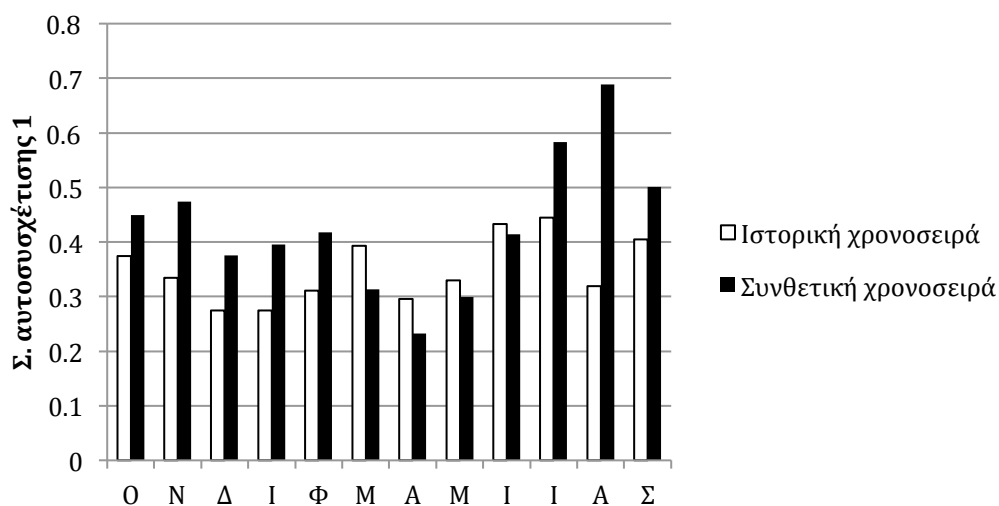
Σχήμα Β.1 Ραβδόγραμμα σύγκρισης μέσων τιμών της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



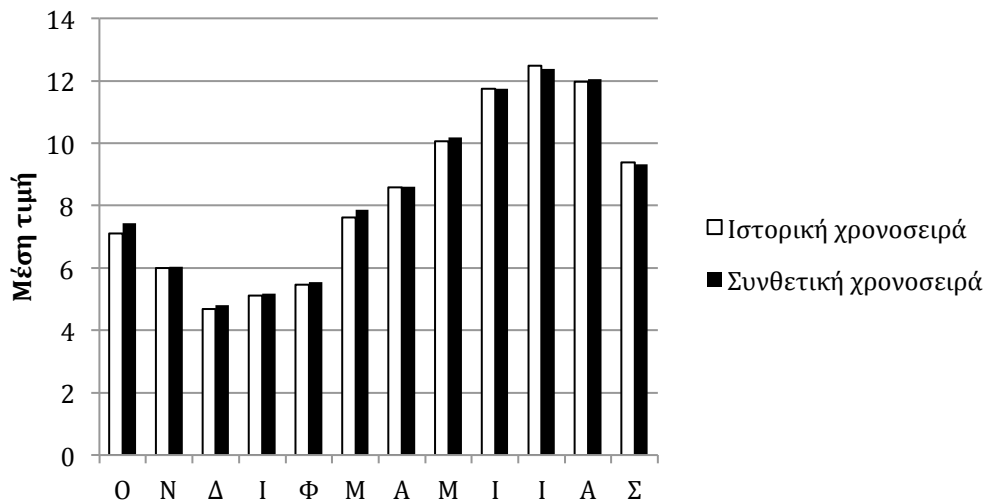
Σχήμα Β.2 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των τυπικών αποκλίσεων της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



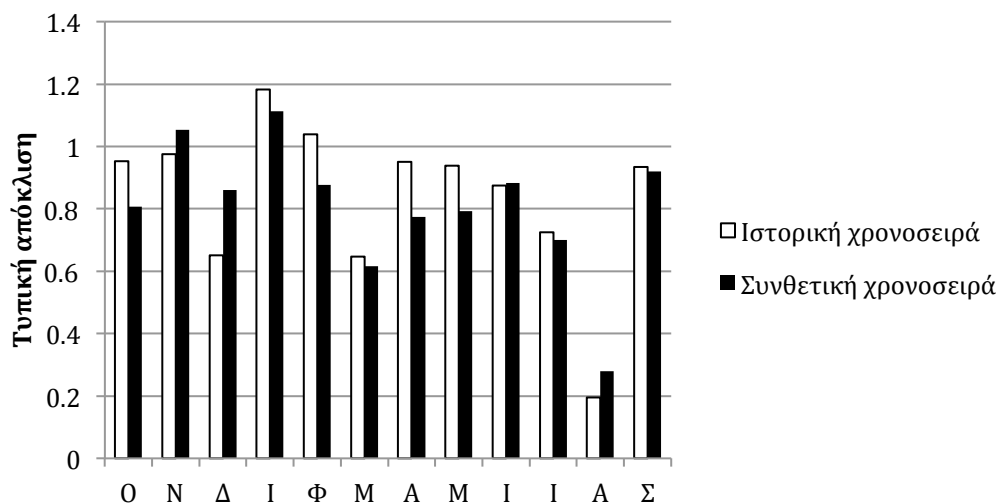
Σχήμα Β.3 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ασυμμετρίας της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



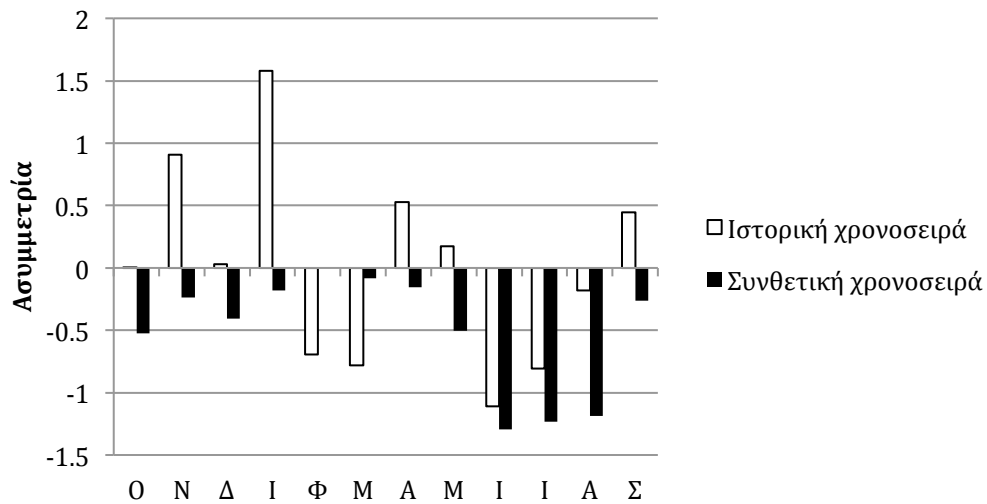
Σχήμα Β.4 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



