

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πρόβλεψη Παραγωγής Φωτοβολταϊκού Πλαισίου με
χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων**

Μιχελογιαννάκης Θεοχάρης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής, Σταυρακάκης Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Π.Δ 407/80, Τσικαλάκης Αντώνιος

Χανιά, Φεβρουάριος 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σταυρακάκη Γεώργιο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με την παρούσας διπλωματική εργασία.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον διδάκτορα κ. Τσικαλάκη Αντώνιο για τη συνεχή καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε και το χρόνο που διάθεσε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Σε αυτήν οφείλεται ότι έχω μέχρι σήμερα επιτύχει.

Περίληψη

Η διείσδυση της Φωτοβολταϊκής (Φ/Β) παραγωγής αυξάνεται σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης παραγωγής ενός Φ/Β πλαισίου 225W και η παροχή πληροφοριών αναφορικά με το σφάλμα πρόβλεψης. Στα πλαίσια αυτά, χρησιμοποιήθηκε το εμπειρικό μοντέλο της Sandia National Laboratories και μια ομάδα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), υλοποιημένα σε γλώσσα του περιβάλλον matlab. Το μοντέλο της Sandia National Laboratories χρησιμοποιεί ως εισόδους μετεωρολογικά δεδομένα και δεδομένα που παρέχονται από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή και εξάγει τιμές ισχύος. Τα ΤΝΔ εκπαιδεύτηκαν ώστε να κάνουν βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη μετεωρολογικών δεδομένων.

Αρχικά, με σκοπό την ωριαία πρόβλεψη έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και ταχύτητας του ανέμου επόμενου 24ωρου, εκπαιδεύονται 3 ομάδες ΤΝΔ. Η εκπαίδευση της κάθε ομάδας έγινε με τις ωριαίες τιμές του αντίστοιχου μετεωρολογικού δεδομένου, που μετρήθηκαν στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης κατά τη διάρκεια όλου του έτους 2003. Στην πρόβλεψη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας έγινε εκτενέστερη έρευνα, διότι η Φ/Β παράγωγη εξαρτάται κυρίως από αυτήν, σε αντίθεση με την θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου. Η εκπαίδευση της ομάδας ΤΝΔ που αφορά την πρόβλεψη της, δεν περιορίστηκε μόνο με ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας του έτους 2003, αλλά αξιοποιήθηκε ακόμα μια είσοδος, οι ωριαίες τιμές μέσης ημερήσιας έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που προκύπτουν από τη μέση μηνιαία ηλιοφάνεια της περιοχής των Χανίων σύμφωνα με τα στοιχεία της TOTEE 20701-3/2010xii. Με την προσθήκη αυτή, τα ΤΝΔ επέτυχαν να προβλέψουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με μέσο απόλυτο σφάλμα 34,52watt/m² και μια τάση υποεκτίμησης της, 27% έναντι 20% υπερεκτίμησης. Παρουσιάζεται ξεχωριστά για κάθε μετεωρολογικό δεδομένο τα σφάλματα εκτίμησης του καθώς και τις συνέπειες που έχουν αυτά στην πρόβλεψη της παραγωγής.

Στην συνέχεια, χρησιμοποιείται το μοντέλο της Sandia National Laboratories, με εισόδους τις ωριαίες προβλέψεις των μετεωρολογικών δεδομένων, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής. Το μοντέλο επέτυχε να κάνει πρόβλεψη Φ/Β ισχύος με MAPE 2.8% και με ακραίο απόλυτο σφάλμα για το 95% των περιπτώσεων εντός του 14%. Επειδή υπήρξε μια τάση υποεκτίμησης της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, η αντίστοιχη υποεκτίμηση 26%, έναντι 19% υπερεκτίμησης, παρατηρήθηκε και στην πρόβλεψη παραγωγής. Παρέχεται μια συγκεντρωτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και διεξοδική ανάλυση του εύρους των σφαλμάτων της παραγόμενης πρόβλεψης που με αναλυτικά διαγράμματα και πίνακες, τα οποία μπορεί να είναι χρήσιμα για τους τελικούς χρήστες του μοντέλου όπως διαχωριστές ΣΗΕ.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την πρόβλεψη παραγωγής διαφορετικών Φ/Β πλαισίων και επίσης για την πρόβλεψη παραγωγής Φ/Β συστοιχιών ή πάρκων. Τέλος, προτείνονται τρόποι για βελτίωση του μοντέλου και περεταίρω έρευνα.

Abstract

Photovoltaic (PV) penetration has increased significantly the past few years. The purpose of this thesis is to develop a short-term forecasting model for a 225W PV panel production and provide information about its prediction error.

For this purpose, the Sandia National Laboratories model and a group of Artificial Neural Networks (ANN) were combined in MATLAB environment. The Sandia National Laboratories model uses as inputs meteorological data and data provided by the specification sheet of the manufacturer exporting power values. The ANNs were trained to implement short-term forecasting of meteorological data.

Initially, in order to forecast solar radiation intensity, temperature and wind speed for the next 24 hours, 3 groups of ANN were trained. Hourly timeseries for meteorological data measured at TUC were used as training sets for each group of ANNs. More emphasis was put on improving solar radiation intensity prediction due to its significant impact on PV production, unlike temperature or wind speed. Apart from the meteorological measurements, the hourly average daily solar radiation intensity based on measurements in Chania was used. Such an addition, improves solar radiation intensity to an average absolute error 34,52 W/m², more often underestimating its value 27% versus 20% overestimate. The errors on meteorological data forecasting were explicitly described.

The forecasted meteorological data combined with the Sandia National Laboratories, exports forecasted results of PV output. The model succeeded in forecasting the PV output with MAPE 2.8%. Additionally, 95% of the prediction presented lower than 14% absolute prediction error, usually underestimating PV production. A thorough presentation of the forecasting error of the model shows its efficacy under various conditions, daytime only, winter/summer period. Such table can be useful for end-users of the model such as power system operators.

The developed model can be also used to forecast production from a variety of PV panels and extrapolate predictions for PV arrays or parks.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός και Αντικείμενο της εργασίας.....	2
1.1.1 Η Διάρθρωση της Εργασίας	3
2. Φυσική του Ήλιου και Ηλιακή Ενέργεια.....	5
2.1 Ήλιος.....	6
2.1.1 Η ενέργεια του Ηλίου.....	7
2.1.2 Ηλιακή σταθερά.....	7
2.1.3 Κίνηση του ηλίου.....	8
2.1.4 Ηλιακός χρόνος και τοπική ώρα.....	12
2.2 Ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας και βασικοί ορισμοί.....	13
2.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια	14
2.2.2 Συσκευές μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας.....	16
2.3 Ηλιακό Δυναμικό.....	17
2.4 Τεχνολογίες Αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας	21
2.4.1 Ενεργητικά και Παθητικά ηλιακά Συστήματα	21
2.4.2 Ήλιο-θερμικά Συστήματα	21
2.4.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	22
3.1 Δομή και λειτουργία Φ/Β στοιχείων.....	23
3.2 Τεχνολογίες Φ/Β.....	25
3.2.1 Με βάση το πυρίτιο.....	25
3.2.2 Λοιπές τεχνολογίες.....	27
3.3 Στήριξη Φ/Β	28
3.3.1 Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης.....	28
3.3.2 Στήριξη του συλλέκτη με δυνατότητα συνεχής παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου (ηλιοτρόπια)	30
3.4 Αντιστροφείς Φ/Β συστημάτων	32
3.5 Αυτόνομα και διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα.....	33
3.5.1 Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Stand Alone).....	33
3.5.2 Διασύνδεση Φ/Β στο Δίκτυο	34
3.6 Επιπτώσεις διείσδυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	38
3.6.1 Επιπτώσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα σε δίκτυα διανομής	38
3.6.2 Περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη της ηλιακής ενέργειας	40
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	43
4.1 Μοντέλο της μιας Διόδου(single diode model).....	43
4.2 Μοντέλο της Sandia National Laboratories	46

4.2.1	Εξισώσεις Απόδοσης Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	47
4.2.2	Βασικές Εξισώσεις.....	48
4.2.3	Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς (Standard Test Conditions, STC).....	50
4.2.4	Παράμετροι σχετικοί με την Ακτινοβολία	50
4.2.5	Προσδιορισμός της Ενεργού Ακτινοβολίας (E_e).....	53
4.2.6	Παράμετροι Εξαρτώμενοι από τη Θερμοκρασία.....	54
4.2.7	Θερμοκρασία Λειτουργίας Πλαισίου.....	55
4.2.8	Επιρροή της Ταχύτητας του Άνεμου	58
4.2.9	Λόγοι που επιλέχτηκε το μοντέλο της Sandia National Laboratories	60
4.3	Υλοποίηση του μοντέλο της Sandia National Laboratories σε Matlab	60
4.4	Χρήση του μοντέλο της Sandia National Laboratories σε Matlab	61
4.4.1	Επιλογή Φ/Β Συστήματος	62
4.4.2	Επιλογή Τύπου Εγκαταστάτης του Φ/Β Συστήματος.....	63
4.4.3	Επιλογή Τρόπου Εγκατάστασης του Φ/Β Συστήματος	63
4.4.3.1	Μετατροπή οριζόντιας ακτινοβολίας σε ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου ..	63
5.	ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ	65
5.1	Ο ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΝΕΥΡΩΝΑΣ	65
5.2	Ο ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΝΕΥΡΩΝΑΣ	66
5.2.1	Ιστορική Αναδρομή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	69
5.3	Αρχιτεκτονικές ΤΝΔ.....	73
5.3.1	Τρόπος Μετάδοσης Παλμού.....	73
5.3.2	Επίπεδα Νευρώνων	74
5.3.3	Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης ΤΝΔ.....	75
5.4	Μάθηση ΤΝΔ	76
5.4.1	ΜΑΘΗΣΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	77
5.5	Ταξινόμηση ΤΝΔ.....	77
5.6	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	78
5.6.1	Εφαρμογές στον Τομέα της Ενέργειας.....	79
5.7	Perceptron ΤΝΔ.....	80
5.7.1	ΤΟ ΑΠΛΟ PERCEPTRON.....	80
5.7.2	ΤΟ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ PERCEPTRON.....	82
5.7.3	Ο Αλγόριθμος Ανάστροφης Διάδοσης (Back Propagation).....	83
5.7.3	Εφαρμογές – Δυνατότητες του Πολυστρωματικού Perceptron.....	84
5.8	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΤΝΔ.....	85
5.8.1	Πλεονεκτήματα των Νευρωνικών Δικτύων	86
5.8.2	Μειονεκτήματα των Νευρωνικών Δικτύων	86
6.	Δεδομένα και Αποτελέσματα.....	87

6.1 Παρουσίαση δεδομένων και παραδοχών που έγιναν.....	87
6.2 Περιγραφή μοντέλου πρόβλεψης	88
6.2.2 Περιγραφή ΤΝΔ πρόβλεψης.....	91
6.2.1 Τελική πρόβλεψη του μοντέλου	93
6.3 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	94
6.3.1 Επιλογή των εισόδων και των νευρώνων.....	94
6.3.2 Πρόβλεψη Έντασης Ηλιακής Ακτινοβολίας επόμενης ώρας.....	96
6.3.3 Πρόβλεψη Έντασης Ηλιακής Ακτινοβολίας με 6ωρο Ορίζοντα.....	102
6.3.4 Πρόβλεψη Έντασης Ηλιακής Ακτινοβολίας με 24ωρο Ορίζοντα.....	108
6.3.5 Γενικοί Συγκεντρωτικοί Πινάκες.....	113
6.3.6 Υπολογισμοί σφαλμάτων μόνο στις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια οπότε και παραγωγή.....	114
6.3.7 Παρουσίαση της πρόβλεψης ηλιακής ακτινοβολίας σε παράθυρα 24ωρου ορίζοντα με ανανέωση.....	118
6.4 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	123
6.4.1 Πρόβλεψη θερμοκρασίας 1 Ώρα Μπροστά.....	124
6.4.2 Πρόβλεψη Θερμοκρασίας με 6ωρο Ορίζοντα.....	129
6.4.3 Πρόβλεψη Θερμοκρασίας με 24ωρο Ορίζοντα.....	134
6.4.4 Γενικοί Συγκεντρωτικοί Πινάκες.....	139
6.5 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ	140
6.5.1 Πρόβλεψη Ταχύτητας Ανέμου επόμενης Ωρας.....	140
6.5.2 Πρόβλεψη Ταχύτητας Ανέμου με 6ωρο Ορίζοντα.....	145
6.5.3 Πρόβλεψη Ταχύτητας Ανέμου με 24ωρο Ορίζοντα.....	150
6.5.4 Γενικοί Συγκεντρωτικοί Πινάκες.....	155
6.5.5 Αποτελέσματα χωρίς πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου	155
7. Αποτελέσματα Τελικής Πρόβλεψης.....	157
7.1 Παρουσίαση της τελικής πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής σε παράθυρα 24ωρου ορίζοντα με ανανέωση.....	157
7.2 Σφάλματα Πρόβλεψης για Όλο το Έτος Συνολικά	162
7.2.1 Σφάλματα Πρόβλεψης Επόμενης Ωρας.....	162
7.2.2 Σφάλματα Πρόβλεψης 6ωρου ορίζοντα.....	167
7.2.3 Σφάλματα Πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα.....	174
7.2.4 Συγκεντρωτικά τα σφάλματα πρόβλεψης για όλο το έτος.....	183
7.2.5 Σφάλματα πρόβλεψης 24ωρου μόνο για τις ώρες που αναμένεται παράγωγη.....	187
7.3 Σφάλματα Πρόβλεψης για 2 εποχές του Έτους.....	190
7.3.1 Σφάλματα Πρόβλεψης Επόμενης Ωρας.....	190
7.3.2 Σφάλματα Πρόβλεψης 6ωρου ορίζοντα.....	193
7.3.3 Σφάλματα Πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα.....	196

7.3.4 Συγκεντρωτικά τα σφάλματα πρόβλεψης για τις 2 εποχές και όλο το έτος μαζί	211
7.4 Σφάλματα Πρόβλεψης για τους 12 Μήνες του Έτους.....	219
7.4.1 Σφάλματα Πρόβλεψης Επόμενης Ώρας	219
7.4.2 Σφάλματα Πρόβλεψης 6ωρου ορίζοντα.....	221
7.4.3 Σφάλματα Πρόβλεψης 24ωρου	223
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	227
8.1 Ανάλυση συμπεριφοράς του μοντέλου.....	231
8.2 Ανάλυση Ευαισθησίας Αποτελεσμάτων.....	234
8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	235
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	236

1. Εισαγωγή

Στις μέρες μας γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη αξιοποίησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Η αλόγιστη χρήση ορυκτών για την κάλυψη των σύγχρονων ενεργειακών αναγκών έχει προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ενεργειακή κρίση που συντελείται παγκοσμίως (μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων) αλλά και τις προοπτικές που δημιουργούνται με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστά αναγκαία την περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη του κλάδου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Μία μορφή ΑΠΕ είναι η ηλιακή ενέργεια την οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μέσω της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) στοιχείων και να την μετατρέψουμε απευθείας σε ηλεκτρική.

Η χώρα μας διαθέτει σημαντικό ηλιακό δυναμικό, και έτσι έχει σημαντικές προοπτικές στην αξιοποίηση της τεχνολογίας των Φ/Β. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα υπολογίζεται στα 18220 MW. Το Νοέμβριο του 2012 η εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στην Ελλάδα έφτασε τα 1340 MW (1057 MW σε μονάδες παραγωγής και 283 MW σε στέγες)ⁱ, δηλαδή το 7.3% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Όσο αφορά την παραγωγή, από τον Ιανουάριο μέχρι και τον Οκτώβριο του 2012, τα Φ/Β παρήγαγαν 1.397.270 MWh από το σύνολο των 42.324.163 MWh που καταναλωθήκαν στην Ελλάδα, δηλαδή το 3.3% της συνολικής ζήτησης.

Στην Κρήτη, όπου ομολογουμένως η ηλιοφάνεια είναι μεγαλύτερη από τη μέση ηλιοφάνεια στην υπόλοιπη Ελλάδα, η εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β έφτασε τα 74.08 MW σύμφωνα με τις τελευταίες πληροφορίες της ΔΕΔΔΗΕⁱⁱ τον Δεκέμβριο του 2012. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο νησιωτικό ΣΗΕ είναι 1075 MW, άρα τα Φ/Β αποτελούν το 6.9% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος. Όσο αφορά την παραγωγή, από τον Ιανουάριο μέχρι και τον Δεκέμβριο του 2012, τα Φ/Β παρήγαγαν 5.209 MWh από το σύνολο των 225.709 MWh που καταναλωθήκαν στην Κρήτη, δηλαδή το 2.3% της συνολικής παραγωγής.

Αξίζει να επισημάνουμε και ότι σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 77/2001ⁱⁱⁱ, ο ενδεικτικός εθνικός στόχος ήταν η συμμετοχή των ΑΠΕ κατά 12% στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε. ως το 2010, ενώ για την Ελλάδα το αντίστοιχο ποσοστό ορίστηκε σε 20,1%. Για το 2020 εκτιμάται ότι η συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα θα πρέπει να ανέλθει σε ποσοστό 30-35%!

Η αυξημένη διείσδυση Φ/Β παραγωγής αυξάνει την ανάγκη για την ακριβέστερη εκτίμηση της μελλοντικής παραγωγής της σε χρονικό διάστημα μερικών ωρών. Οι διαχειριστές ενός ΣΗΕ θα πρέπει να διαχειριστούν την αυξημένη διείσδυση πηγών με μη ρυθμιζόμενη έξοδο (Non-dispatchable units) τόσο στην επιλογή των μονάδων (Unit Commitment), όσο και στην Οικονομική κατανομή. Η αύξηση της αβεβαιότητας στις δύο αυτές διαδικασίες Οικονομικής λειτουργίας επιβαρύνει οικονομικά το υπό διαχείριση ΣΗΕ. Η βελτιωμένη εκτίμηση της Φ/Β Παραγωγής συμβάλλει ώστε να περιορίζεται η ανάγκη για διατήρηση αυξημένης στρεφόμενης εφεδρείας λόγω της άγνοιας και της αβεβαιότητας της παραγωγής. Μέχρι πρόσφατα, η χαμηλή διείσδυση Φ/Β δεν επηρέαζε σημαντικά την αβεβαιότητα αυτή. Με την αύξηση της διείσδυσης η επίδραση αυτή αναμένεται να είναι σημαντικότερη. Η μείωση της αβεβαιότητας για την εκτιμώμενη Φ/Β παραγωγή μπορεί να έχει και οικονομικά οφέλη, όπως χαρακτηριστικά έχει παρουσιάσει μελέτη για το ΣΗΕ Κύθνου για το έτος 2002. Εκείνη τη χρονιά, το Φ/Β πάρκο των 100kW συνεισέφερε το 1% της ενέργειας του νησιού. Η μελέτη έδειξε ότι διατηρώντας ποσοστό εφεδρείας για την πρόβλεψη φορτίου 6% και ποσοστό εφεδρείας για την πρόβλεψη αιολικής παραγωγής 50%

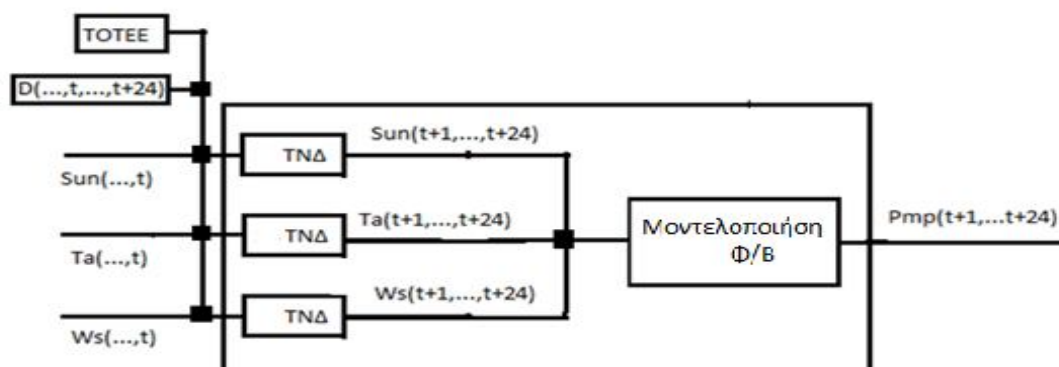
αν καταφέρουμε να βελτιώσουμε την αβεβαιότητα πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής από 100% σε 50% τότε έχουμε 0.16% κέρδος συνολικά στο έτος^{iv}.