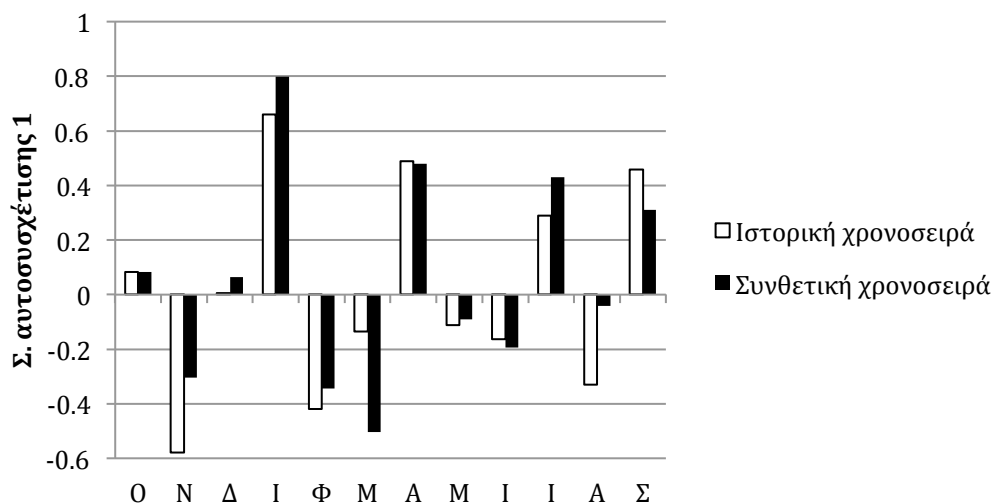
Σχήμα Β.5 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των μέσων τιμών της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



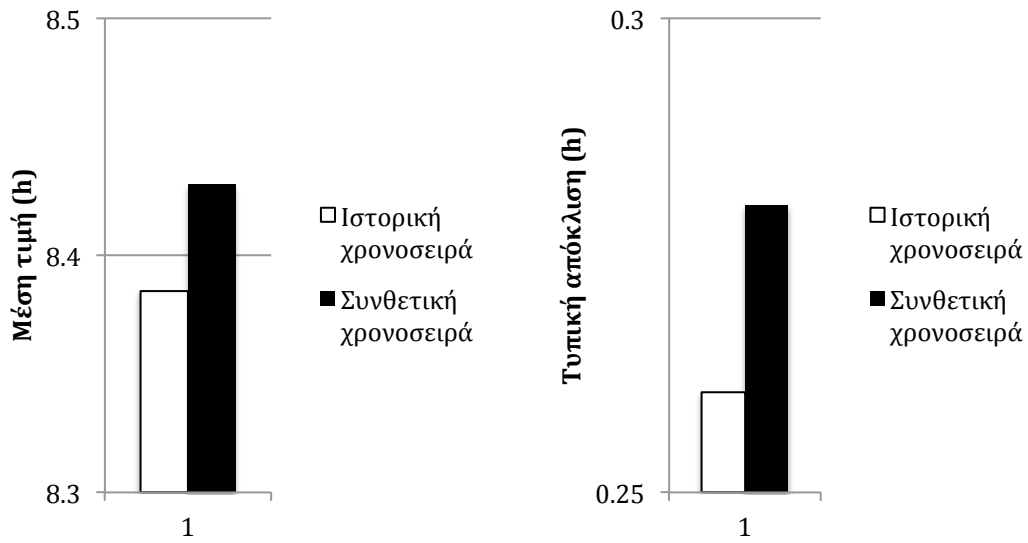
Σχήμα Β.6 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των τυπικών αποκλίσεων της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



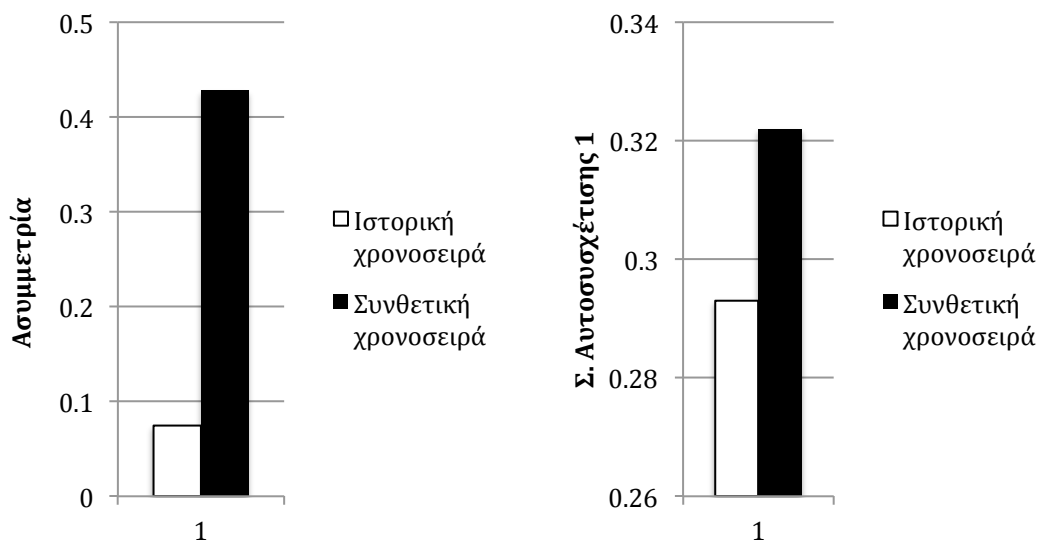
Σχήμα Α.7 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ασυμμετρίας της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



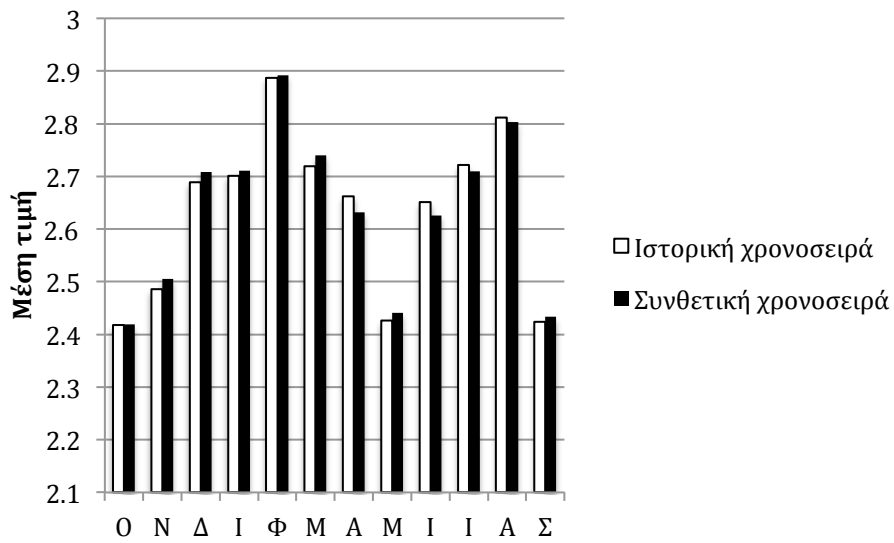
Σχήμα Β.8 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



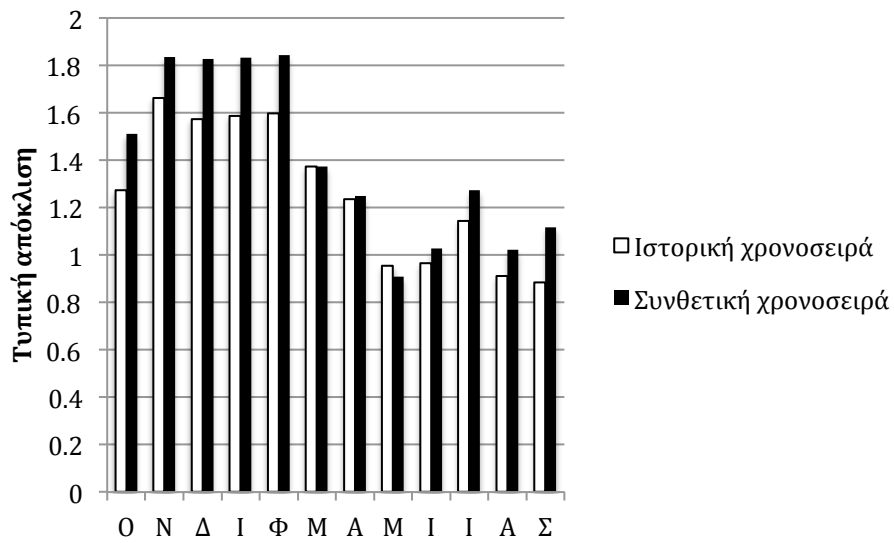
Σχήμα B.9,B.10 Ραβδογράμματα σύγκρισης της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ετήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



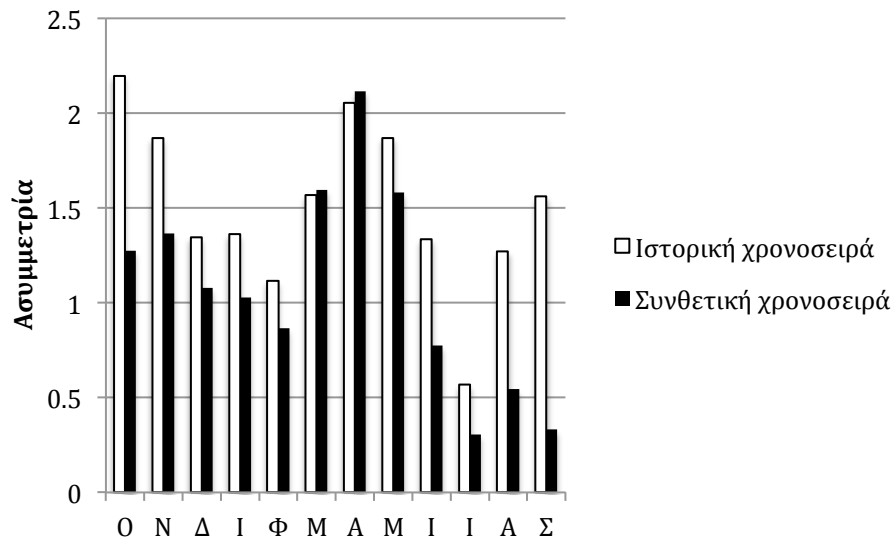
Σχήμα B.11,B.12 Ραβδογράμματα σύγκρισης της ασυμμετρίας και του συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ετήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



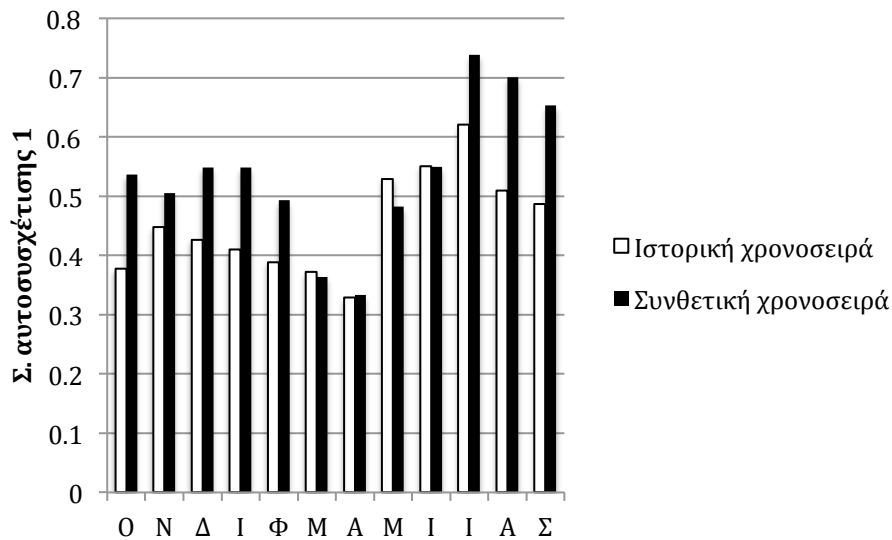
Σχήμα B.13 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των μέσων τιμών της ταχύτητας ανέμου σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