Όλα τα παραπάνω φανερώνουν τη σημασία που έχει η κατά το δυνατόν αποτελεσματικότερη πρόβλεψη της Φ/Β παραγωγής και συνάμα η παροχή ακριβέστερων πληροφοριών για το μοντέλο πρόβλεψης. Η πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής μπορεί να ενταχθεί σε προηγμένα λογισμικά ελέγχου^v προκειμένου να συμβάλλει στην βελτιστοποίηση λειτουργίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) υπό υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Τέτοιου είδους λογισμικά συχνά προβλέπουν 2 κύκλους λειτουργίας έναν πολύ βραχυπρόθεσμο και έναν μακροπρόθεσμο [vi-vii]. Η λειτουργία σε δύο τέτοιους κύκλους βοηθάει στην επιλογή των κατάλληλων μονάδων για να λειτουργούν ως μονάδες βάσης για το μακροπρόθεσμο κύκλο, ενώ ο βραχυπρόθεσμος κύκλος μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικότερα τις πιο γρήγορες μεταβολές της παραγωγής από ΑΠΕ σε σύντομο χρονικό διάστημα καθώς και τις μονάδες αιχμής. Έτσι για τον μακροπρόθεσμο κύκλο, προτείνεται η ωριαία ανανέωση της πρόβλεψης φορτίου και παραγωγής από ΑΠΕ για τις επόμενες 24 έως 48 ώρες, ενώ για το βραχυπρόθεσμο κύκλο προβλέπεται η ανανέωση ανά 15-20 λεπτά των προβλέψεων και του σχεδιασμού της παραγωγής από τις μονάδες, αφού είναι εφικτό να εκκινήσουν στη συγκεκριμένη ώρα. Αν δεν υπάρχει πρόβλεψη του φορτίου ή της παραγωγής ΑΠΕ για κάθε 20λεπτο, τότε μπορούν να προκύψουν με γραμμική παρεμβολή στην ωριαία πρόβλεψη.

1.1 Σκοπός και Αντικείμενο της εργασίας

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην πρόβλεψη παραγωγής από Φ/Β μονάδες. Σκοπός της είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της παραγωγής ενός Φ/Β συστήματος για ορίζοντα 6 και 24 ωρών και ανανέωσης της κάθε ώρα. Δεν θα μείνουμε όμως μόνο στην πρόβλεψη της παραγωγής, διότι όπως αναφέραμε παραπάνω το βασικό πρόβλημα που έχουν οι διαχειριστές, σχετικά με τις ΑΠΕ, είναι η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της παραγωγής τους. Αντικείμενο της επίσης είναι και η παροχή πληροφοριών ώστε να είναι δυνατή η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής που κάναμε.

Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκε το μοντέλο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα(TNΔ) μας δίνουν την πρόβλεψη μετεωρολογικών δεδομένων έχοντας ως εισόδους παρελθοντικές τιμές. Έπειτα χρησιμοποιούμε το μοντέλο της Sandia National Laboratories, που βασίζεται σε μετρήσεις και εμπειρικές σχέσεις και δεδομένα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ως εισόδους μετεωρολογικά δεδομένα και

δεδομένα που παρέχονται από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή. Με βάση αυτά υπολογίζουμε την παραγόμενη ισχύ.

1.1.1 Η Διάρθρωση της Εργασίας

Η διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής:

Στο 2^ο κεφάλαιο, αναφέρονται γενικές έννοιες σχετικά με την Φυσική του Ήλιου και την Ηλιακή Ενέργεια. Παρουσιάζονται οι εξισώσεις κίνησης του Ήλιου, οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και οι εξισώσεις υπολογισμού της κάθε μίας τόσο στο οριζόντιο όσο και σε κεκλιμένο επίπεδο.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια γενική επισκόπηση των Φ/Β συστημάτων, που είναι ο βασικός τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των Φ/Β στοιχείων και αναφέρονται οι τεχνολογίες Φ/Β πλαισίων. Περιγράφονται επίσης συνοπτικά και θέματα στήριξης και αντιστροφείς Φ/Β συστημάτων. Τέλος περιγράφονται συνοπτικά τα αυτόνομα και διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα και οι επιπτώσεις διείσδυσης τους στα δίκτυα διανομής, καθώς και σε διάφορα επίπεδα, κοινωνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο ενεργειακής παραγωγής Φ/Β που χρειαζόμαστε για να κάνουμε πρόβλεψη παραγωγής. Το εμπειρικό αυτό μοντέλο, που προτάθηκε από τη Sandia National Laboratories, περιλαμβάνει ηλεκτρικά, θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων και είναι σχεδιασμένο να μετατρέπει τις ωριαίες χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων σε ωριαίες χρονοσειρές Φ/Β παραγωγής. Παρουσιάζονται επεξηγηματικά οι εξισώσεις του μοντέλου. Αναλύονται πως τα μετρολογικά δεδομένα σε συνδυασμό με τον τρόπο εγκατάσταση επηρεάζουν την απόδοση των Φ/Β πλαισίων. Τέλος, περιγράφεται συνοπτικά πως υλοποιήθηκε σε matlab script και πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η θεωρία σχετικά με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ). Αναλύονται οι συνηθισμένες αρχιτεκτονικές των ΤΝΔ, και κατηγοριοποιούνται τα πιο δημοφιλή ΤΝΔ. Παρουσιάζονται συνοπτικά εφαρμογές των ΤΝΔ με έμφαση στον τομέα της ενέργειας. Στην εργασία αυτή για την πρόβλεψη μετεωρολογικών δεδομένων χρησιμοποιούνται MLP δίκτυα για αυτό και υπάρχει σύντομη περιγραφή για αυτά. Τέλος, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ΤΝΔ σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους υπολογισμού και πρόβλεψης.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η προσέγγιση που ακολουθήθηκε. Παρουσιάστηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα και οι παραδοχές που ακολουθήθηκαν για να αντιμετωπιστούν ελλείψεις τους. Αναλύεται διεξοδικά κάθε τμήμα του μοντέλου πρόβλεψης και παρουσιάζεται ξεχωριστά και αναλυτικά η προσέγγιση για την πρόβλεψη κάθε μετεωρολογικού δεδομένου χωριστά. Αναλύονται τα ΤΝΔ που διερευνήθηκαν με τις διάφορες αρχιτεκτονικές και εισόδους. Τέλος για κάθε μετεωρολογικό δεδομένο παρουσιάζονται με ιστογράμματα και συγκεντρωτικούς πίνακες τα σφάλματα εκτίμησης, για κάθε οριζόντιο πρόβλεψης, καθώς και τις συνέπειες που αυτά έχουν στην παραγωγή.

Στο 7^ο κεφάλαιο είναι συγκεντρωμένα όλα τα αποτελέσματα της τελικής πρόβλεψης παραγωγής του μοντέλου. Χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις για τα μετρολογικά δεδομένα (τιμές έντασης ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου) όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 6 και χρησιμοποιώντας το ανεπτυγμένο μοντέλο εξάγονται και παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα πρόβλεψης παραγωγής του πλαισίου ESP series60 poly 225W. Για λόγους ανάλυσης αβεβαιότητας στο κεφάλαιο αυτό, εκτός από ανάλυση του MAPE πρόβλεψης παραγωγής, με διάγραμμα και συγκεντρωτικούς πίνακες δείχνουμε σε ποια όρια κυμαίνεται το σφάλμα του μοντέλου σε ακραίες περιπτώσεις και τα ποσοστά των

περιπτώσεων που υπερεκτιμάται και υποεκτιμάται η παραγωγή από το μοντέλο, για κάθε ώρα της ημέρας. Όλα αυτά εκτός από συνολικά για το έτος, παρουσιάζονται και για δυο εποχές του έτους, καθώς και για κάθε μήνα χωριστά.

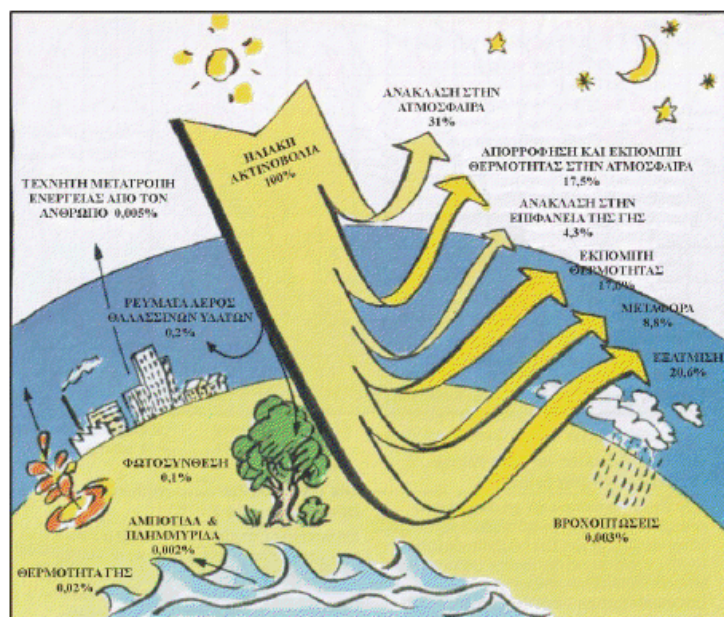
Στο 8^ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα μας για τα αποτελέσματα του μοντέλου πρόβλεψης. Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας για το μοντέλο. Τέλος υπάρχουν προτάσεις για βελτίωση του μοντέλου και περαιτέρω έρευνα.

2. Φυσική του Ήλιου και Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Το ποσό ενέργειας που παρέχεται από τον ήλιο και προσπίπτει στην επιφάνεια της γης ισοδυναμεί με 10.000 φορές την παγκόσμια κατανάλωση.

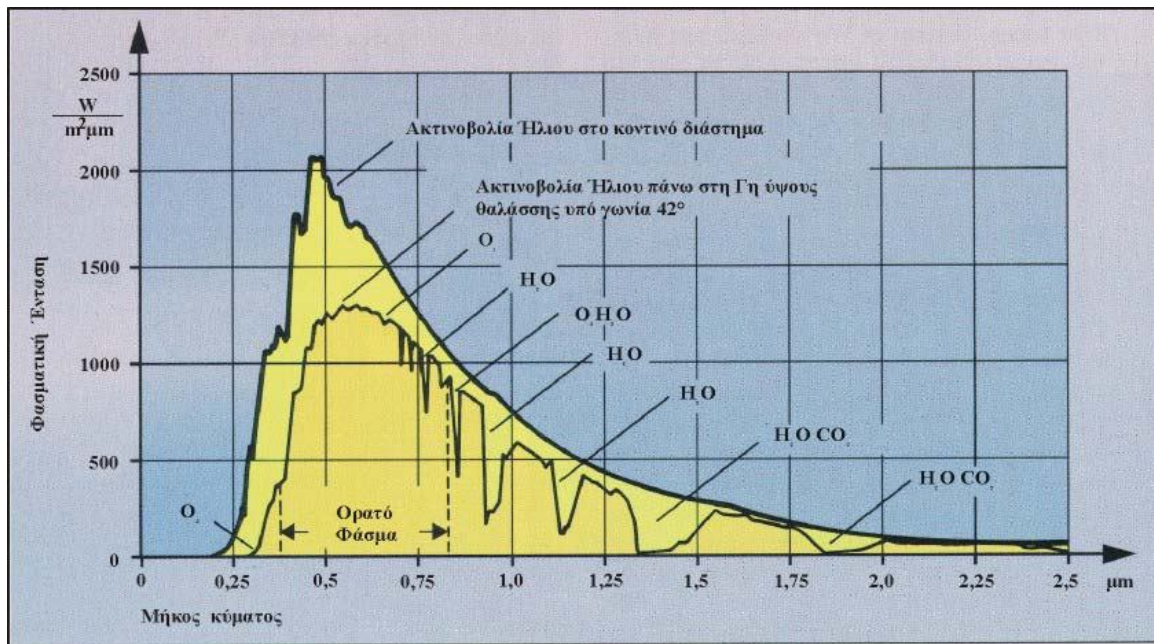
Από την ενέργεια η οποία φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας:

- Το 31% ανακλάται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας της γης.
- Το 47% φθάνει μέχρι την επιφάνεια της γης.
- Το 23% συμβάλλει στη δημιουργία των ανέμων, των κυμάτων και γενικά ρυθμίζει το κλίμα.
- Οι ωκεανοί απορροφούν το 33% της ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια της γης.
- Η ξηρά απορροφά το 14% της ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια της γης.
- Το 0,1% της ηλιακής ενέργειας απορροφάται από τα φυτά.



Εικόνα 2.1 Η ηλιακή ενέργεια στη Γη ^{viii}

- Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την θερμοκρασία του ήλιου που είναι περίπου 5900K
- Το 99% της ηλιακής ενέργειας εμφανίζεται σε μήκος κύματος από 0.25 έως 4.0μm
- Σύμφωνα με την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας:
 - Ορατό [λ : 0.39-0.77μm] περιέχει το 46.41% της ενέργειας
 - Υπεριώδες [$\lambda < 0.4\mu\text{m}$] περιέχει το 8.03% της ενέργειας
 - Υπόλοιπο [$\lambda > 0.77\mu\text{m}$] περιέχει το 46.4% της ενέργειας ^{viii}



Εικόνα 2.2 Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας

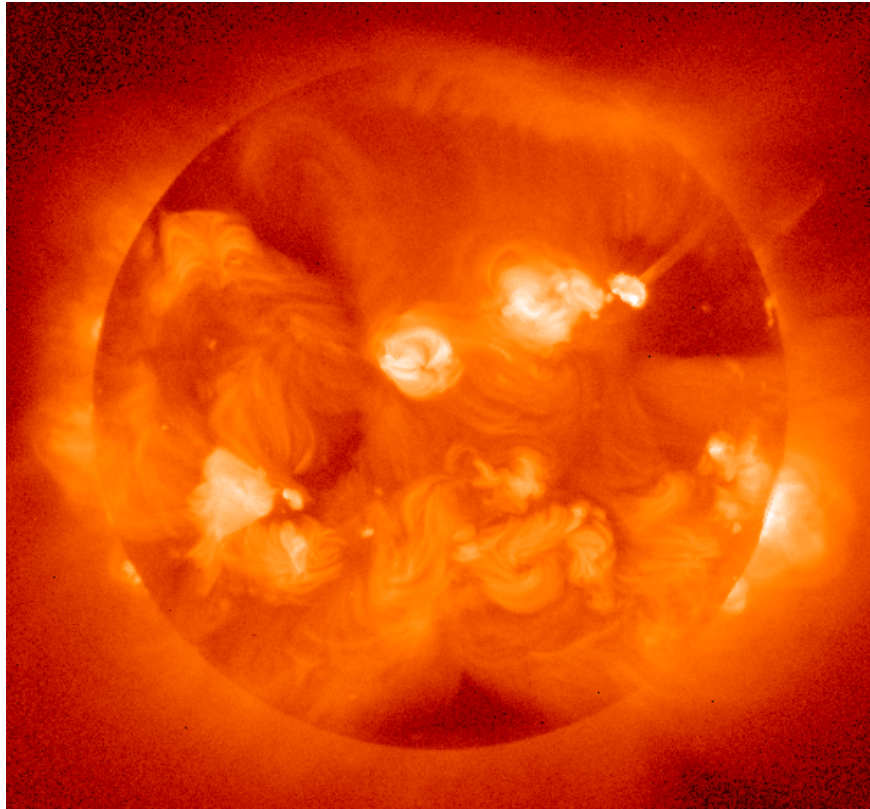
Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε στη φύση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο και που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Συγκεκριμένα, πως η κίνηση του Ήλιου, η ατμόσφαιρα και η θέση λήψης της ακτινοβολίας μπορούν να επιδράσουν στα δεδομένα.

2.1 Ήλιος

Ο Ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και το λαμπρότερο σώμα του ουρανού. Είναι σχεδόν μια τέλεια σφαίρα με διάμετρο 1,4 εκατομμύρια χιλιόμετρα (109 φορές περισσότερο από τη Γη), και η μάζα του (2×10^{30} κιλά) αποτελεί το 99.86% της μάζας του ηλιακού συστήματος. Η φωτεινότητά του είναι τέτοια, ώστε κατά την διάρκεια της ημέρας να μην επιτρέπει, λόγω της έντονης διάχυσης του φωτός, σε άλλα ουράνια σώματα να εμφανίζονται. Ο Ήλιος είναι το κοντινότερο στη Γη άστρο, σε απόσταση 149,6 εκατομμυρίων χιλιομέτρων (1ΑΜ¹). Ο Ήλιος ακολουθεί μία τροχιά μέσα στον Γαλαξία σε μία απόσταση 25.000 με 28.000 έτη φωτός από το κέντρο του, ολοκληρώνοντας μία περιφορά σε περίπου 226 εκατομμύρια έτη.

Η σημασία του Ήλιου στην εξέλιξη και την διατήρηση της ζωής στη Γη είναι καιρία, καθώς με τη θεμελιώδη διαδικασία της φωτοσύνθεσης προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών, και διατηρεί την επιφανειακή θερμοκρασία της Γης σε ανεκτά για τη ζωή επίπεδα, καθώς επίσης και προκαλεί τα μετεωρολογικά φαινόμενα. Ο χρόνος ζωής του Ήλιου εκτιμάτε περίπου στα 10 δισεκατομμύρια έτη, ενώ η ηλικία του Ηλίου εκτιμάται στα 5 δισεκατομμύρια. Ο Ήλιος αποτελεί το 99.8632% της συνολικής μάζας του ηλιακού συστήματος.