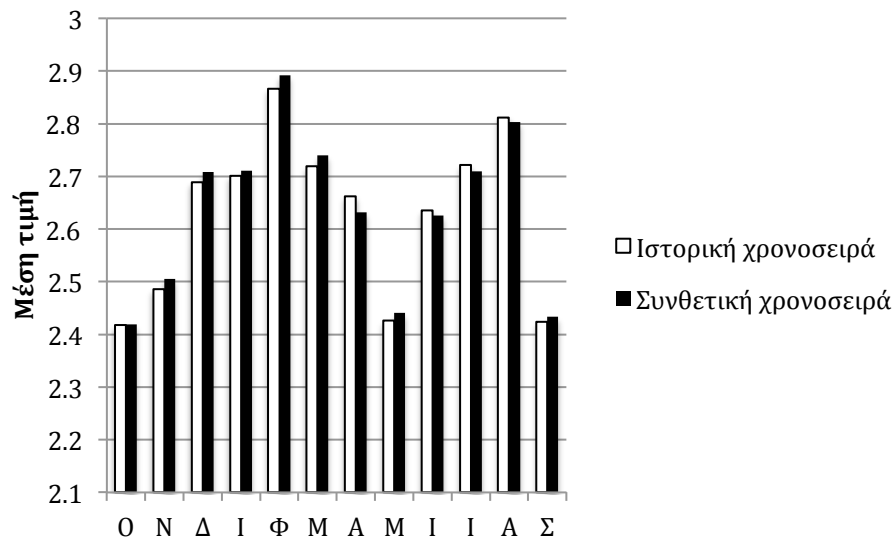
Σχήμα B.14 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των τυπικών αποκλίσεων της ταχύτητας ανέμου σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



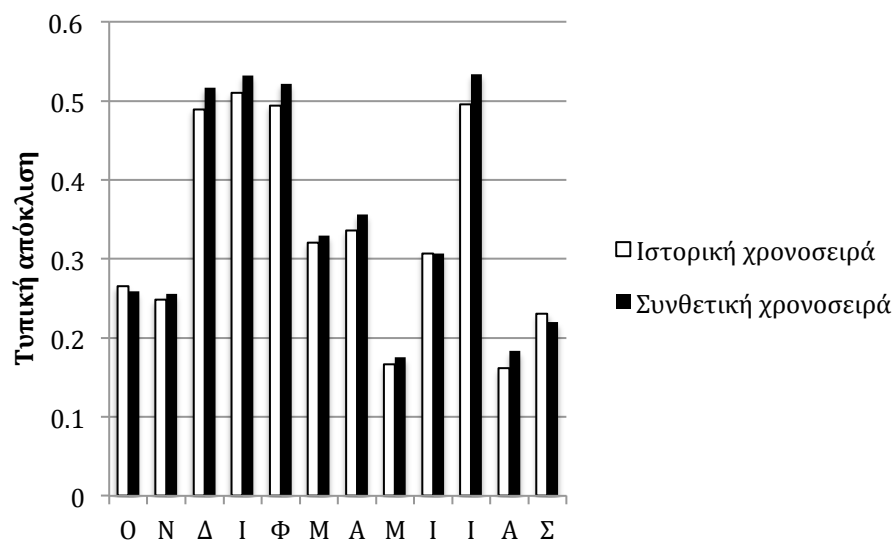
Σχήμα B.15 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ασυμμετρίας της ταχύτητας ανέμου σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



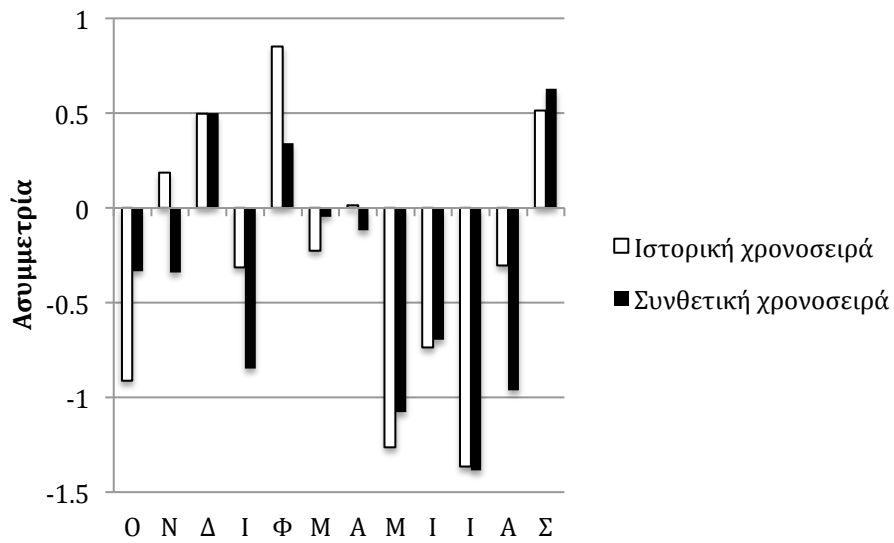
Σχήμα B.16 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της ταχύτητας ανέμου σε ημερήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



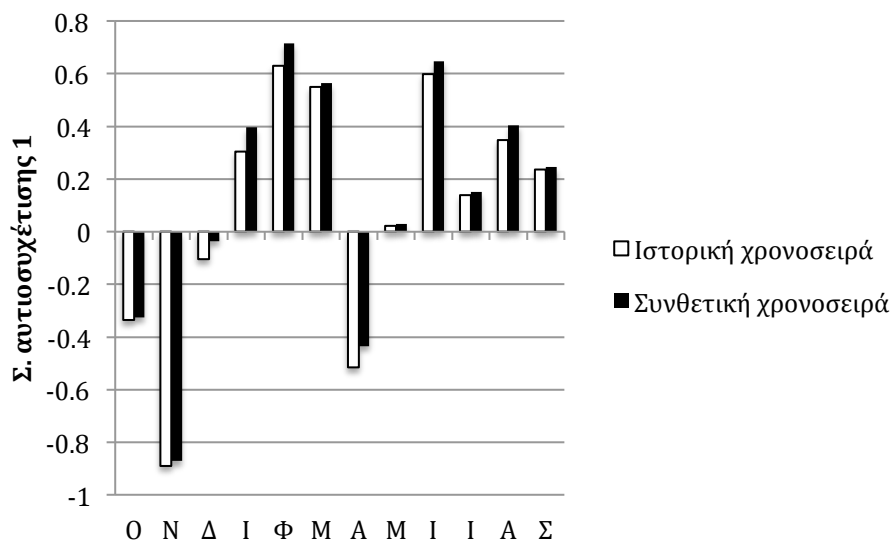
Σχήμα Β.17 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των μέσων τιμών της ταχύτητας ανέμου σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