¹ Η Αστρονομική Μονάδα (α.μ.) είναι μονάδα μέτρησης αποστάσεων. Ορίζεται ως η μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο



Εικόνα 2.3 Ήλιος

2.1.1 Η ενέργεια του Ηλίου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω κάθε δευτερόλεπτο περίπου 655 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου από τη μάζα του ήλιου μετατρέπονται σε 650 εκατομμύρια τόνους ηλίου που συνεχίζουν να αποτελούν μάζα του Ήλιου. Από τη διαφορά αυτή 4,6 εκατομμύρια τόνοι μετατρέπονται σε ενέργεια. Ο Ήλιος απελευθερώνει ενέργεια που έχει τιμή μετατροπής μάζας-ενέργειας 4,26 εκατομμύρια μετρικούς τόνους ανά δευτερόλεπτο, 384,6 yottawatts (3.846×10^{26} W), ή 9.192×10^{10} μεγατόνους TNT ανά δευτερόλεπτο. Αυτή η μάζα δεν καταστρέφεται για να δημιουργήσει την ενέργεια, αλλά, η μάζα είναι που μεταφέρεται ως ακτινοβολούμενη ενέργεια, όπως περιγράφεται από την ισοδυναμία της μάζας-ενέργειας².^{ix}

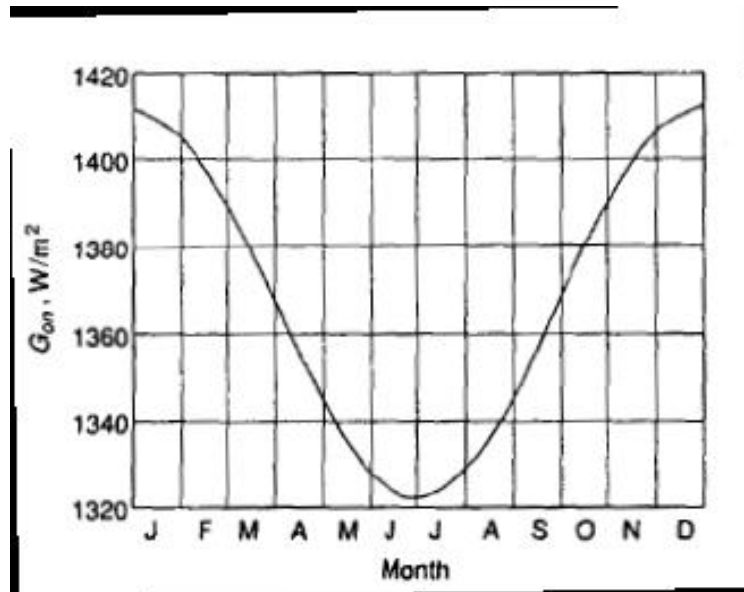
2.1.2 Ηλιακή σταθερά

Η ακτινοβολία που εκλύεται από τον ήλιο και η χωρική του σχέση με τη γη έχουν σαν αποτέλεσμα μια σχεδόν σταθερή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της γης. Ως ηλιακή σταθερά ορίζεται η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας και είναι περίπου ίση με $G_{sc} = 1367$ W/m². Οι τιμές στην βιβλιογραφία κυμαίνονται από 1353 έως 1395 W/m². Λόγω της μεταβολής της απόστασης ήλιου-γης κατά την διάρκεια του έτους χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της διαχρονικής μεταβολής της ηλιακής σταθεράς G_{on} :

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right) \quad (2.1)$$

² $E = m \cdot c^2$

όπου G_{00} η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας μετρημένη σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου την η-οστή ημέρα του έτους, και όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.^{viii}

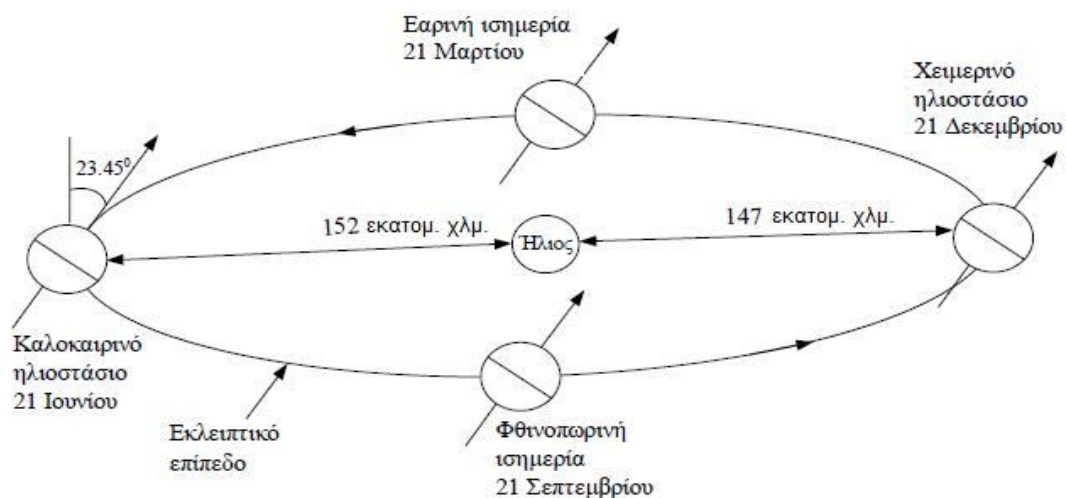


Εικόνα 2.4 Μεταβολές της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια του έτους

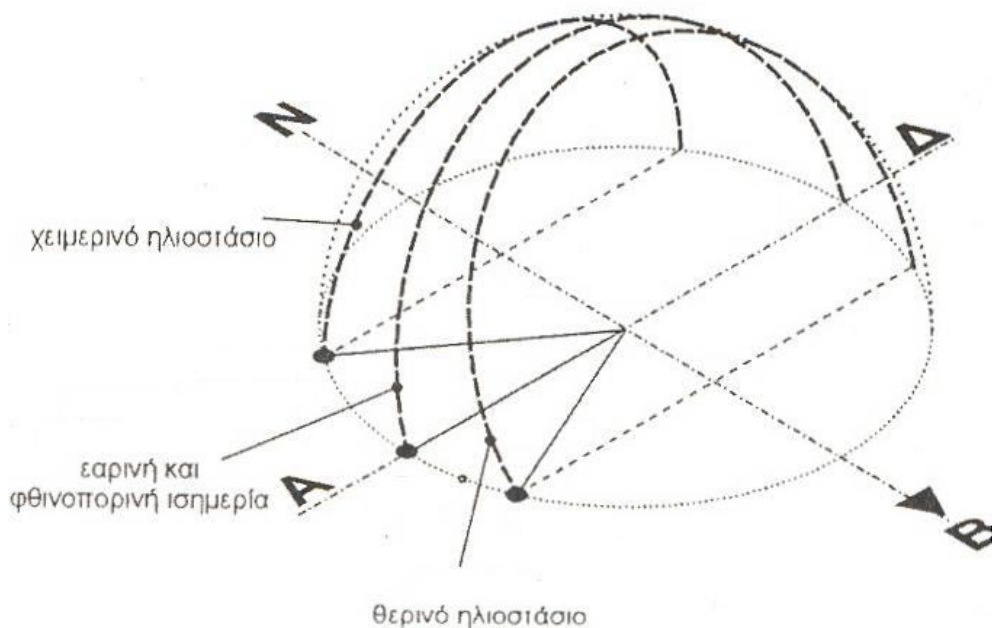
2.1.3 Κίνηση του ήλιου

Συχνά είναι αναγκαία η γνώση της κίνησης του ήλιου για τους υπολογισμούς που σχετίζονται με την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο μπορεί να αναλυθεί σε δύο κύριες συνιστώσες:^{viii}

- Περιφορά γύρω από τον ήλιο, σε ελλειπτική τροχιά, με τον ήλιο στη μια από τις δύο εστίες
- Περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της σε ελλειπτική τροχιά, με τον ήλιο στη μια από τις δύο εστίες



Εικόνα 2.5 Ετήσια περιστροφή της Γης γύρω από τον Ήλιο[3]



Εικόνα 2.6 Διαδρομή του ηλίου

2.1.3.1 Προσδιορισμός της θέσης του ήλιου

Ο προσδιορισμός της θέσης του ήλιου για μια επιφάνεια που συλλέγει ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να γίνει γνωρίζοντας τις ακόλουθες πέντε γωνίες: ^{viii}

- Γεωγραφικό πλάτος φ
- Ηλιακή απόκλιση δ
- Γωνία ώρας ω
- Κλίση επιφάνειας β
- Γωνία αζιμούθιου γ

Βασικοί ορισμοί

- Το γεωγραφικό πλάτος φ είναι η γωνιακή απόσταση ενός τόπου από τον Ισημερινό. Σε περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου αντιστοιχεί θετική τιμή γεωγραφικού πλάτους. Γεωγραφικό πλάτος του τόπου φ :

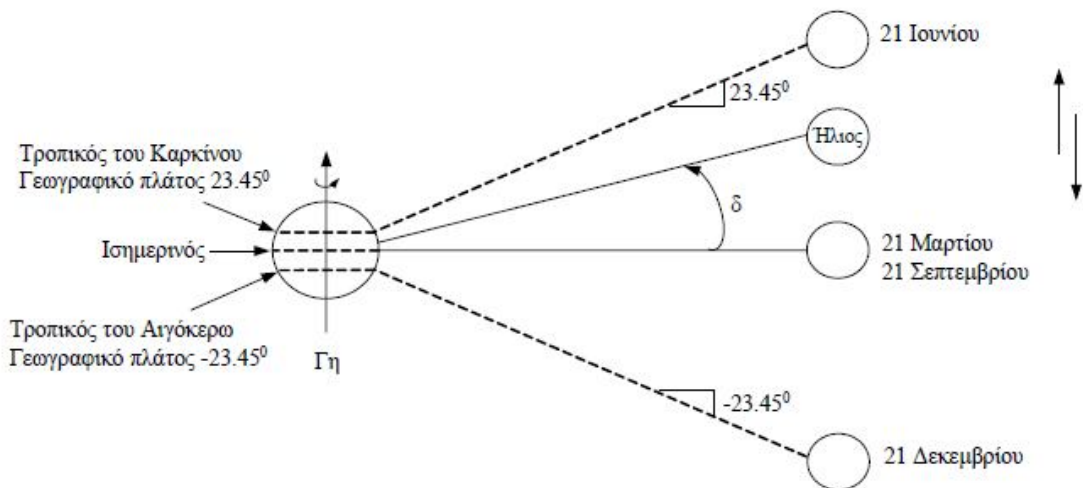
$$-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$

- Η ηλιακή απόκλιση δ είναι η γωνία ανάμεσα στην ευθεία ήλιου-γης και την προβολή της στο επίπεδο του ισημερινού και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \quad (2.2)$$

όπου n : η ημέρα του έτους.

Η ηλιακή απόκλιση παίρνει τη μέγιστη τιμή της (23.45°) κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου), και την ελάχιστη τιμή της (-23.45°) κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου).



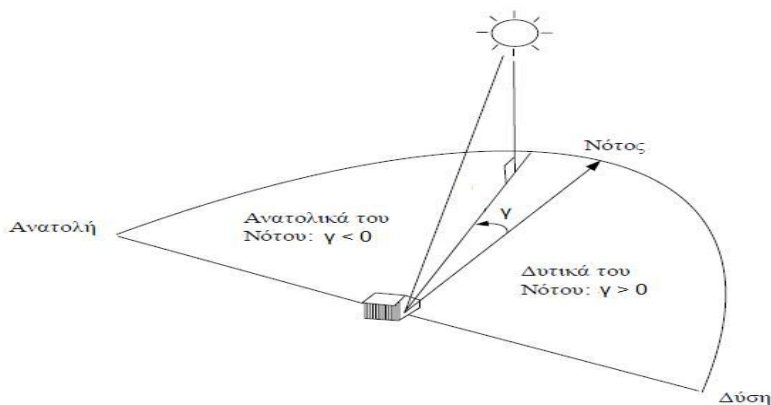
Εικόνα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση ηλιακής απόκλισης δ

- Η γωνία ώρας ω ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό 15° ανά ώρα και δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = \pm 1/4 \cdot \text{αριθμός λεπτών από το τοπικό ηλιακό μεσημέρι}$$

Οι γωνίες που αντιστοιχούν τις απογευματινές ώρες λαμβάνονται θετικές. Η γωνία ώρας σχετίζεται με τον ηλιακό χρόνο (t_s), ο οποίος είναι διαφορετικός από το χρόνο που μας δείχνει το ρολόι μας (τοπική ώρα t_c).

- Η κλίση β μιας επιφάνειας είναι η γωνιά που σχηματίζει σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.
- Η γωνία αζιμούθιου γ περιγράφει την κατεύθυνση προς την οποία είναι στραμμένη μια επιφάνεια. Για τοποθεσίες του βόρειου ημισφαιρίου (όπως η Ελλάδα), μηδενική τιμή του γ αντιστοιχεί σε νότια κατεύθυνση, θετικές τιμές του γ αναφέρονται σε δυτικούς προσανατολισμούς, και αρνητικές τιμές του γ σε ανατολικούς προσανατολισμούς.



Εικόνα 2.8 Γωνία αζιμούθιου γ

Με τη βοήθεια των πέντε γωνιών που περιγράφηκαν προηγουμένως, μπορούμε να υπολογίσουμε τις ακόλουθες γωνίες:

- Γωνία πρόσπτωσης θ
- Γωνία ζενίθ του ήλιου θ_z
- Γωνία ύψους του ήλιου α_s
- Γωνία αζιμούθιου του ήλιου γ_s
- Ωριαία γωνία δύσης ω_s

- Η γωνία πρόσπτωσης θ μιας επιφάνειας ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της καθέτου στην επιφάνεια και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (2.3)$$

Για ιδιικές περιπτώσεις υπολογίζεται ως εξής:

- Κατακόρυφες επιφάνειες ($\beta = 90^\circ$):

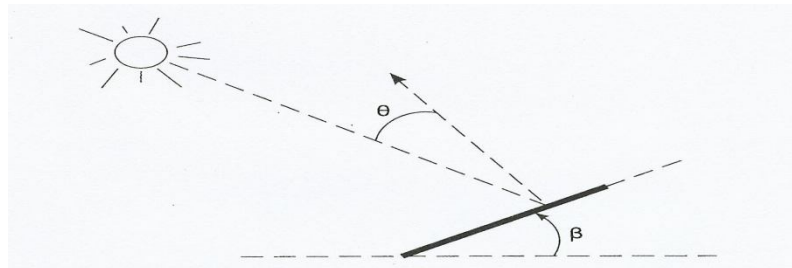
$$\cos\theta = -\sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (2.4)$$

- Οριζόντιες επιφάνειες ($\beta = 0^\circ$):

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \quad (2.5)$$

- Για κεκλιμένες επιφάνειες στο βόρειο ημισφαίριο στραμμένες προς το νότο ($\gamma = 0^\circ$):

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\omega \quad (2.6)$$



Εικόνα 2.9 Γωνία πρόσπτωσης θ

- Η γωνία ζενίθ του ήλιου θ_z είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της κατακόρυφης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$(2.7)$$

$$\cos\theta_z = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega$$

- Η γωνία ύψους του ήλιου α_s είναι η γωνία μεταξύ των ηλιακών και του οριζόντιου επιπέδου. Ισχύει επομένως ότι:

$$\theta_z + \alpha_s = 90^\circ \quad (2.8)$$

- Η γωνία αζιμούθιου του ήλιου γ_s είναι η γωνία που σχηματίζει η προβολή των ηλιακών ακτινών στο οριζόντιο επίπεδο με τη κατεύθυνση του νότου. Θετικές τιμές του γ_s

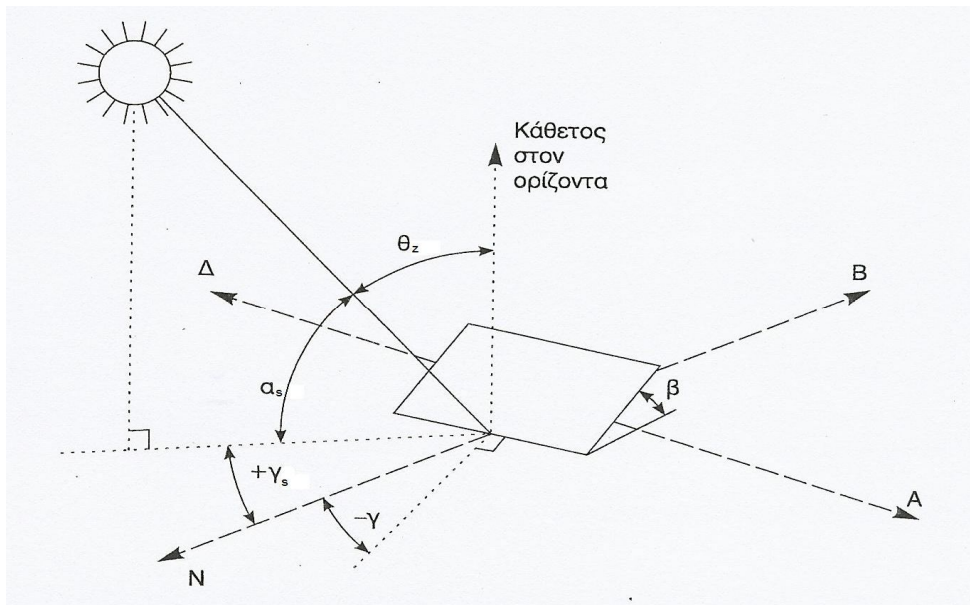
αναφέρονται σε θέσεις του ήλιου δυτικά της νότιας κατεύθυνσης, και αρνητικές τιμές του γ_s αναφέρονται σε θέσεις του ήλιου ανατολικά της νότιας κατεύθυνσης. Η γ_s υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \cdot \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cdot \cos \varphi} \right) \right| \quad (2.9)$$

όπου $\text{sign}(\omega)$ είναι η συνάρτηση πρόσημου της γωνίας ώρας ω , που λαμβάνει τιμή +1 εάν $\omega > 0$, τιμή -1 εάν $\omega < 0$, και τιμή 0 εάν $\omega = 0$.

- Ωριαία γωνία δύσης ω_s

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \quad (2.10)$$



Εικόνα 2.10 Σχηματική αναπαράσταση κάποιων από των παραπάνω γωνιών κεκλιμένης επιφάνειας

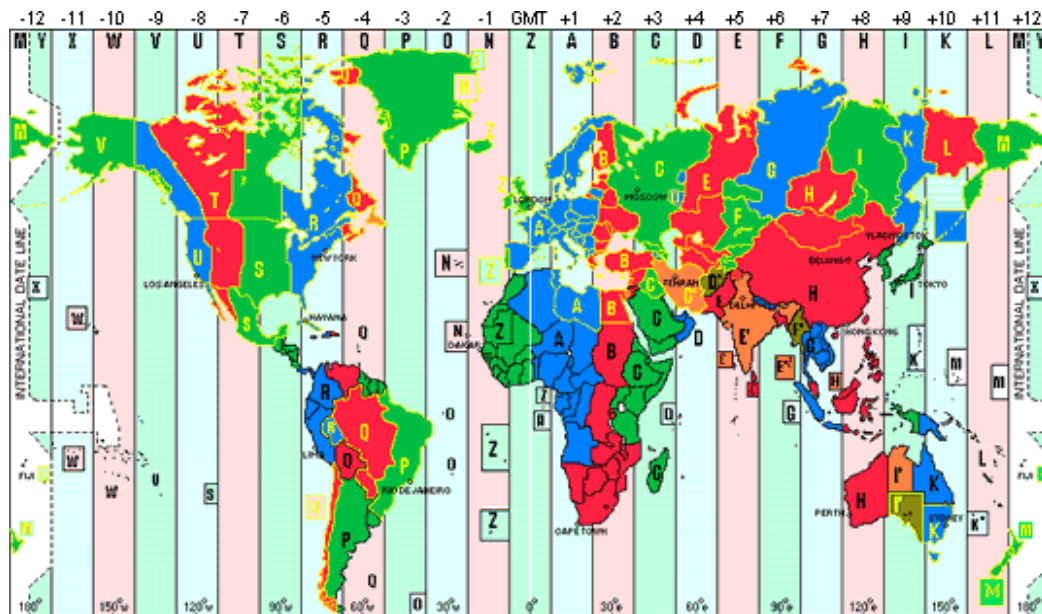
2.1.4 Ηλιακός χρόνος και τοπική ώρα

Για τους υπολογισμούς της ηλιακής γεωμετρίας ασχολούμαστε συνήθως με τον ηλιακό χρόνο, όπου όλα μετρούνται σχετικά με το ηλιακό μεσημέρι (όταν ο ήλιος είναι στη γραμμή του γεωγραφικού μήκους). Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου χρειάζεται να υπολογιστεί και η τοπική ώρα.

Υπάρχουν δύο διευθετήσεις που θα πρέπει να γίνουν προκειμένου να συνδεθεί η τοπική ωρολογιακή ώρα με την ηλιακή ώρα:

Η πρώτη είναι η διευθέτηση του γεωγραφικού μήκους που έχει να κάνει με τον τρόπο με τον οποίο οι περιοχές της γης διαιρούνται σε χρονικές ζώνες όπως αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 2.11.

Η δεύτερη διευθέτηση οφείλεται στην ελλειπτική τροχιά της γης, η οποία μεταβάλλει το μήκος μίας ηλιακής μέρας (από το ένα ηλιακό μεσημέρι στο επόμενο ηλιακό μεσημέρι) στη διάρκεια του έτους.



Εικόνα 2.11 Χάρτης ζωνών ώρας

Η διαφοροποίηση μεταξύ μιας ημέρας 24 ωρών και μιας ηλιακής ημέρας (σε λεπτά) περιγράφεται από την παράμετρο E (μία εξίσωση χρόνου (σε ώρες)). Η διαφορά (σε λεπτά) μεταξύ του ηλιακού χρόνου t_s και της τοπικής ώρας t_c δίνεται από τη σχέση:

$$t_s - t_c = \pm 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.11)$$

όπου L_{st} είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού που ορίζει τη ζώνη ώρας της περιοχής (μεσημβρινός αναφοράς) και L_{loc} το γεωγραφικό μήκος της περιοχής. Στην παραπάνω σχέση το πρόσημο + αναφέρεται σε περιοχές δυτικά του μεσημβρινού Greenwich και το πρόσημο - αναφέρεται σε περιοχές ανατολικά του μεσημβρινού Greenwich. Για την περίπτωση θερινής ώρας, η οποία αλλάζει την τελευταία Κυριακή του Μαρτίου και ισχύει έως την τελευταία Κυριακή του Οκτωβρίου, αφαιρούνται 60 λεπτά (1 ώρα) από την τιμή της τοπικής ώρας t_c .^{viii}

2.2 Ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας και βασικοί ορισμοί

Η ποσότητα της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας (H_T , ολική ηλιακή ακτινοβολία) που φτάνει στην επιφάνεια της γης μπορεί να διαιρεθεί σε δύο συνιστώσες: την άμεση (ή απευθείας) ακτινοβολία και τη διάχυτη ακτινοβολία:

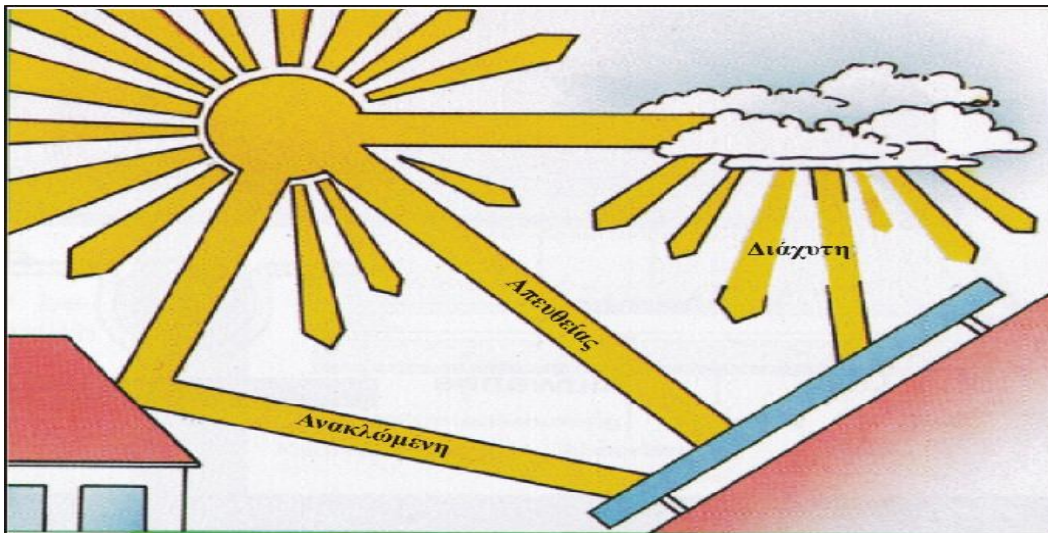
$$H_T = k_T \cdot H_0 \quad (2.12)$$

$$\text{και } H_T = I_b + I_d \quad (2.13)$$

Η άμεση ακτινοβολία (I_b) είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς να υποστεί σκέδαση (αλλαγή κατεύθυνσης) κατά την διαδρομή της στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από την απόσταση Ήλιου-γης, την ηλιακή απόκλιση (δ), το ηλιακό ύψος (α), το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (h), την κλίση της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει (β), καθώς και την απορρόφηση και διάχυση την οποία υφίσταται μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η διάχυτη ακτινοβολία (I_d) είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης με αλλαγμένη διεύθυνση, αφού έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα και ανάκλαση από το έδαφος. Επομένως, η διάχυτη ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης με τυχαίες διευθύνσεις από όλο τον ουράνιο θόλο. Εξαρτάται από το ηλιακό ύψος (α), το υψόμετρο του τόπου (h), τη λευκαύγεια του εδάφους, το πόσο και το είδος των νεφών, το ποσό και το είδος των διαφόρων κέντρων σκεδάσεως που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανέμει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα, τόσο μικρότερο είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Για τον λόγο αυτό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη κατά την θερινή περίοδο σε σχέση με τη χειμερινή. Τέλος, όσο πιο κάθετα προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μια επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της.



Εικόνα 2.12 Ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας

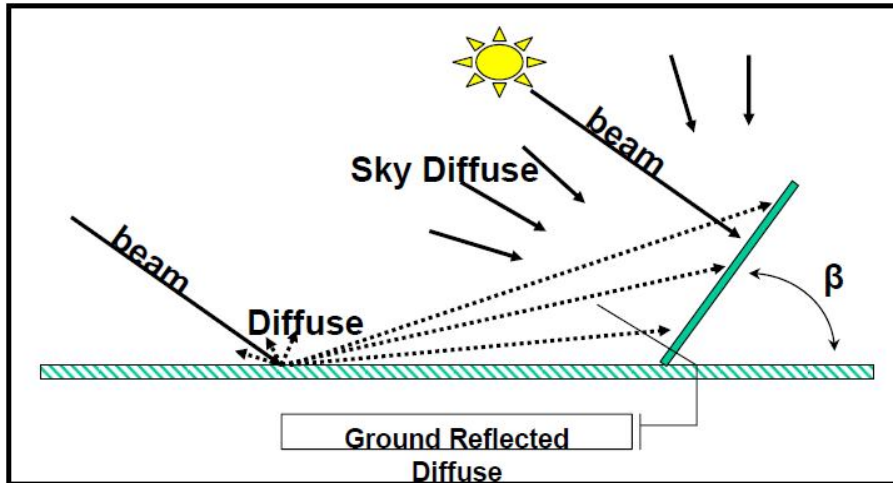
Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας (irradiance, W/m^2) είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια που ακτινοβολείται πέφτει σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας.

Πυκνότητα ενέργειας ακτινοβολίας (irradiance, J/m^2) είναι η προσπίπτουσα σε μία επιφάνεια ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος σε κάποιο χρονικό διάστημα.

Μέσος δείκτης αιθριότητας (K_T) ορίζεται ως ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει σε οριζόντια επιφάνεια στη γη προς την ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα της γης: $K_T = \frac{H_T}{H_0}$ (2.14)

2.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια

Η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές και μελέτες των ηλιακών συστημάτων. Επειδή όμως στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι διαθέσιμη συνήθως η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, θα πρέπει να δοθεί μέθοδος υπολογισμού της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια είναι απαραίτητη η γνώση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο^x.



2.13 Ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια

Η άμεση ακτινοβολία που θα δεχθεί η κεκλιμένη επιφάνεια εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών. Η διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία που δέχεται η κεκλιμένη επιφάνεια δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της κεκλιμένης επιφάνειας και ούτε προέρχονται απ' όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφος της γύρω περιοχής. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία που δέχεται η κεκλιμένη επιφάνεια θα προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που "βλέπει" το επίπεδο. Έπειτα απ' αυτά για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για κάθε μία από τις συνιστώσες και ένας διορθωτικός συντελεστής.

Ο διορθωτικός συντελεστής για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (R_b), είναι ο λόγος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ($I_{b,T}$), προς αυτήν της οριζόντιας επιφάνειας (I_b):

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.15)$$

Ο υπολογισμός της συνιστώσας για την διάχυτη ακτινοβολία βασίζεται στην υπόθεση ότι η διάχυτη είναι ισοτροπική, δηλαδή είναι ομοιόμορφα κατανομημένη απ' τον ουράνιο θόλο. Ο διορθωτικός συντελεστής για την διάχυτη ακτινοβολία (R_d) είναι ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια ($I_{d,T}$) προς αυτήν στο οριζόντιο (I_d). Απ' ολόκληρη την διάχυτη ακτινοβολία που προέρχεται απ' τον ουράνιο θόλο, ένα μόνο ποσοστό δέχεται την κεκλιμένη επιφάνεια. Το ποσοστό αυτό είναι ο λόγος του τμήματος του ουρανού θόλου που "βλέπει" η κεκλιμένη επιφάνεια, προς ολόκληρη την ημισφαιρική επιφάνεια του ουρανού θόλου. Για μια κεκλιμένη επιφάνεια που δεν δέχεται σκίαση, με κλίση β , στην επιφάνεια της γης, ο διορθωτικός αυτός συντελεστής είναι :

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.16)$$

Ο διορθωτικός συντελεστής για την ανακλώμενη ακτινοβολία (R_r), είναι ο λόγος της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια ($I_{r,T}$), προς αυτήν στην οριζόντια (I_r). Η ανακλώμενη όμως στο οριζόντιο επίπεδο είναι το γινόμενο του συντελεστή ανάκλασης ρ του εδάφους της γύρω περιοχής επί την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο I . Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ, αν υποθέσουμε ότι η

ανακλώμενη είναι ιστροπική, τότε για μια κεκλιμένη επιφάνεια με κλίση β , στην επιφάνεια της γης ο διορθωτικός συντελεστής είναι :

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.17)$$

Έπειτα από τα παραπάνω η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια I_T , είναι :

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + I \rho R_r \quad (2.18)$$

Όπου ρ ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν θα ερευνήσουμε αυτό το δείκτη. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι, από εργασία του συναδέλφου Αρκούδη Γεώργιου^{xi}, η μέση τιμή για την Ελλάδα λαμβάνεται $\rho = 0,25$ και ένας πίνακας με ενδεικτικές τιμές ο παρακάτω:

Υλικό επικάλυψης εδάφους	Ανακλαστικότητα (W/m ²)
Κάλυψη χιονιού, φρέσκια	0,75 – 0,95
Κάλυψη χιονιού, παλαιά	0,40 – 0,70
Σωροί ελαφριάς άμμου	0,30 – 0,60
Τσιμεντένιες επιφάνειες	0,20 – 0,40
Χιόνι σκληρυμένο	0,20 – 0,50
Γρασίδι	0,15 – 0,30
Τούβλο, διαφόρων χρωμάτων	0,23 – 0,48
Έδαφος με χρώμα άμμου	0,15 – 0,40
Λιβάδι	0,12 – 0,30
Ξύλα	0,05 – 0,20
Έδαφος με σκουρόχρωμη καλλιέργεια	0,07 – 0,10
Ασφαλτοτάπητας	0,07 – 0,15
Σχιστόλιθος, σκουρόχρωμος άργιλος	>0,07
Μπλε πέτρα (ψαμμίτης)	0,18
Ξηρό γρασίδι	0,32
Φλοιοί	0,23 – 0,48
Πράσινοι αγροί	0,03 – 0,15
Πράσινα φύλλα	0,25 – 0,32
Επιφάνειες νερού, θάλασσα	0,03 – 0,10

Πίνακας 2.1 Συντελεστής ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορα είδη επιφάνειας

2.2.2 Συσκευές μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας

Η επιστημονική κοινότητα έχει στη διάθεσή της μια μεγάλη ποικιλία οργάνων από τα πλέον απλά θερμικά πυρανόμετρα μέχρι τα πλέον σύγχρονα και πολύπλοκα φασματοφωτόμετρα. Τα πιο συνηθισμένα είναι τα εξής:

- (α) πυρανόμετρο (β) φωτοδίοδος
- (γ) φασματοραδιόμετρο (δ) πυροηλεκτρικός κρύσταλλος

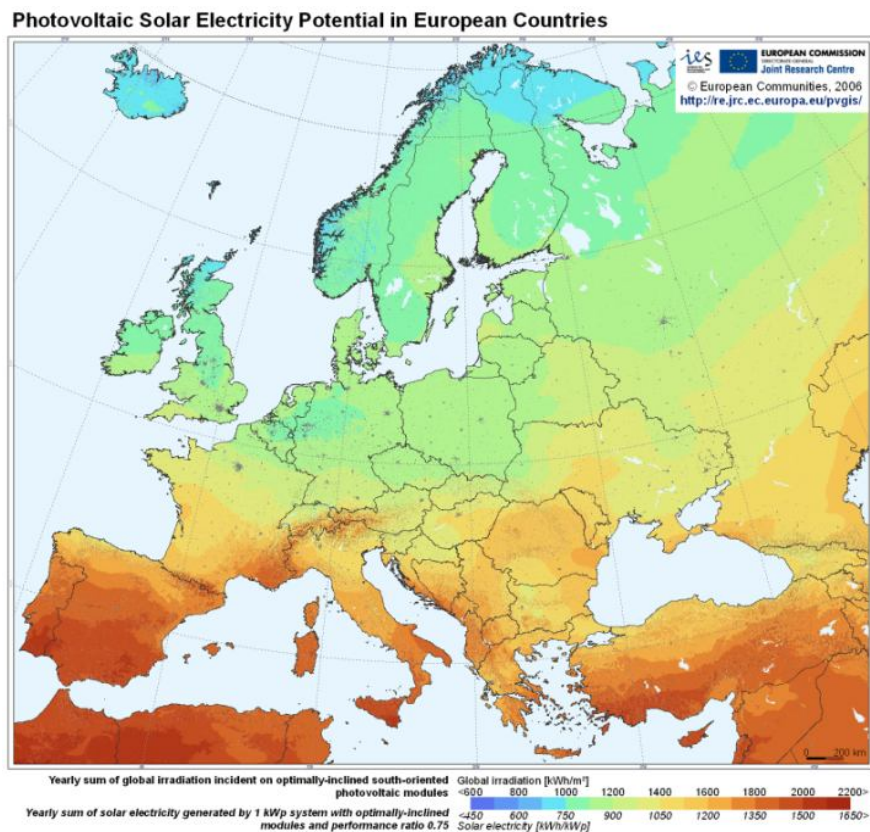


Εικόνα 2.14 πυρανόμετρο για μέτρηση ολικής ηλιακής ακτινοβολίας

2.3 Ηλιακό Δυναμικό

Ηλιακό δυναμικό ορίζουμε ως το ετήσιο άθροισμα της ακτινοβολίας που λαμβάνει μια επιφάνεια τοποθετημένη στη βέλτιστη γωνία.

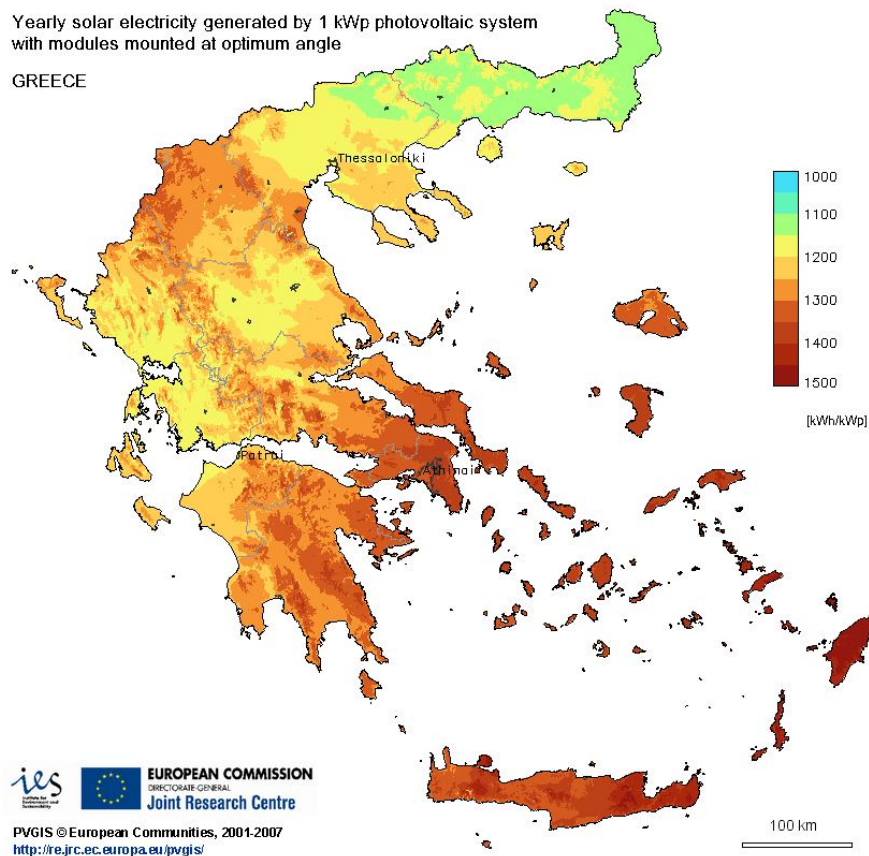
Στην Ελλάδα η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.) καταγράφει εδώ και πολλά χρόνια τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα, αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις την ολική ηλιακή ακτινοβολία (σε kWh/m²) για διάφορες περιοχές της χώρας (εικόνα 2.16).