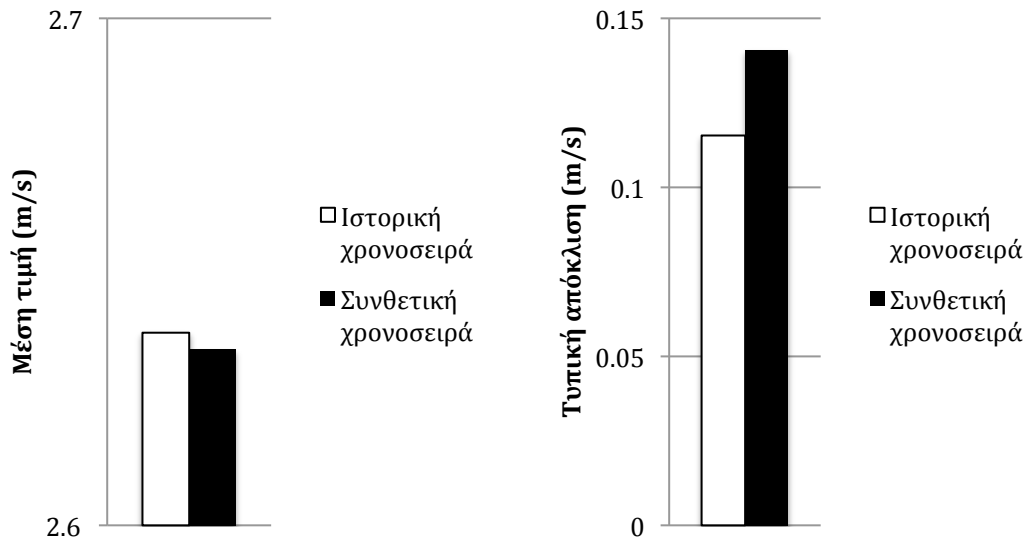
Σχήμα Β.18 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των τυπικών αποκλίσεων της ταχύτητας ανέμου σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



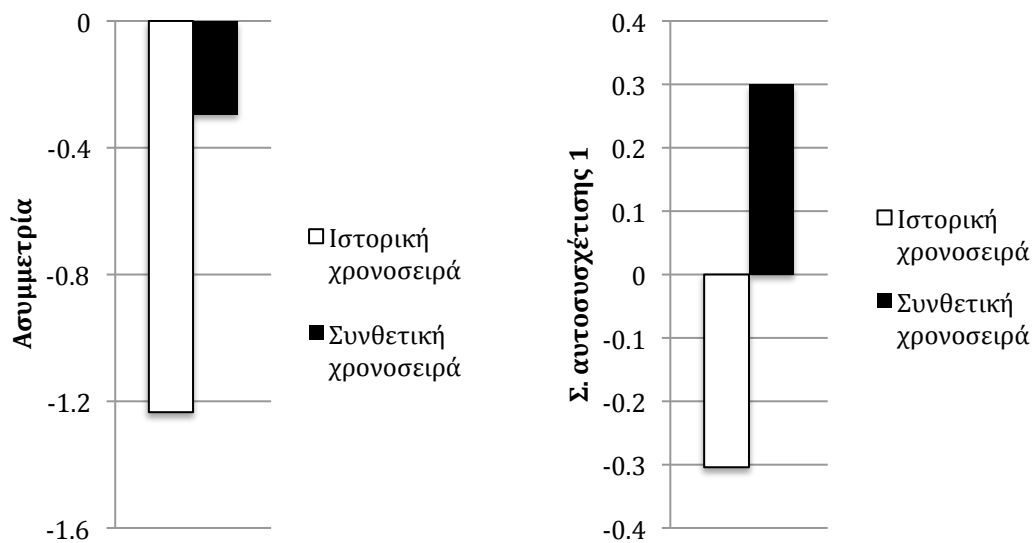
Σχήμα B.19 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των ασυμμετριών της ταχύτητας ανέμου σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



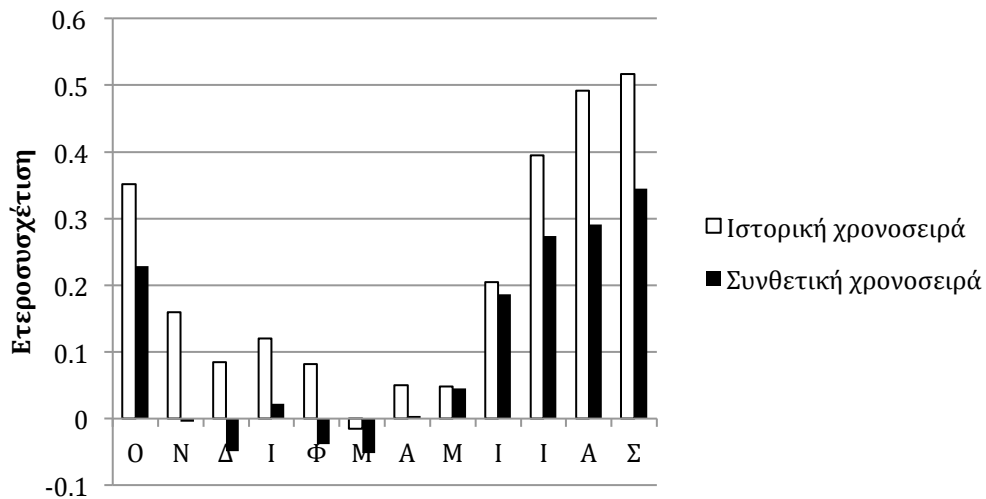
Σχήμα B.20 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της ταχύτητας ανέμου σε μηνιαία κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



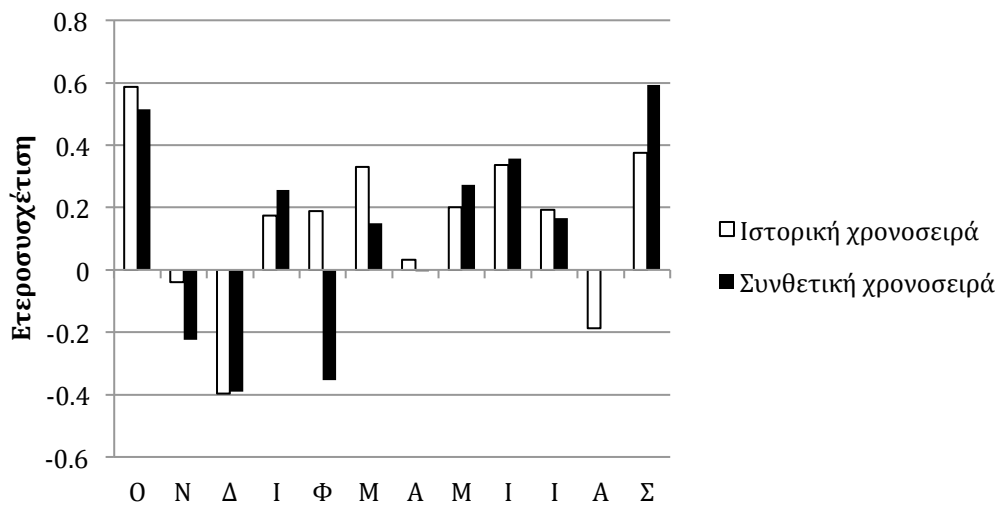
Σχήμα B.21,B.22 Ραβδογράμματα σύγκρισης της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου σε ετήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