Εικόνα 2.15 Ηλιακό δυναμικό – Ευρώπης

Η Ελλάδα λόγω της ευνοϊκής γεωγραφικής της θέσης, παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου $1.400 \div 1.800 \text{ kWh/m}^2$ ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής.

Η Ελλάδα παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό. Η ακτινοβολία παρουσιάζει την μέγιστη ένταση της κατά την διάρκεια του μεσημεριού(μέγιστο ηλιακό ύψος), τόσο κατά την θερινή όσο και κατά την χειμερινή περίοδο. Η ηλιακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη κατά την θερινή περίοδο, λόγω της θέσης του Ήλιου αλλά και λόγω της αύξησης της ηλιοφάνειας(μείωση νεφώσεων).



Εικόνα 2.16 Ηλιακό δυναμικό – Ελλάδα

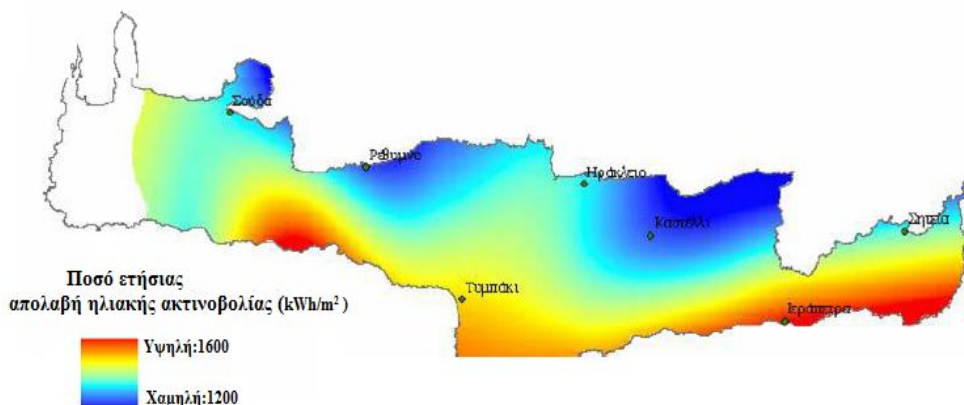
Στον παρακάτω πίνακα 2.2 δίνονται οι μέσες τιμές μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για 47 περιοχές της Ελλάδας.

Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m².mo)].

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αγχιάλος	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Αλιάρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1
Άραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6
Άργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Αργοστόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1
Ζάκυνθος	64,2	77,6	110,1	158,8	190,8	200,1	218,5	203,8	154,0	104,3	65,4	52,8
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0
Κόνιτσα	53,0	65,0	112,0	138,0	190,0	200,0	216,0	194,0	141,0	99,0	63,0	50,0
Κόρινθος (Βέλο)	65,4	82,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2
Κύθηρα	68,0	81,0	127,0	161,0	210,0	220,0	223,0	204,0	160,0	117,0	78,0	60,0
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8
Λήμνος	51,1	69,6	112,3	154,3	199,5	215,3	220,9	198,5	150,8	104,6	61,3	46,0
Μεθώνη	62,0	78,0	125,0	155,0	207,0	215,0	220,0	199,0	157,0	116,0	77,0	57,0
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0
Νάξος	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6
Πάρος	60,0	80,0	125,0	168,0	211,0	220,0	223,0	202,0	160,0	117,0	75,0	58,0
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7
Σητεία	66,5	83,0	128,4	165,2	207,4	223,2	227,1	207,5	163,7	119,3	80,4	61,9
Σκύρος	51,2	69,1	109,9	153,3	197,2	214,2	219,7	198,8	151,7	102,5	62,9	47,7
Σούδα	65,0	81,7	130,7	166,5	208,5	221,9	228,5	209,3	163,6	116,3	76,8	60,3
Σύρος	58,0	80,0	121,0	172,0	212,0	219,0	225,0	204,0	160,0	199,0	74,0	57,0
Τανάγρα	59,1	74,2	112,7	151,9	194,0	215,4	222,0	201,3	153,1	104,5	64,7	51,2
Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1
Τυμπάκιο	73,4	90,5	137,5	169,0	207,8	222,9	228,7	209,8	166,3	127,2	85,9	67,7
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0
Χρυσούπολη	57,5	78,0	111,3	137,6	189,9	204,0	208,8	187,6	141,8	97,7	62,1	43,3

Πίνακας 2.2 Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m²) xii

Το ηλιακό δυναμικό της Κρήτης παρουσιάζεται εξαιρετικά πλούσιο, λόγω της δεδομένης γεωγραφικής θέσης του νησιού. Στην παρακάτω Εικόνα φαίνεται μια σχηματική άποψη της Κρήτης με τις περιοχές που συγκεντρώνονται περισσότερο το μεγαλύτερο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας (σε kWh/m²)



Εικόνα 2.17 ηλιακό δυναμικό – Κρήτης xii

Στον παρακάτω πίνακα 2.3 δίνονται οι μέσες τιμές μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για 7 πόλεις της Κρήτης.^{xii}

Μήνες	(kWh/m ²)						
	Πόλεις Κρήτης						
	Σούδα	Χανιά	Ρέθυμνο	Ηράκλειο	Σητεία	Τυμπάκι	Ιεράπετρα
Ιανουάριος	65,0	62,0	62,0	65,6	66,5	73,4	73,0
Φεβρουάριος	81,7	80,0	81,0	81,6	83,0	90,5	89,0
Μάρτιος	130,7	124,0	119,0	125,0	128,0	137,5	137,0
Απρίλιος	166,5	167,0	164,0	166,5	165,2	169,0	174,0
Μάιος	208,5	212,0	211,0	207,3	207,4	207,8	210,0
Ιούνιος	221,9	220,0	218,0	222,4	223,2	222,9	220,0
Ιούλιος	228,5	225,0	223,0	227,1	227,1	228,7	224,0
Αύγουστος	209,3	205,0	204,0	207,0	207,5	209,8	205,0
Σεπτέμβριος	163,6	161,0	160,0	163,0	163,7	166,3	165,0
Οκτώβριος	116,3	111,0	106,0	117,3	119,3	127,2	125,0
Νοέμβριος	76,8	78,0	81,0	78,6	80,4	85,9	89,0
Δεκέμβριος	60,3	59,0	58,0	61,2	61,9	67,7	69,0
Μ.Ο.	144,1	142,0	140,5	143,5	144,4	148,9	148,3

Πίνακας 2.3 Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο

2.4 Τεχνολογίες Αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας

2.4.1 Ενεργητικά και Παθητικά ηλιακά Συστήματα

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα.

• *Παθητικά Ηλιακά Συστήματα:* Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι δομικά στοιχεία του κτιρίου, που αξιοποιώντας τους νόμους μεταφοράς θερμότητας, συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν σε μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο. Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ειδικότερα στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού και τον εγκλωβισμό της θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα συνδυάζονται και με τεχνικές φυσικού φωτισμού καθώς και παθητικά συστήματα και τεχνικές για το φυσικό δροσισμό των κτιρίων το καλοκαίρι. Μπορούν δε να εφαρμοστούν τόσο σε καινούργια, όσο και σε ήδη υπάρχοντα κτίρια.

• *Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα:* Τα ενεργητικά ή θερμικά ηλιακά συστήματα αποτελούν μηχανολογικά συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, τη μετατρέπουν σε θερμότητα, την αποθηκεύουν και τη διανέμουν, χρησιμοποιώντας είτε κάποιο υγρό είτε αέρα ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Χρησιμοποιούνται για θέρμανση νερού οικιακής χρήσης, για τη θέρμανση και ψύξη χώρων, για βιομηχανικές διεργασίες, για αφαλάτωση, για διάφορες αγροτικές εφαρμογές, για θέρμανση του νερού σε πισίνες, κλπ. Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες.

2.4.2 Ήλιο-θερμικά Συστήματα

Επίσης, μέσω της κατάλληλης εφαρμογής συστημάτων μπορεί να γίνει δυνατή η αξιοποίηση της θερμότητας που αναπτύσσεται μέσω των ηλιακών ακτινών προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα συστήματα, αναφέρονται και ως Ήλιο-θερμικά Συστήματα (solar thermal systems).^{xiii}

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιοθερμική απαραίτητο είναι να υπάρχει ένα Εργοστάσιο Συγκεντρωτικής Ηλιακής Ενέργειας (Concentrating Solar Power /CSP). Το Εργοστάσιο Συγκεντρωτικής Ηλιακής Ενέργειας αποτελείται από (α) ένα συλλέκτη ηλιακής ενέργειας που την μετατρέπει σε θερμότητα και (β) από ένα μετατροπέα θερμικής σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι μέθοδοι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας ως θερμικής για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι:

1. Παραβολικά κάτοπτρα και συγκέντρωση της θερμικής ενέργειας σε σωλήνα με θερμοαπορροφητικό υλικό ώστε να παράγεται ατμός για να κινήσει ατμοστρόβιλο.
2. Παρόμοια με την μέθοδο 1 με τη βοήθεια ανεμογεννήτριας με τη διαφορά ότι όλοι τα εγκατεστημένα κάτοπτρα συγκεντρώνουν τις ακτίνες σε έναν κεντρικό δέκτη από τον οποία παράγεται ο ατμός, παράδειγμα το εργοστάσιο συνδυασμένου κύκλου εγκατεστημένης ισχύος των 140 MW στην Αίγυπτο στο Kurayamat(80 MW αεριοστρόβιλοι και 60 MW ατμοκινητήρας του CSP).^{xiv}

3. Η χρήση ηλιακών δίσκων και η παραγωγή ενέργειας με τη βοήθεια μηχανής τύπου Stirling. Τέτοιου είδους εφαρμογή έχει γίνει από το εργαστήριο CESI στο Μιλάνο^{xv}. Οι μηχανές αυτού του τύπου παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμού απόδοσης χωρίς διακοπή της λειτουργίας ή μετατροπή των ρυθμίσεων του κινητήρα, μεγαλύτερη ευελιξία καυσίμου καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λίγες ώρες φυσικό αέριο, καλή συμπεριφορά σε μερικό φορτίο, χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών. Οι δύο πρώτες εφαρμογές χρησιμοποιούν σύγχρονη γεννήτρια ενώ η τρίτη χρησιμοποιεί ασύγχρονη γεννήτρια. Περισσότερες λεπτομέρειες για την τεχνολογία αυτή μπορούν να αναζητηθούν στην σχετική μελέτη.



Εικόνα 2.18 Παραδείγματα τεχνολογιών CSPs α) Κεντρικός Πύργος β) Θερμική μηχανή γ) παραβολικά κάτοπτρα χιν

2.4.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (ή Φ/Β) μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, λύνοντας έτσι το πρόβλημα της ηλεκτροδότησης περιοχών που είναι δύσκολο να απορροφήσουν ηλεκτρική ισχύς από το ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο (απομονωμένα σπίτια, φάρoi, κ.α.). Επίσης αναφέρεται ότι σε πολλές καθημερινές εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ηλεκτρική ισχύς, συναντάται η χρήση της Φ/Β τεχνολογίας όπως για παράδειγμα μικροί υπολογιστές, ρολόγια, φανάρια οδικών σημάτων, κ.α..

Η μέθοδος αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας με Φ/Β, αποτελεί την κύρια τεχνολογία ανάπτυξης των Α.Π.Ε. και μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στο τομέα της διανεμημένης παραγωγής. Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη παραγωγής των Φ/Β μονάδων και γι' αυτό το λόγο η πιο λεπτομερή αναφορά τους γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο. ix

3. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι αρκετά διαδεδομένη κυρίως με εφαρμογές φωτοβολταϊκών(Φ/Β) συστημάτων. Τα Φ/Β συστήματα βασίζονται στην άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό, με τη χρήση τεχνολογίας ημιαγωγικών υλικών τα οποία ενεργοποιούνται στο φάσμα του ηλιακού φωτός. Τέτοια συστήματα χαρακτηρίζονται ως ηλιακοί συσσωρευτές και η λειτουργία τους είναι φιλική προς το περιβάλλον, ενώ η διάρκεια ζωής τους φθάνει τα 25 χρόνια.

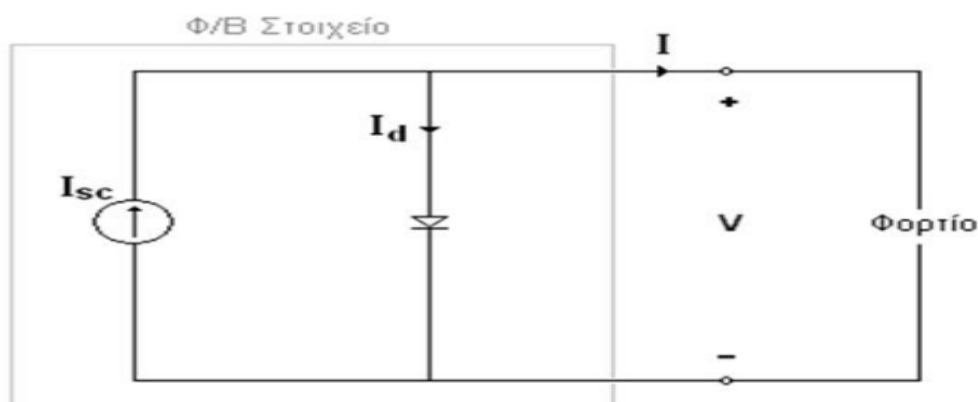
3.1 Δομή και λειτουργία Φ/Β στοιχείων

Η δομή και η λειτουργία των Φ/Β στοιχείων ή ηλιακών κυψελών βασίζεται στους ημιαγωγούς, οι οποίοι συνδέονται σε ζεύγη αρνητικής και θετικής φόρτισης (p-n), ώστε να διαμορφώσουν μεγάλης επιφάνειας ηλεκτροδιόδους. Η ορθή κατασκευή της ηλεκτροδιόδου αποτελεί βασική προϋπόθεση της επιτυχούς λειτουργίας της Φ/Β κυψέλης ως ημιαγωγού.

Με την πρόσπτωση του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια του ημιαγωγού τύπου n απελευθερώνονται ηλεκτρόνια, τα οποία συλλέγονται με τη βοήθεια ηλεκτροδίου εφαρμοσμένου στην άνω επιφάνειά του. Στην κάτω επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης είναι προσαρμοσμένος ένας ημιαγωγός τύπου p, στον οποίο οδηγούνται τα ηλεκτρόνια μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος. Η οπίσθια επιφάνεια της κυψέλης αποτελεί ένα ενιαίο ηλεκτρόδιο, όπως και η εμπρόσθια, η οποία όμως επιπρόσθετα καλύπτεται από στρώση διαφανούς απορροφητικού υλικού για τον περιορισμό της ανακλαστικότητας, καθώς και από διαφανές προστατευτικό υλικό, συνήθως τζάμι ή συνθετικό.

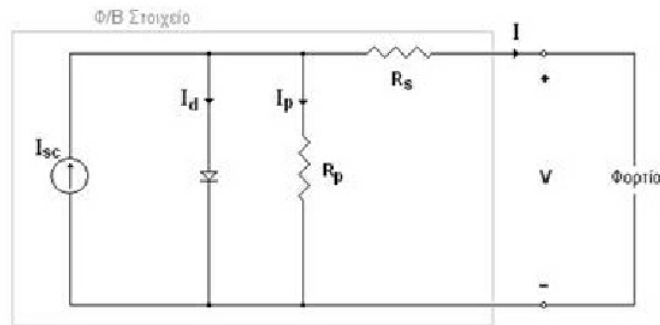
Το ηλεκτρόδιο της εμπρόσθιας επιφάνειας έχει οπωσδήποτε μορφή πλέγματος ή σχάρας, ώστε να μην περιορίζεται η πρόσπτωση του φωτός στην επιφάνεια του ημιαγωγού, ενώ το ηλεκτρόδιο της οπίσθιας επιφάνειας μπορεί να είναι παρόμοιο, αν είναι επιθυμητή η διέλευση φωτός διαμέσου της κυψέλης ή να έχει μορφή συνεχούς λεπτού μεταλλικού φύλλου. Τα ηλεκτρόδια καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια του ημιαγωγού.

Το κυκλωματικό ισοδύναμο ενός Φ/Β στοιχείου αποτελείται από μία δίοδο συνδεδεμένη παράλληλα με μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, η ένταση της οποίας είναι ανάλογη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



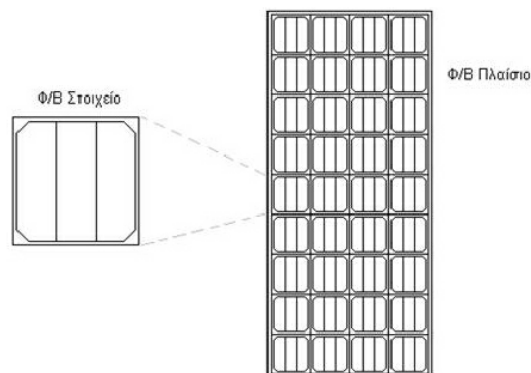
Εικόνα 3.1 Απλό ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου

Γενικά, τα Φ/Β στοιχεία περιγράφονται από δύο χαρακτηριστικά ηλεκτρικά μεγέθη, όπως η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο αναλυτικό κυκλωματικό ισοδύναμο υπάρχει μία παράλληλη αντίσταση, η οποία ονομάζεται αντίσταση διαρροής R_p και μία αντίσταση εν σειρά R_s .



Εικόνα 3.2 Αναλυτικό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Οι μικρές τιμές τάσεων και ρευμάτων των Φ/Β στοιχείων δημιουργούν την ανάγκη σύνθεσης τους σε μεγαλύτερα συμπλέγματα, τα οποία ονομάζονται Φ/Β πλαίσια, προκειμένου να αποδίδουν εκμεταλλεύσιμα ηλεκτρικά μεγέθη.



Εικόνα 3.3 Φ/β πλαίσιο

Τα Φ/Β στοιχεία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο σκοπό, κατά τρόπο ανάλογο της σύνδεσης των ηλεκτρικών πηγών. Η σύνδεση σε σειρά N , καθ' όλα όμοιων Φ/Β στοιχείων (σύνδεση του θετικού ηλεκτροδίου του ενός Φ/Β στοιχείου με το αρνητικό του επόμενου), οδηγεί σε σύστημα με ανάλογα πολλαπλάσια τάση ανοικτού κυκλώματος ($V_{toc} = N * V_{oc}$). Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ισούται με το αντίστοιχο του ενός ($I_{tsc} = I_{sc}$).