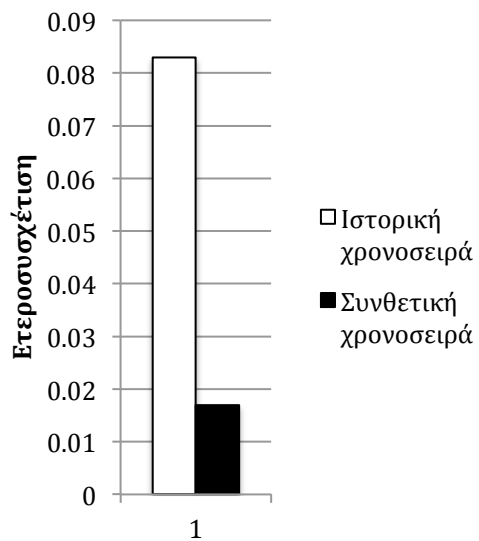
Σχήμα B.23,B.24 Ραβδογράμματα σύγκρισης της ασυμμετρίας και του συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης της ταχύτητας ανέμου σε ετήσια κλίμακα για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά.



Σχήμα B.25 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ετεροσυσχέτισης μηδενικής υστέρησης της διάρκειας ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ανέμου για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά σε ημερήσια κλίμακα.



Σχήμα B.26 Ραβδόγραμμα σύγκρισης των συντελεστών ετεροσυσχέτισης μηδενικής υστέρησης της διάρκειας ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ανέμου για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά σε μηνιαία κλίμακα.



Σχήμα B.27 Ραβδόγραμμα σύγκρισης του συντελεστή ετεροσυσχέτισης μηδενικής υστέρησης της διάρκειας ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ανέμου για την ιστορική και συνθετική χρονοσειρά σε ετήσια κλίμακα.

Παράρτημα Γ

Στατιστικά χαρακτηριστικά κλάσεων παραγόμενης ενέργειας

Πίνακας Γ.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας

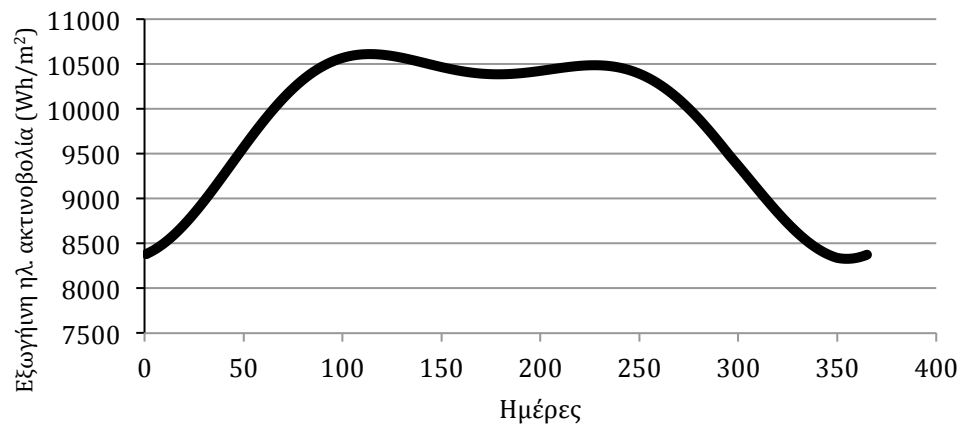
	Εύρος κλάσης ταχύτητας ανέμου(m/s)		Μέσο κλάση ζ(m/s)	Μέση τιμή(Wh)	Τυπική απόκλιση (Wh)	Ασυμμετρία
1	0.30	3.60	1.95	5096333.33	4382815.96	2.31
2	3.65	3.95	3.80	7176000.00	3141109.62	1.95
3	3.95	4.16	4.06	9017666.67	3343883.69	1.43
4	4.16	4.42	4.29	12144333.33	5477562.34	2.34
5	4.42	4.61	4.52	15611833.33	7509014.98	2.80
6	4.62	4.82	4.72	17230833.33	4211562.71	0.75
7	4.83	4.97	4.90	19455000.00	4750150.27	0.72
8	4.98	5.13	5.06	21403000.00	4014842.42	0.41
9	5.14	5.31	5.23	24619000.00	5493393.27	0.35
10	5.31	5.46	5.39	25495333.33	5997252.23	0.38
11	5.47	5.57	5.52	28204000.00	5700964.59	0.09
12	5.57	5.72	5.65	32041000.00	6294006.10	-0.01
13	5.72	5.85	5.78	30115000.00	6814675.85	0.46
14	5.85	5.97	5.91	35373000.00	6368173.10	-0.25
15	5.97	6.07	6.02	35465500.00	5378526.97	-0.09
16	6.07	6.19	6.13	37291333.33	5357660.80	-0.06
17	6.19	6.28	6.24	37897333.33	5604543.68	-0.70
18	6.29	6.39	6.34	39080000.00	4957823.49	-0.47
19	6.39	6.47	6.43	41079666.67	6310410.66	-0.75
20	6.47	6.55	6.51	42524833.33	4239340.48	-0.64
21	6.55	6.62	6.59	42104166.67	6350776.50	-0.74
22	6.63	6.70	6.67	43413500.00	6113543.35	-0.34
23	6.71	6.80	6.75	45033666.67	6227886.66	-0.08
24	6.80	6.91	6.86	47259833.33	7623738.96	0.08
25	6.92	7.03	6.98	48575666.67	4990810.82	0.98
26	7.03	7.15	7.09	48968500.00	6269198.40	-0.01
27	7.16	7.23	7.19	49963833.33	6397177.27	0.35
28	7.23	7.29	7.26	52867833.33	4998990.19	0.68
29	7.30	7.39	7.35	53743166.67	6413928.60	-0.81
30	7.40	7.49	7.44	53806333.33	4897736.62	-0.47
31	7.49	7.58	7.53	55262166.67	5479438.79	-0.03
32	7.58	7.70	7.64	56507166.67	6024566.47	-0.33
33	7.70	7.80	7.75	55755000.00	4512028.56	-0.89
34	7.80	7.89	7.84	59536000.00	6108130.45	0.12
35	7.90	8.01	7.95	58672000.00	5764254.83	-0.34