Η παράλληλη σύνδεση N όμοιων Φ/Β στοιχείων (σύνδεση των θετικών ηλεκτροδίων των Φ/Β στοιχείων όλων μαζί και ομοίως για τα αρνητικά ηλεκτροδία) δίδει ένα σύνολο με την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος ($V_{toc} = V_{oc}$), ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσής του ισούται με N φορές το ρεύμα βραχυκύκλωσης εκάστου ($I_{tsc} = N * I_{sc}$). Αν τα συνδεόμενα Φ/Β στοιχεία έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (I_{sc} και V_{oc}), τότε η συνολική διάταξη των N στοιχείων παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από τις προηγούμενες τιμές.^{xvi}

3.2 Τεχνολογίες Φ/Β

3.2.1 Με βάση το πυρίτιο

Το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β. Η κυριαρχία αυτή οφείλεται στην αφθονία του στη γη και τα χημικά του χαρακτηριστικά. Λόγω του ότι είναι εύθραυστο, το πυρίτιο απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων σχετικά μεγάλου πάχους. Αυτό σημαίνει ότι μερικά από τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται μετά την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας πρέπει να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις για να ενταχθούν στην ροή του ρεύματος και να συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Συνεπώς, το υλικό θα πρέπει να έχει υψηλή καθαρότητα και δομική τελειότητα, ώστε να αποτρέψει την επιστροφή των ηλεκτρονίων στις φυσικές τους θέσεις. Οι ατέλειες πρέπει να αποφευχθούν ώστε η ενέργεια του ηλεκτρονίου να μην μετατραπεί σε θερμότητα. Η παραγωγή θερμότητας, η οποία είναι επιθυμητή στα ηλιακά θερμικά πλαίσια, είναι ανεπιθύμητη στα Φ/Β πλαίσια, όπου η ηλιακή ενέργεια θα πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρική.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα λεπτά υλικά είναι ένας τρόπος να μειωθεί το κόστος των Φ/Β πλαισίων και να αυξηθεί η απόδοσή τους. Εκτός από τη χρήση μικρότερης ποσότητας υλικού, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι ολόκληρα πλαίσια μπορούν να κατασκευαστούν παράλληλα με τη διαδικασία απόθεσης. Αυτό είναι συμφέρον οικονομικά, αλλά επίσης πολύ απαιτητικό τεχνικά, επειδή η επεξεργασία χωρίς ατέλειες αφορά μεγαλύτερη επιφάνεια. Το πυρίτιο, ανάλογα με την επεξεργασία του, δίνει μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά, από τα οποία παράγονται τα Φ/Β στοιχεία. xvi

3.2.1.1 Μονοκρυσταλλικά

Τα Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Single Crystalline Silicon, sc-Si) έχουν πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15-18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Τα μονοκρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας".

Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών Φ/Β είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό Φ/Β με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα είναι της SunPower με απόδοση πλαισίου 18,5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.

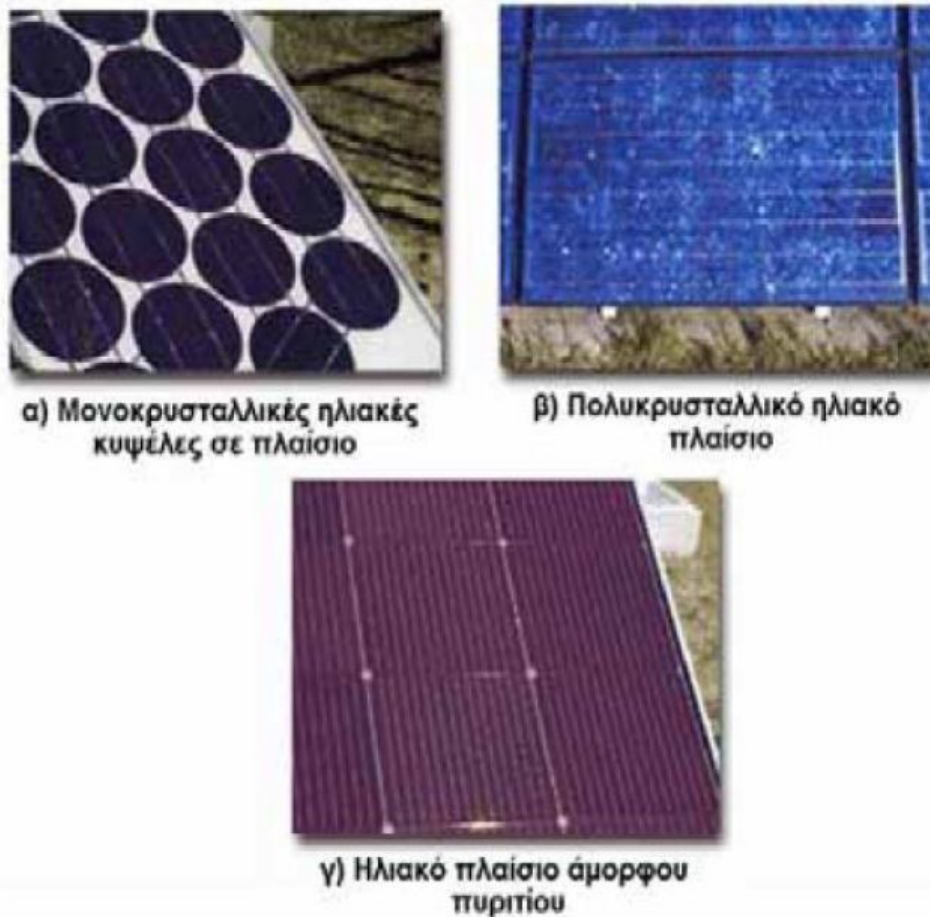
3.2.1.2 Πολυκρυσταλλικά

Τα Φ/Β κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multi Crystalline Silicon, mc-Si) έχουν πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά Φ/Β κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με

αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα Φ/Β πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση") και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

3.2.1.3 Άμορφα

Τα Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si) έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους, όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι, λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός άμορφο Φ/Β προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το Φ/Β στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά Φ/Β, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά. Στα πλεονεκτήματα των λεπτών πλαισίων τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να αντιπαρατεθεί η χαμηλότερη ως τώρα απόδοσή τους (οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας Φ/Β thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8%, ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%). Πάντως η τεχνολογία λεπτού στρώματος (thin film) είναι σε φάση ανάπτυξης, αφού με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας και χρήση διαφορετικών υλικών αναμένεται αύξηση της απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα πάντως αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή Φ/Β πλαισίων. Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe_2 ή CIS με προσθήκη γάλλιου CIGS) έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11%. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των Φ/Β τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.



Εικόνα 3.4 Τεχνολογίες Φ/Β με βάση το πυρίτιο

3.2.2 Λοιπές τεχνολογίες

3.2.2.1 Υπάρχουσες

Φ/Β με βάση το τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe) το οποίο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα Φ/Β στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Τροχοπέδη για την χρήση είναι το υψηλό κόστος κατασκευής, αν και μελλοντικά αναμένετε να πέσει αρκετά, το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο(ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του) και η έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι η ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic). Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκά στοιχεία CdTe είναι η First Solar.

Φ/Β με βάση το αρσενικούχο γάλιο (GaAs)(ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων) το οποίο έχει ενεργειακό διάκενο $1,43\text{eV}$ που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Τα Φ/Β στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα Φ/Β στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ

υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Γι' αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης τους ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Μειονέκτημα είναι ότι το GaAs είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό, ενώ το Αρσενικό δεν είναι σπάνιο άλλα είναι δηλητηριώδες. Το μεγαλύτερο όμως μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

Φ/Β υβριδικά στοιχεία τα οποία αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά Φ/Β στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Κατασκευάζεται από την Sanyo Solar. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα Φ/Β στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Αλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά Φ/Β στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικό Φ/Β είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά Φ/Β πλαίσια.

Φ/Β στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbons Silicon). Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία Φ/Β στοιχείων. Αναπτύσσεται από την Evergreen Solar. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις “παραδοσιακές τεχνικές” κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών Φ/Β κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα Φ/Β στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

3.2.2.2 Εν εξελίξει

Η τεχνολογία των Φ/Β εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα Φ/Β στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

- Νανοκρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία πυριτίου (nc-Si)^{xvii}
- Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

3.3 Στήριξη Φ/Β

Οι τρόποι διάκρισης της στήριξης των συλλεκτών είναι οι ακόλουθοι ^{xviii}:

1. Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης.
2. Στήριξη με δυνατότητα συνεχής παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου (ηλιοτρόπια ή trackers).
 - Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από ένα άξονα (ή μονοαξονικά συστήματα).
 - Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από δύο άξονες (η διαξονικά συστήματα).

3.3.1 Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης.

Οι σταθερές βάσεις στήριξης των συλλεκτών αποτελούν τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο έδρασης της συστοιχίας. Η αρχή σχεδιασμού τους, βασίζεται στο ότι, η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, θα πρέπει να είναι κάθετα στην επιφάνεια

της συλλεκτικής επιφάνειας, κατά τις μεσημβρινές ώρες. Έτσι οι βάσεις αυτές κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπουν την τοποθέτηση των συστοιχιών σε σταθερή γωνία κλίσης.

Η απουσία κινητών μερών κατά τη στήριξη της Φ/Β συστοιχίας, προσδίδει στη διάταξη επαρκή μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα μάλιστα αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι. Στατικές συλλεκτικές επιφάνειες χρησιμοποιούνται επίσης ενσωματωμένες σε κτίρια.



Εικόνα 3.5 Εγκατεστημένες Φ/Β συστοιχίες με σταθερή γωνία κλίσης

Για τη συλλογή της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας σε περιοχές του Βόρειου ημισφαιρίου (όπως η Ελλάδα) σε σταθερές συλλεκτικές επιφάνειες, πρέπει να ισχύει, ότι:

- ✓ Η βέλτιστη γωνία κλίσης σε όλη τη διάρκεια του έτους θα πρέπει, σύμφωνα με τη θεωρία, να είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.
- ✓ Επειδή όμως η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην Ελλάδα το καλοκαίρι είναι μεγαλύτερη από αυτή του χειμώνα, με συνέπεια η βέλτιστη γωνία κλίσης να είναι περίπου $7^{\circ} \div 10^{\circ}$ μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.
- ✓ Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η βέλτιστη γωνία κλίσης πρέπει να είναι περίπου $10^{\circ} \div 15^{\circ}$ μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.
- ✓ Κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η βέλτιστη γωνία κλίσης πρέπει να είναι περίπου $10^{\circ} \div 15^{\circ}$ μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση.
- ✓ Ο βέλτιστος προσανατολισμός (αζιμουθιο) είναι νότιος, ενώ απόκλιση κατά $20^{\circ} \div 30^{\circ}$ από Νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.
- ✓ Βάρος Φ/Β συστοιχιών με βάση στήριξης: $20\text{-}25 \text{ kg/m}^2$ (για έλεγχο της στατικότητας).

3.3.2 Στήριξη του συλλέκτη με δυνατότητα συνεχής παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου (ηλιοτρόπια)

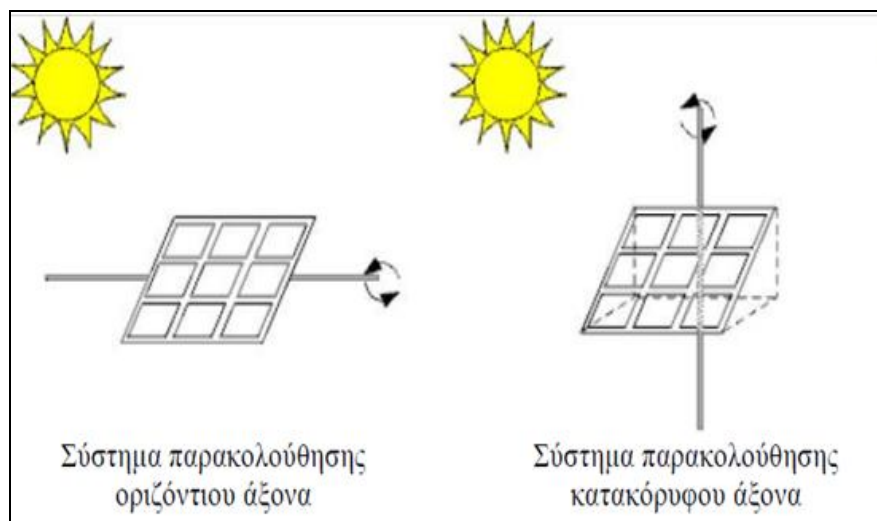
Η συνεχή παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου αποτελεί μία τεχνική η οποία στοχεύει στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της προσπάθειας κίνησης της συστοιχίας, κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε, να επιτυγχάνεται συνεχώς, η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τέτοιου είδους κατασκευές, χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με τις στατικές, παρέχοντας ωστόσο αυξημένη απόδοση που μπορεί να αυξηθεί κατά 25% έως και 50% τον χρόνο όπως εκτιμάται για την Ελλάδα σε σχέση με το σύστημα σταθερής κλίσης.

3.3.2.1 Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από ένα άξονα.

Τα συστήματα μονού άξονα δίνουν τη δυνατότητα στη συστοιχία συνήθως να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου από την Ανατολή στη Δύση (υπάρχουν και συστήματα εποχιακής μεταβολής κλίσης). Η κίνηση αυτή επιτυγχάνεται με κατάλληλο μηχανισμό, γύρω από ένα άξονα. Όταν το ηλιοτρόπιο ολοκληρώσει την κίνηση του στο τέλος της ημέρας, ο συλλέκτης επιστρέφει σε θέση αναμονής.

Τα συστήματα αυτά, διακρίνονται δύο περιπτώσεις περιστροφής του συλλέκτη: συστήματα παρακολούθησης ή ηλιοτρόπιο οριζόντιου άξονα και συστήματα παρακολούθησης ή ηλιοτρόπιο κατακόρυφου άξονα.

Τυπικά, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν αύξηση της παραγωγής κατά 20-25% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων. Γενικά το ενεργειακό κέρδος των ηλιοτροπικών συστημάτων είναι σημαντικό κατά τις αίθριες ημέρες, ενώ κατά τις συννεφιασμένες, το ενεργειακό πλεονέκτημα τους περιορίζεται.



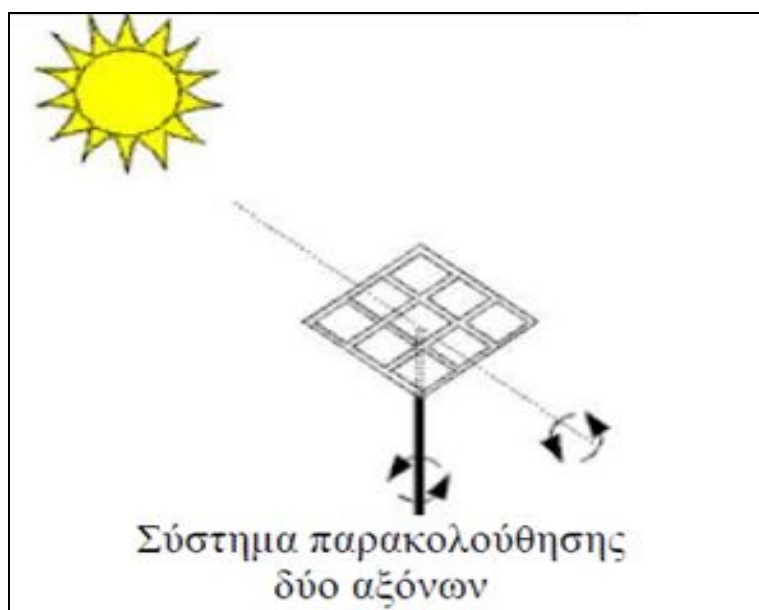
Εικόνα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου με ένα άξονα



Εικόνα 3.7 Μονοαξονικά σύστημα παρακολούθησης (Α) οριζόντιου άξονα, (Β) κάθετου άξονα

3.3.2.1 Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από δύο άξονες.

Στα συστήματα διπλού άξονα, ο συλλέκτης προσανατολίζεται συνεχώς προς τον ήλιο, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα (ή σχεδόν κάθετα) στην επιφάνεια του. Έτσι λοιπόν, οι διατάξεις αυτές, κινούνται στον άξονα Νότιο – Βορρά αναλόγως την εποχή. Η διάταξη με τη δύση του ήλιου, επιστρέφει σε θέση αναφοράς, που χαρακτηρίζεται από Νότιο προσανατολισμό και μικρή γωνία κλίσης, προκειμένου να προφυλαχθεί από πιθανό ισχυρό άνεμο, μέχρι την ανατολή του ηλίου.



Εικόνα 3.8 Σχηματική αναπαράσταση συστήματος παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου με δύο άξονες

Η κίνηση των ηλιοτροπικών συστημάτων με δύο άξονες, επιτυγχάνεται συνήθως με ήλεκτρο-μηχανικά ή ήλεκτρο-υδραυλικά μέσα. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια κίνησης της διάταξης προέρχεται από την παραγόμενη από τη συστοιχία, Φ/Β ηλεκτρική ενέργεια. Μια τέτοια διάταξη παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο βαθμό εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας παρέχοντας αυξημένη απόδοση μέχρι και της τάξεως του 25÷50%. Ωστόσο, μειονέκτημα μιας τέτοιας διάταξης, είναι η οικονομική

επιβάρυνση για τη κατασκευή των μηχανολογικών και ηλεκτρονικών τμημάτων της καθώς και η έκθεση της συστοιχίας στο κίνδυνο καταστροφής, εξαιτίας ισχυρού ανέμου.

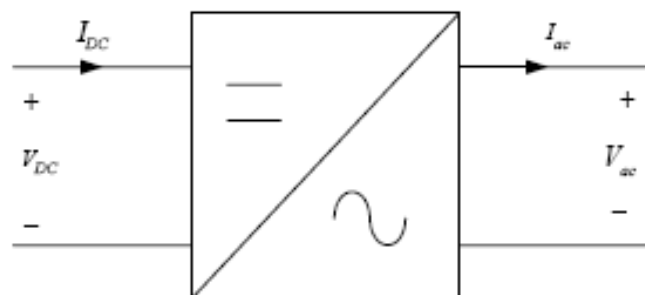


Εικόνα 3.9 Οπίσθια όψη διαζονικού συστήματος tracker (της εταιρίας *MechatronABEE*)

3.4 Αντιστροφείς Φ/Β συστημάτων

Οι αντιστροφείς (inverters) μετατρέπουν την συνεχή τάση (dc) που παράγεται από τη Φ/Β γεννήτρια σε εναλλασσόμενη (ac). Επίσης παίζουν το ρολό και του μετασχηματιστή, ο οποίος στόχο έχει την προσαρμογή της τάσης στα επίπεδα του Εναλλασσομένου Ρεύματος που επιθυμούμε π.χ. 400V. Ακόμα είναι δυνατόν να περιλαμβάνεται διάταξη ανίχνευσης της μέγιστης παραγωγής από την πηγή (Maximum Power Point Tracker (MPPT)).

Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή τους απόδοση (ακόμα και σε χαμηλή ισχύ εισόδου), το μεγάλο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας (-25°C έως $+60^{\circ}\text{C}$), και ο υψηλός βαθμός προστασίας τους από σκόνη και υγρασία (τυπική τιμή: IP65).^{xix}

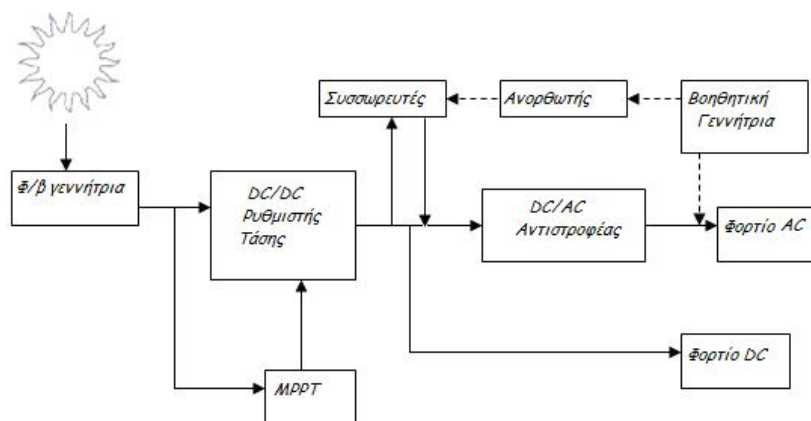


3.10 Το σύμβολο του αντιστροφέα

3.5 Αυτόνομα και διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα

Μια διαφορετική προσέγγιση της Φ/Β τεχνολογίας είναι η εφαρμογή των διασυνδεδεμένων Φ/Β συστημάτων, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο. Υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις, ανάλογα με το αν τροφοδοτείται κάποιο φορτίο απευθείας από το σύστημα ή όχι. Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα το δίκτυο ενεργεί όπως μια μπαταρία με απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης. Επομένως, η συνολική αποδοτικότητα ενός διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος, θα είναι καλύτερη από την αποδοτικότητα ενός αυτόνομου συστήματος, αφού το δίκτυο έχει πρακτικά απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης και επομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί πάντοτε να αποθηκεύεται. Αντιθέτως, στις αυτόνομες εφαρμογές, οι συσσωρευτές θα είναι ενίοτε πλήρως φορτισμένοι, όποτε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αποβάλλεται.

3.5.1 Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Stand Alone)



Σχήμα 3.11 Απλοποιημένο διάγραμμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Οι αυτόνομες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αποτελούν τις συνηθέστερες εφαρμογές της Φ/Β τεχνολογίας. Είναι εγκαταστάσεις που λειτουργούν αυτοδύναμα για την τροφοδότηση καθορισμένων καταναλώσεων, χωρίς να συνδέονται με μεγάλα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, από τα οποία θα μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια ή να στέλνουν την περίσσεια της παραγόμενης Φ/Β ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούν την ιδανικότερη λύση για περιοχές που βρίσκονται μακριά από το κεντρικό δίκτυο και στις οποίες η διασύνδεσή τους με αυτό θα απαιτούσε τεράστια οικονομικά κεφάλαια. Ειδικότερα για τον ελλαδικό χώρο, ο οποίος έχει πολυάριθμα μικρά νησιά και μικρούς οικισμούς, τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα έχουν βρει πολλές εφαρμογές, ενώ υπάρχουν ακόμα πολλές δυνατότητες ανάπτυξης.

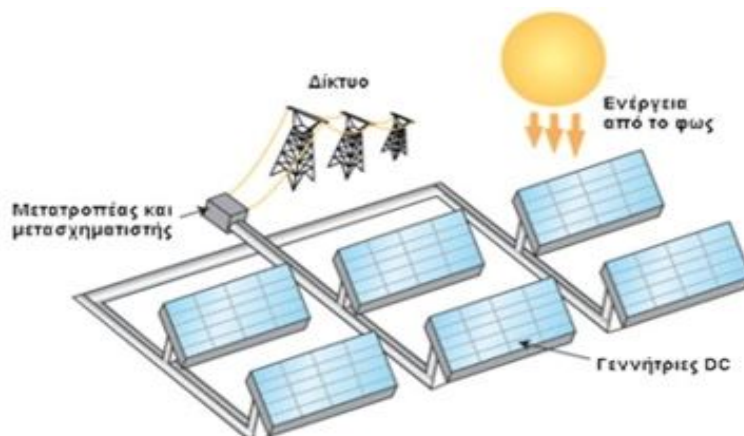
Το βασικότερο συστατικό του αυτόνομου Φ/Β συστήματος είναι η Φ/Β γεννήτρια, στους ηλιακούς συλλέκτες της οποίας γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Έπειτα το αυτόνομο σύστημα περιλαμβάνει, ανάλογα με το είδος της κατανάλωσης και τον βαθμό της απαιτούμενης αξιοπιστίας, συσσωρευτές για την αποθήκευση της περίσσειας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανεπαρκής ή μηδενική, διατάξεις για την

ρύθμιση και την μετατροπή της τάσης και τη ρύθμιση της ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος, άλλες διατάξεις προστασίας και ελέγχου και συχνά μία βοηθητική γεννήτρια, συνήθως ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος που να λειτουργεί με καύση βενζίνης ή πετρελαίου diesel για την αντιμετώπιση έκτακτων περιστάσεων (συντήρηση ή βλάβη του συστήματος, τροφοδότηση πρόσθετων φορτίων, επικουρική λειτουργία σε απρόβλεπτα μεγάλες περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας).

Εκτός από τα πολυάριθμα μικρά νησιά και μικρούς οικισμούς, τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα έχουν βρει πολλές εφαρμογές και σε πολλές περιοχές, οι οποίες είτε λόγω δυσμενών κλιματικών συνθηκών είτε απομονωμένης γεωγραφικής θέσης και πολύ χαμηλού βιοτικού επιπέδου, απέκτησαν πρόσβαση στον ηλεκτρισμό με εκμετάλλευση των ΑΠΕ και χρήση αυτόνομων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Τέτοιες χώρες βρίσκονται στη Μέση Ανατολή και Μεσογείο, με το πιο τρανό παράδειγμα, το Μαρόκο, με την εφαρμογή ενός πολύ σημαντικού προγράμματος αποκεντρωμένης ηλεκτροδότησης με την ονομασία PERG, το οποίο είχε σαν αποτέλεσμα την ηλεκτροδότηση ποσοστού 10% των απομακρυσμένων αγροτικών περιοχών, χρησιμοποιώντας αυτόνομες Φ/Β εγκαταστάσεις. Στην υπο-σαχάρια Αφρική, αξιοσημείωτο παράδειγμα από αυτές της περιοχές είναι η Κένυα, η κυβέρνηση της οποίας ίδρυσε το 2006 την “Αρχή Ηλεκτροδότησης Αγροτικών Περιοχών” με σκοπό να επιταχυνθεί ο ρυθμός ηλεκτροδότησης των απομονωμένων περιοχών με την προώθηση της χρήσης μικρών Φ/Β συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρισμού για φωτισμό μίας λάμπας, τηλεόρασης, ραδιόφωνο και φόρτιση κινητού τηλεφώνου. Στη νότιο ανατολική Ασία με σημαντικότερο παράδειγμα το Μπαγκλαντές, όπου η IDCOL προωθεί τη διάδοση των αυτόνομων Φ/Β συστημάτων για τις οικίες στις απομακρυσμένες περιοχές μέσω του προγράμματος "Solar Energy Program" κατάφερε έως τον Αύγουστο του 2010 και χρηματοδότησε την εγκατάσταση 645.033 οικιακά φ/β συστήματα (Solar Home Systems - SHSs) και ο στόχος έως το 2012 είναι να χρηματοδοτήσει 1 εκατομμύριο SHSs.^{xx}

3.5.2 Διασύνδεση Φ/Β στο Δίκτυο

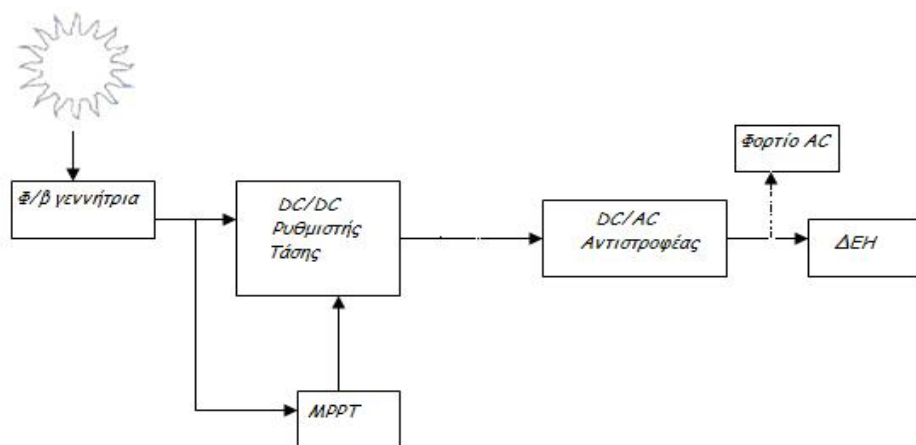
Η ενότητα αυτή αναφέρεται σε ορισμένα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που απαρτίζουν ένα διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα με το δίκτυο. Ένα σύστημα τέτοιο σύστημα αποτελείται βασικά από μια Φ/Β γεννήτρια (σύνολο Φ/Β πλαισίων) και μια μονάδα μετατροπής ισχύος (αντιστροφέας). Στην Εικόνα 3-44 φαίνεται η σχηματική παράσταση ενός διασυνδεδεμένου Φ/Β Σταθμού με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.



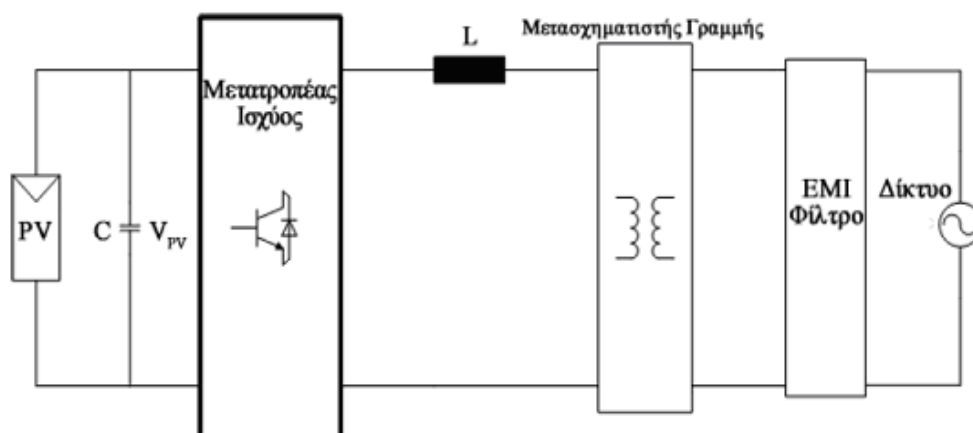
Εικόνα 3.12 Σχηματική παράσταση διασυνδεδεμένου Φ/Β σταθμού με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Τα βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται σε μία ολοκληρωμένη μονάδα μετατροπής ισχύος είναι:

- Να έχει ενσωματωμένο μετασχηματιστή.
- Να έχει τη δυνατότητα εύρεσης σημείου μέγιστης παραγόμενης ισχύος (Maximum Power Point Tracker ή M.P.P.). Το σημείο αυτό δεν είναι σταθερό καθώς αλλάζει τόσο με την ηλιακή ακτινοβολία όσο και με τη θερμοκρασία. Από τη στιγμή λοιπόν που η τάση και το ρεύμα της Φ/Β συστοιχίας μεταβάλλονται με τις καιρικές συνθήκες ο αντιστροφείας θα πρέπει να μετακινεί το σημείο λειτουργίας του έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απορρόφηση ισχύος από τη Φ/Β συστοιχία. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος, του ανιχνευτή του σημείου μέγιστης ισχύος.
- Να προσφέρει γαλβανική απομόνωση.
- Να συμπεριλαμβάνει ρυθμιστή φόρτισης. Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι μια απλή ηλεκτρονική συσκευή που φροντίζει για τη σωστή φόρτιση των συσσωρευτών (μπαταριών) του Φ/Β συστήματος.
- Να παρέχει δυνατότητα ελέγχου συχνότητας (για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις).



Εικόνα 3.13 Απλοποιημένο διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος.



Εικόνα 3.14 Τυπικό μοντέλο Φ/Β συστήματος διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

Μετά τον αντιστροφέα παρατηρείται το πηνίο γραμμής L , που απαιτείται για τον έλεγχο του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο. Ο αντιστροφέας περιλαμβάνει επίσης το Μ/Σ και το φίλτρο ΕΜ.Ι.. Τα πρώτα Φ/Β συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για οικιακή χρήση περιελάμβαναν έναν μονοφασικό αντιστροφέα με έναν μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (Low Frequency ή L.F.) που τοποθετείται μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου.

Αυτός ο μετασχηματιστής απαιτείται από όλους σχεδόν τους εθνικούς κανονισμούς και εγγυάται τη γαλβανική απομόνωση μεταξύ του δικτύου και των Φ/Β συστημάτων, παρέχοντας προστασία. Επιπλέον, παρέχει απομόνωση μεταξύ του Φ/Β συστήματος και του εδάφους. Επίσης, εξασφαλίζει δεν εγχέεται συνεχές ρεύμα στο δίκτυο, γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει κορεσμό στον μετασχηματιστή διανομής. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της τάσης εξόδου των αντιστροφέων. Εντούτοις, οι Μ/Σ L.F. αυξάνουν το βάρος, το μέγεθος και το κόστος του Φ/Β συστήματος και μειώνουν την απόδοσή του.

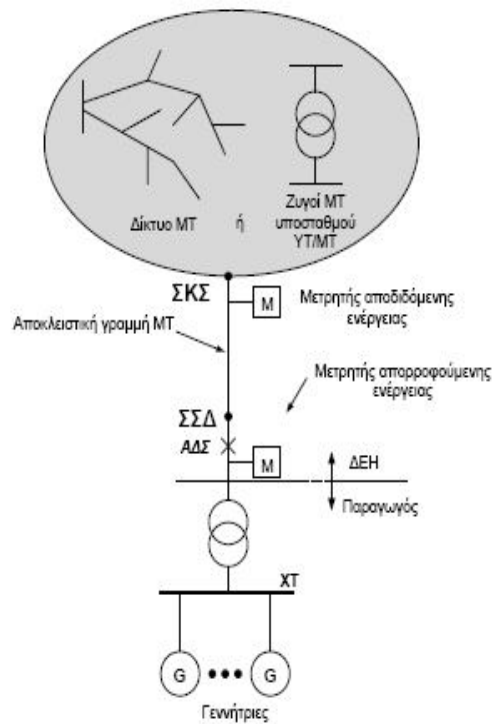
Η εναλλακτική λύση είναι να αντικατασταθούν οι Μ/Σ L.F. με υψηλής συχνότητας (High Frequency- H.F.) Μ/Σ τοποθετημένους στο συνεχές τμήμα του αντιστροφέα. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται πάλι γαλβανική απομόνωση μεταξύ της Φ/Β γεννήτριας και του δικτύου. Οι μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας έχουν μικρότερο βάρος, μέγεθος και κόστος. Εντούτοις, είναι πιο πολύπλοκοι και καμιά ουσιαστική βελτίωση δεν παρατηρείται στη γενική απόδοση του συστήματος.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει καταστήσει πιθανό να παραληφθεί ο Μ/Σ χωρίς αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά των συστημάτων όσον αφορά την ασφάλεια. Μερικές Χώρες, όπως η Γερμανία, επιτρέπουν τη χρήση αντιστροφέων χωρίς μετασχηματιστή και άλλες σκέφτονται σοβαρά να αλλάξουν τους κανονισμούς προς αυτή την κατεύθυνση. Επομένως, είναι αρκετά πιθανό ότι πολλά από τα μελλοντικά Φ/Β συστήματα που είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο να μην περιλαμβάνουν Μ/Σ.

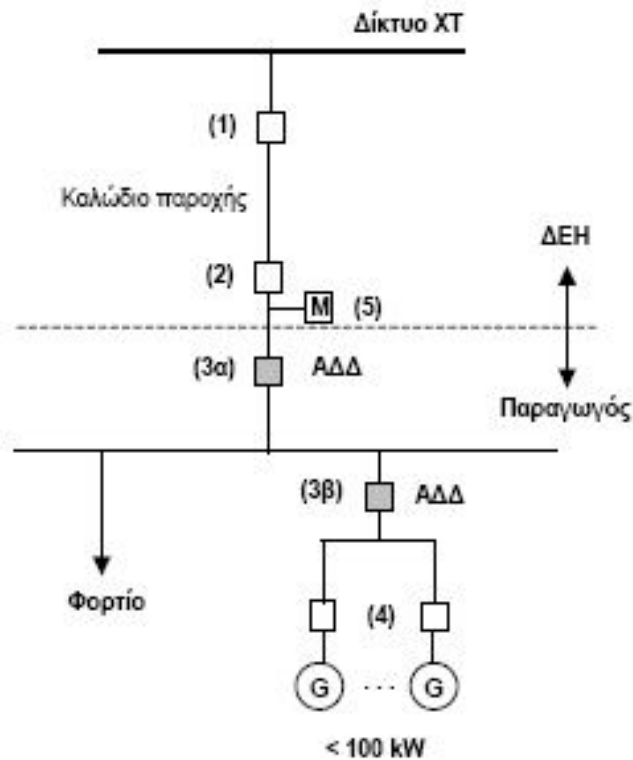
Τέλος, στο τυπικό μοντέλο παρατηρείται το ΕΜ.Ι. φίλτρο, το οποίο μειώνει την ανισορροπία μεταξύ των παρασιτικών χωρητικοτήτων του συστήματος, την ανισορροπία μεταξύ των τιμών των σύνθετων αντιστάσεων γραμμής (Z), την έλλειψη συγχρονισμού στη διακοπτική λειτουργία των δύο σκελών της γέφυρας πλήρους κύματος του αντιστροφέα, την ανισορροπία της συμπεριφοράς των διακοπτικών στοιχείων και τις καθυστερήσεις στην οδήγηση τους. Τα φαινόμενα αυτά κάνουν απαραίτητη τη χρήση φίλτρου ΕΜ.Ι.. Στην πραγματικότητα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή στο φάσμα υψηλής συχνότητας.

Άρθρου 9 του Ν.2941/2001. Οι απαιτούμενες εγκρίσεις για την εγκατάσταση των έργων σύνδεσης, κατά τα προηγούμενα εδάφια, χορηγούνται σύμφωνα με τις αναλόγως εφαρμοζόμενες διατάξεις της κείμενης νομοθεσίας που αφορούν τον Κύριο του Συστήματος ή του Δικτύου.