	Εύρος κλάσης ταχύτητας ανέμου (m/s)		Μέσο κλάσης (m/s)	Μέση τιμή(Wh)	Τυπική απόκλιση (Wh)	Ασυμμετρία
36	8.01	8.07	8.04	60014833.33	7926470.22	-2.88
37	8.07	8.15	8.11	62753500.00	4512460.75	-0.50
38	8.15	8.25	8.20	63377666.67	6823511.30	0.10
39	8.26	8.36	8.31	68441000.00	5679043.66	-0.18
40	8.36	8.44	8.40	66914666.67	6282554.24	0.54
41	8.44	8.53	8.48	67510666.67	4841494.45	-0.06
42	8.53	8.64	8.59	69625166.67	6513828.99	-2.25
43	8.64	8.75	8.70	70006666.67	7712818.86	-2.13
44	8.76	8.86	8.81	71480666.67	4224104.22	0.06
45	8.87	8.94	8.90	75706333.33	6286044.74	-0.60
46	8.95	9.06	9.01	75086166.67	5728330.18	-0.01
47	9.06	9.17	9.11	75954500.00	4608366.33	-0.06
48	9.17	9.28	9.23	74947333.33	8991060.48	-1.95
49	9.28	9.42	9.35	79508833.33	8494377.72	-2.37
50	9.42	9.55	9.49	79990000.00	7497419.10	-1.38
51	9.56	9.69	9.62	82881000.00	5322884.30	-0.56
52	9.69	9.82	9.75	81922333.33	14877114.79	-3.42
53	9.82	9.92	9.87	87243166.67	8982295.18	-3.04
54	9.93	10.05	9.99	86971166.67	6513921.26	-0.78
55	10.05	10.24	10.15	87743166.67	9541126.36	-1.19
56	10.24	10.38	10.31	91881500.00	8240889.34	-1.69
57	10.38	10.54	10.46	94107166.67	10312596.97	-1.82
58	10.55	10.79	10.67	95892000.00	10697957.72	-1.65
59	10.79	10.95	10.87	96663666.67	13507615.79	-1.34
60	10.96	11.10	11.03	102970000.00	8490228.56	-0.50
61	11.10	11.27	11.19	99645666.67	14179482.49	-1.35
62	11.29	11.48	11.38	100584166.67	20819631.16	-2.70
63	11.48	11.68	11.58	100892333.33	17279551.29	-1.46
64	11.69	11.86	11.77	107920500.00	18614809.38	-1.68
65	11.87	12.07	11.97	107975000.00	21075577.67	-2.29
66	12.07	12.29	12.18	115138666.67	13726457.02	-1.26
67	12.30	12.59	12.45	119481000.00	17165372.84	-2.39
68	12.59	12.94	12.76	120373166.67	20531027.51	-1.91
69	12.94	13.15	13.04	115396500.00	21014057.33	-1.12
70	13.17	13.41	13.29	127206333.33	17016650.46	-1.16

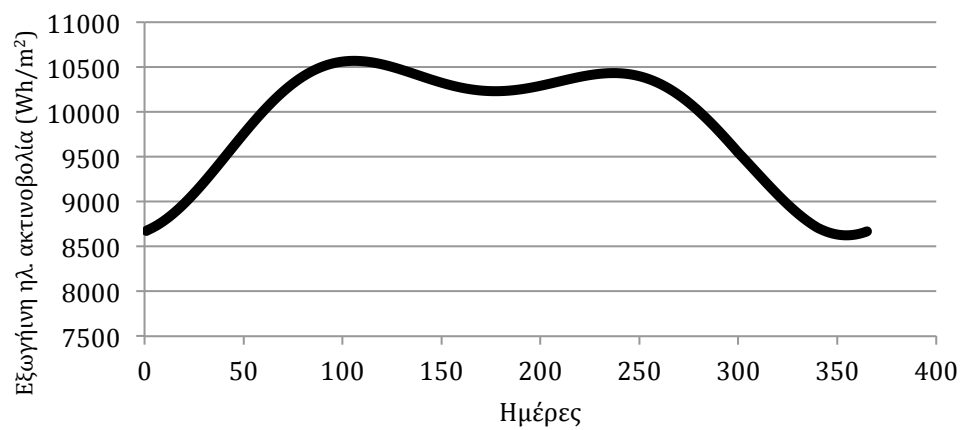
	Εύρος κλάσης ταχύτητας ανέμου (m/s)		Μέσο κλάσης (m/s)	Μέση τιμή(Wh)	Τυπική απόκλιση (Wh)	Ασυμμετρία
71	13.42	13.74	13.58	120646000.00	28885677.77	-1.47
72	13.75	13.98	13.86	124819500.00	22609786.73	-0.75
73	13.99	14.26	14.12	131381666.67	19914985.84	-1.12
74	14.30	14.69	14.49	133801500.00	25762971.13	-1.24
75	14.71	15.03	14.87	140930333.33	19703677.19	-0.78
76	15.05	15.38	15.21	121676500.00	35066577.96	-0.76
77	15.38	15.80	15.59	141128333.33	35527581.52	-1.29
78	15.80	16.44	16.12	134788833.33	34675599.56	-0.73
79	16.45	17.06	16.76	127846333.33	48224165.39	-0.85
80	17.07	17.72	17.39	132789333.33	43609357.88	-0.90
81	17.72	18.60	18.16	133441333.33	40348903.59	-0.83
82	18.63	19.54	19.08	110947666.67	49961175.37	-0.23
83	19.60	20.48	20.04	123819000.00	35394625.97	-0.79
84	20.49	21.48	20.98	103886500.00	44181877.51	0.12
85	21.53	23.77	22.65	107422666.67	36380622.54	0.20
86	24.02	26.64	25.33	72251666.67	19482590.87	-0.25
87	26.88	36.94	31.91	34780000.00	16602450.33	0.52

Παράρτημα Δ

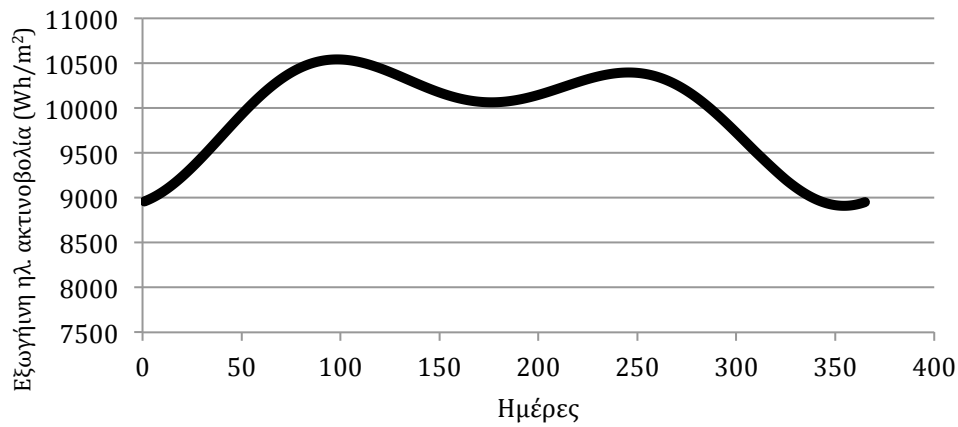
Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία για διάφορες κλίσεις στη θέση εδιαφέροντος



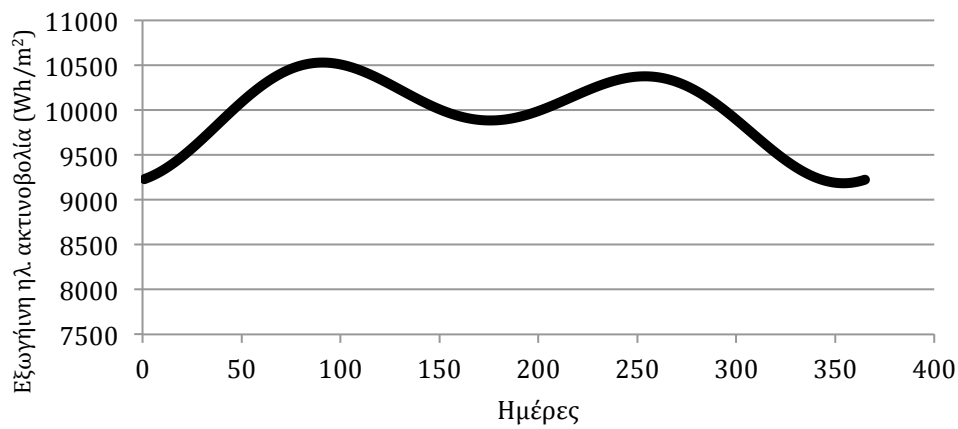
Σχήμα Δ.1 Ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 26°.



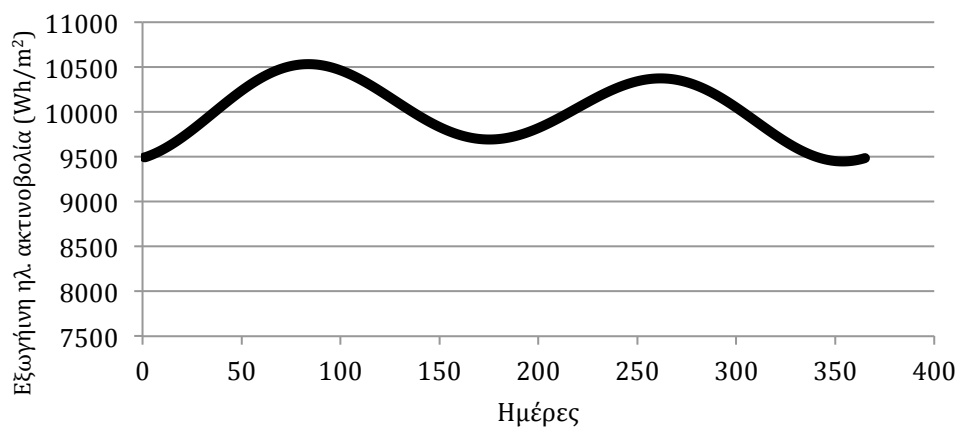
Σχήμα Δ.2 Ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 28°.



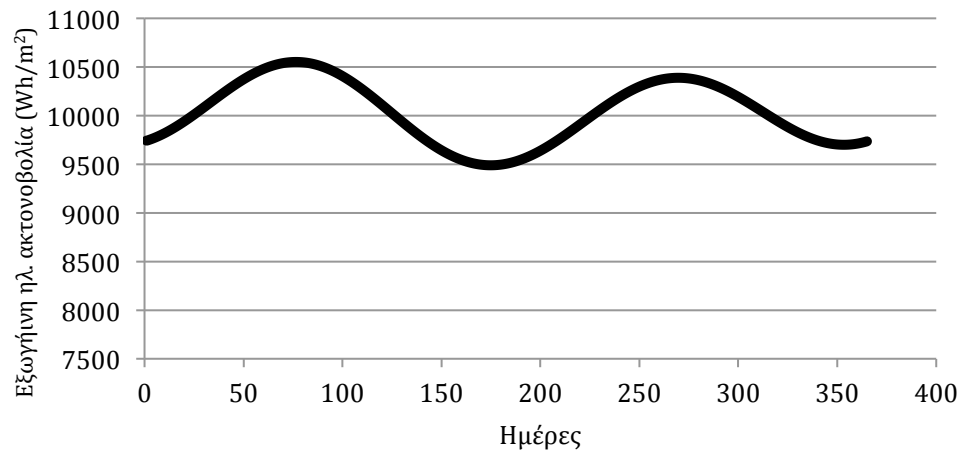
Σχήμα Δ.3 Ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 30° .



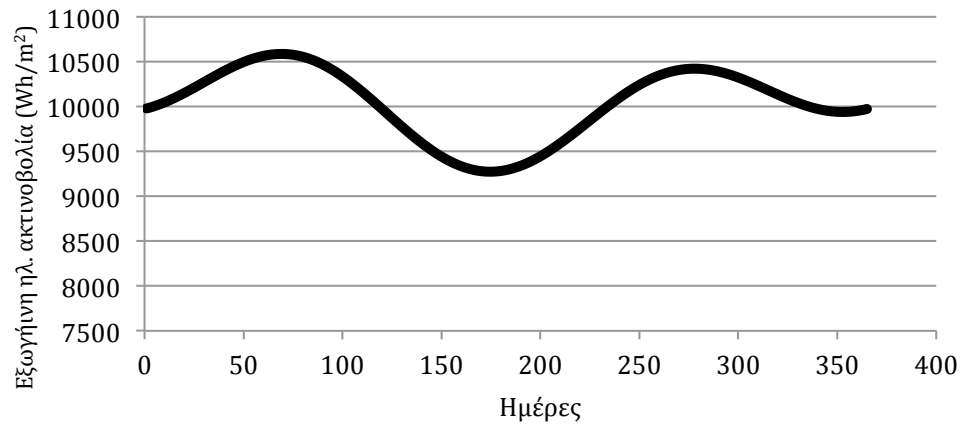
Σχήμα Δ.4 Ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 32° .



Σχήμα Δ.5 Ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 34° .



Σχήμα Δ.6 Ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 36°.



Σχήμα Δ.7 Ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία σε επίπεδο με κλίση 38°.