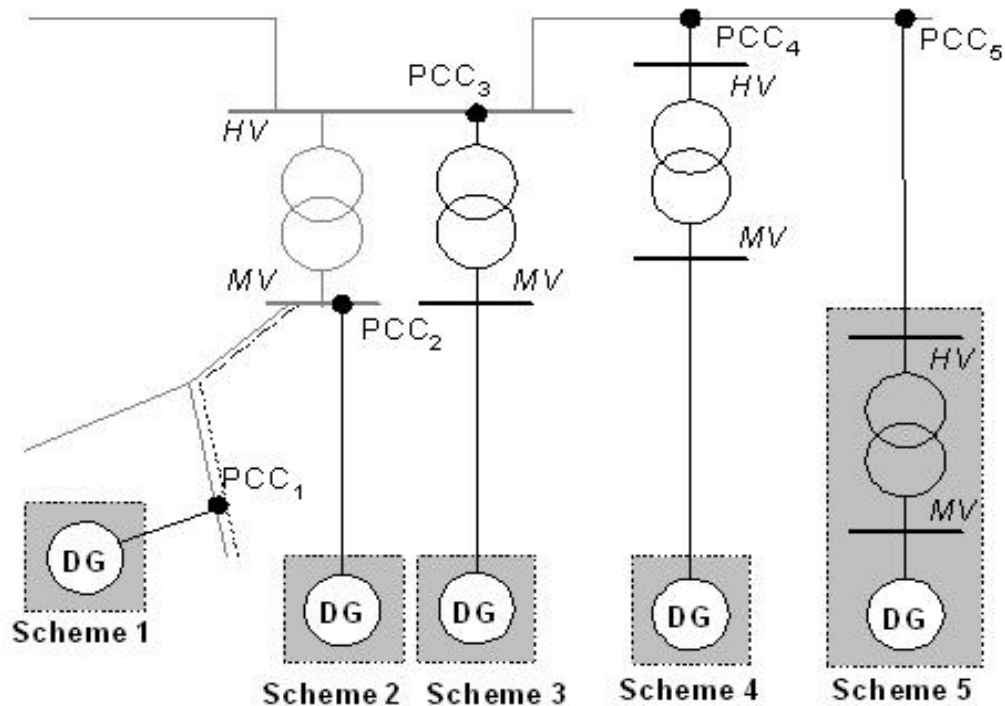
Στις παρακάτω εικόνες δείχνονται οι τυπικές συνδέσεις Α.Π.Ε. (συμβολίζονται ως G) στο δίκτυο Χ.Τ.. Στα σχήματα αυτά φαίνονται επίσης και το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο (Σ.Σ.Δ.) που είναι το σημείο του δικτύου Μ.Τ. ή Χ.Τ. όπου συνδέονται οι εγκαταστάσεις του παραγωγού και βρίσκεται πάντοτε στην έξοδο των εγκαταστάσεων αυτών, αλλά και το σημείο κοινής σύνδεσης (Σ.Κ.Σ.) που είναι το πλησιέστερο προς τις εγκαταστάσεις του παραγωγού σημείο του δικτύου, στο οποίο συνδέεται (ή μπορεί να συνδεθεί μελλοντικά) άλλος καταναλωτής ή παραγωγός. Στην Εικόνα 3-48 φαίνεται επίσης και το σχήμα του αυτόματου διακόπτη διασύνδεσης (Α.Δ.Δ.).



Εικόνα 3.15 Τυπική σύνδεση Α.Π.Ε στο δίκτυο χαμηλής τάσης



Εικόνα 3.16 Τυπική σύνδεση Α.Π.Ε. στο δίκτυο Χ.Τ.



Εικόνα 3.17 Τυπική σύνδεση Α.Π.Ε. στο δίκτυο μέσης (M.V.) αλλά και υψηλής (H.V.) μέσω Μ/Σ μέσης προς υψηλή τάση.

3.6 Επιπτώσεις διείσδυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Για την αποτροπή των κλιματικών αλλαγών που απειλούν σήμερα τον πλανήτη, παρατηρείται η στροφή προς τις καθαρές πηγές ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από αυτές. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση του αριθμού των Φ/Β συστημάτων που συνδέονται στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διείσδυση των Φ/Β μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία των δικτύων διανομής, να μειώσει τη λειτουργία των θερμικών μονάδων, να λειτουργήσει επικουρικά στη μη υπερφόρτιση των μετασχηματιστών, κ.α. Επιπλέον μπορεί να έχει αντίκτυπο στο περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία.

3.6.1 Επιπτώσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα σε δίκτυα διανομής

Η διασύνδεση Φ/Β μπορεί ενδεχομένως να αναβάλλει τις βελτιώσεις γραμμών μετασχηματιστών και μεταφοράς, να επεκτείνει τα διαστήματα συντήρησης εξοπλισμού, να μειώσει τις ηλεκτρικές απώλειες γραμμών, και να βελτιώσει την αξιοπιστία των δικτύων διανομής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που εγκαθίστανται.

3.6.1.1 Επιπτώσεις στους μετασχηματιστές ενός υποσταθμού

Η σύνδεση Φ/Β με το δίκτυο αναβάλλει την αναβάθμιση του μετασχηματιστή του υποσταθμού καθώς τα Φ/Β παράγουν ενέργεια και την παρέχουν στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια της μέγιστης χρήσης. Το μειωμένο φορτίο

μετασχηματιστών οδηγεί στις μειωμένες θερμοκρασίες μετασχηματιστών και τη μακρύτερη ζωή τους. Ένας πιο δροσερός μετασχηματιστής μπορεί να προσαρμόσει την πρόσθετη αύξηση φορτίων και να επιτρέψει την αναβολή της αγοράς ενός νέου μετασχηματιστή. Σύμφωνα με μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Kernan της Καλιφόρνιας, η εγκατάσταση Φ/Β ισχύος 0,5MW οδήγησε στη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του μετασχηματιστή του υποσταθμού της περιοχής κατά 4°C κατά τη διάρκεια μιας μέρας με μεγάλη ζήτηση το 1993. Η μείωση αυτή συνέβαλλε στην αύξηση της ποσότητας ισχύος που ρέει μέσα από τον μετασχηματιστή κατά 4,6% ή 0,46MW κατά την ώρα αιχμής και στην αναβολή της αναβάθμισης του μετασχηματιστή του υποσταθμού, το κόστος της οποίας ανέρχεται σε \$398.000.

Παρόμοια οφέλη αναμένεται να έχει και ο Μ/Σ-2 του Υ/Σ Χανίων. Μετά την προσφορά της Φ/Β ισχύος σε ώρες αιχμής αναμένεται ανακούφιση του συγκεκριμένου Μ/Σ, στον οποίο συνδέονται μονάδες αιχμής, και επομένως αύξηση του προσδόκιμου λειτουργίας του. xix

3.6.1.2 Επιπτώσεις στις απώλειες μεταφοράς και διανομής

Οι ηλεκτρικές απώλειες των γραμμών εμφανίζονται ως ροές ρεύματος μέσω των αγωγών και άλλων συσκευών του συστήματος μεταφοράς και διανομής. Το μέγεθος των απωλειών συσχετίζεται με τη ροή ρεύματος και την αντίσταση των συσκευών. Κατά συνέπεια, οι απώλειες γραμμών μπορούν να μειωθούν με τη μείωση είτε της αντίστασης είτε του ρεύματος. Η μείωση της αντίστασης απαιτεί την αντικατάσταση ή την προσθήκη εξοπλισμού ενώ η μείωση του ρεύματος απαιτεί τη μείωση της ζήτησης ή την εξυπηρέτηση ενός μέρους του φορτίου τοπικά με μία τεχνολογία όπως τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο Φ/Β. Σύμφωνα με μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Kernan της Καλιφόρνιας, η εγκατάσταση Φ/Β ισχύος 0,5 MW οδήγησε στη μείωση των απωλειών του συστήματος, μείωση που αντιστοιχεί στο 6% της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β και εξοικονόμηση \$37.000 κατά τη διάρκεια της ζωής των Φ/Β εγκαταστάσεων (καθαρή παρούσα αξία), ποσό στο οποίο δεν περιλαμβάνεται η εξοικονόμηση χρημάτων από την αναβολή αναβάθμισης του συστήματος. Επίσης, σύμφωνα με τη μελέτη, αποδείχτηκε ότι τα Φ/Β που είναι εγκατεστημένα στην Ιεράπετρα προσφέρουν μια μείωση των απωλειών του συστήματος που αγγίζει τα 290 kW σε ωριαία βάση και φτάνει έως τις 1,67 MWh στη διάρκεια μιας καλοκαιρινής μέρας^{xxi}.

3.6.1.3 Διακύμανση τάσης στα σημεία σύνδεσης (voltage fluctuation)

Οποιαδήποτε έγχυση ισχύος στο δίκτυο διανομής προκαλεί ανύψωση της τάσης στο σημείο σύνδεσης του Φ/Β συστήματος με το δίκτυο. Το μεγαλύτερο πρόβλημα των ΑΠΕ είναι η μη σταθερή παραγωγή ισχύος λόγω της μεταβλητότητας των πηγών αυτών. Όσον αφορά τα Φ/Β συστήματα, το ποσό της ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο σχετίζεται άμεσα με την ένταση της φωτεινής ενέργειας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια μετατροπής. Αν λοιπόν η έξοδος των μονάδων υπόκειται σε μεγάλες αλλαγές σε σύντομο χρονικό διάστημα, λόγω της εξάρτησής τους από τις φυσικές συνθήκες, τότε ενδεχόμενα να προκληθεί και έντονη διακύμανση της τάσης στα σημεία σύνδεσης.

3.6.1.4 Ανύψωση τάσης στο δίκτυο (voltage rise)

Η τάση σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου πρέπει να κυμαίνεται μέσα σε κάποια όρια για τη σωστή λειτουργία του δικτύου, τα οποία είναι συνήθως +10% / -10% της οικονομικής τάσης. Η ενσωμάτωση διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο οδηγεί σε μια αύξηση της τάσης του δικτύου με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου διανομής. Αυτή η μεταβολή μπορεί να είναι ευπρόσδεκτη υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αλλά μπορεί επίσης να επιφέρει δυσλειτουργία του δικτύου υπό άλλες συνθήκες. Η ενσωμάτωση Φ/Β συστημάτων ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα ευστάθειας τάσης και να οδηγήσει σε κατάρρευση της τάσης (voltage collapse) και άρα σε αναστολή της σωστής λειτουργίας του δικτύου. Λόγω της μικρής ισχύος των Φ/Β το σύστημα μεταφοράς δεν επηρεάζεται.

3.6.2 Περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη της ηλιακής ενέργειας

Η Ελλάδα έχει το προνόμιο να είναι μία χώρα με τεράστιο ανανεώσιμο δυναμικό. Ιδιαίτερα ο ήλιος αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές πηγές ενέργειας με ασύγκριτα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά οφέλη.

3.6.2.1 Περιβάλλον - Μείωση εκπομπής ρύπων

Τα Φ/Β, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με μηδενική ρύπανση. Η εγκατάσταση Φ/Β συμβάλλει στη μείωση της παραγωγής ενέργειας που απαιτείται για την ικανοποίηση της ζήτησης των διαφόρων φορτίων με αποτέλεσμα τη μείωση της ποσότητας καυσίμου που καταναλώνεται από τις διάφορες μονάδες παραγωγής και της εκπομπής ρύπων (CO₂, NO_x, SO₂) που παράγονται από τα διάφορα καύσιμα.

Μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και συγκεκριμένα στις πολιτείες Κολοράντο και Καλιφόρνια έδειξε ότι μια κιλοβατώρα παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης φυσικού αερίου της τάξης των 6000-9000 kJ και της εκπομπής ρύπων CO₂ και NO_x της τάξης των 300-460 και 0.07-0.16g αντίστοιχα για την πολιτεία του Κολοράντο ενώ τα Φ/Β της πολιτείας της Καλιφόρνια συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης φυσικού αερίου και άνθρακα της τάξης των 2400-8100 kJ και 20-6800 kJ αντίστοιχα και της εκπομπής ρύπων CO₂, NO_x, SO₂ της τάξης των 300-460, 0,07-0,16 και 0-1,1g αντίστοιχα. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων προσομοιώθηκε η εγκατάσταση Φ/Β στις δύο αυτές πολιτείες με τη μεταβολή της διεύθυνσης των Φ/Β στις Δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής από 0 έως 10% με βήμα αύξησης 2%.

Στην Ελλάδα, υπολογίζεται ότι για κάθε μία ηλιακή κιλοβατώρα που παράγεται αποτρέπεται η έκλυση ενός κιλού διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό σημαίνει ότι αν η Ελλάδα εκπληρώσει τους στόχους της για την ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας έως το 2020 (700 MW Φ/Β), θα αποτρέπεται ετησίως η έκλυση περίπου 1.000.000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε, η εγκατάσταση 2MW από Φ/Β σε σχολεία της Αθήνας, προκάλεσε μια μείωση της ετήσιας εκπομπής CO₂, NO_x, SO₂ και σωματιδίων περίπου ίση με 1500-2500, 2-3,2, 5,5-12,8 και 0,9-2,5 τόνους αντίστοιχα. Σε μία άλλη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο νησί της Κύθνου, η εγκατάσταση ενός Φ/Β ισχύος 200 kW συνέβαλλε στη μείωση της ετήσιας εκπομπής CO₂, NO_x, SO₂ και σωματιδίων κατά 80800-96600, 26,4-31,6 και 39,2-47kg αντίστοιχα.^{xxii}

3.6.2.2 Οικονομικά οφέλη - Μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει σήμερα η Ελλάδα είναι η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, η οποία επιβαρύνει σημαντικά την εθνική οικονομία και κατ' επέκταση τους Έλληνες φορολογούμενους πολίτες. Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία του Υπουργείου Ανάπτυξης, τα εισαγόμενα καύσιμα και οι εισαγωγές ενέργειας κάλυψαν την ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα σε ποσοστό μεγαλύτερο από 40% για το έτος 2007. Η αύξηση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα αποτυπώνεται και στην οικονομική πορεία της ΔΕΗ, η οποία για το πρώτο εννεάμηνο του 2008 ανακοίνωσε ρεκόρ οικονομικών ζημιών. Μόνο για την αγορά εισαγόμενων καυσίμων και ενέργειας η ΔΕΗ δαπάνησε 713,4 εκατομμύρια ευρώ επιπλέον σε σύγκριση με το πρώτο εννεάμηνο του 2007. Επομένως, η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα συμβάλλει όχι μόνο στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και στην τόνωση της εθνικής μας οικονομίας.

Τα τελευταία έτη παρατηρείται μια σημαντική αύξηση στις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και σε μεγάλο βαθμό ευθύνεται η άνοδος των τιμών των εισαγόμενων καυσίμων και ενέργειας, δεν πρέπει να παραβλέψουμε και άλλους παράγοντες. Η λανθασμένη ενεργειακή στρατηγική που ακολουθείται ιστορικά (κατασκευή ολόενα και περισσότερων συμβατικών μονάδων, καμία πρόνοια για την εξοικονόμηση ενέργειας) έχει επιτείνει την αρνητική αυτή εξέλιξη. Σε όλα αυτά θα πρέπει να προστεθούν και οι πολιτικές εξελίξεις από το ευρωπαϊκό μέτωπο. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πακέτο για το Κλίμα και την Ενέργεια, από το 2013 οι βιομηχανίες ηλεκτροπαραγωγής στα περισσότερα ευρωπαϊκά κράτη (μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα) θα πρέπει να πληρώνουν για το 100% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Συστήματος Εμπορίας Ρύπων. Η εξέλιξη αυτή σημαίνει ότι η ΔΕΗ θα επιβαρύνεται ετησίως επιπλέον με 1,5 δις ευρώ (συντηρητική εκτίμηση). Αν και τα χρονικά περιθώρια είναι περιορισμένα, η ΔΕΗ θα πρέπει να επενδύσει επιθετικά στις ΑΠΕ και επομένως στην ανάπτυξη Φ/Β συστημάτων και την εξοικονόμηση ενέργειας σε αντικατάσταση των ρυπογόνων συμβατικών μονάδων. Σε μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο νησί της Κύθνου^{xxiii}, η εγκατάσταση ενός Φ/Β ισχύος 100 kW συνέβαλλε στη μείωση του ετήσιου κόστους λειτουργίας θερμικών μονάδων στο νησί κατά 4900 ευρώ περίπου, μείωση που αντιστοιχεί στο 0,93% του αρχικού κόστους ενώ η εγκατάσταση ενός Φ/Β ισχύος 200 kW συνέβαλλε στη μείωση του ετήσιου κόστους λειτουργίας θερμικών μονάδων στο νησί κατά 13.000€ περίπου, μείωση που αντιστοιχεί στο 2,49% του αρχικού κόστους. Μια άλλη μελέτη για την περιοχή της Ιεράπετρας έδειξε πως τα Φ/Β που είναι εγκατεστημένα στο νομό της Ιεράπετρας προκαλούν μείωση της κατανάλωσης καυσίμου diesel κατά 450 λίτρα και καυσίμου μαζούτ κατά 310 κιλά ανά παραγόμενη MWh, πράγμα που οδηγεί σε εξοικονόμηση έως και 300 περίπου ευρώ ανά παραγόμενη MWh για το σύστημα της Κρήτης. xxi

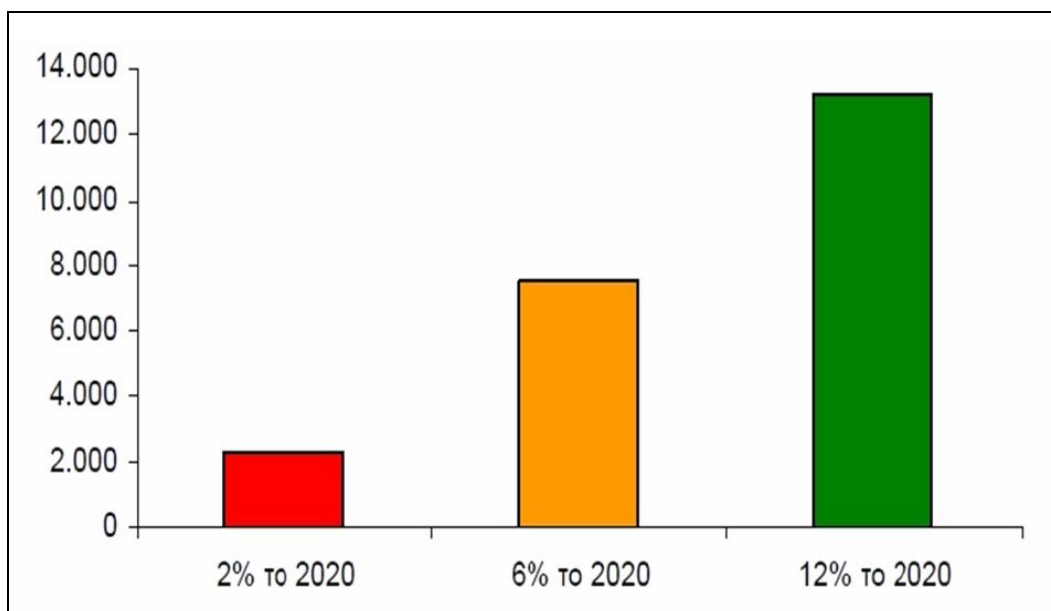
3.6.2.3 Κοινωνικά οφέλη - Διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του παραγωγού – καταναλωτή – Δημιουργία Νέων Θέσεων εργασίας

Η ανάπτυξη Φ/Β συστημάτων, έχει οδηγήσει σε μεταβολή της συμπεριφοράς των παραγωγών – καταναλωτών σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας. Το να έχουν το δικό τους Φ/Β σύστημα, θα επηρεάσει τη συμπεριφορά τους ως προς την κατανάλωση ενέργειας καθώς θα μεγιστοποιήσουν το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχουν στο δίκτυο, μειώνοντας παράλληλα την κατανάλωσή τους. Δίνοντας τον απόλυτο έλεγχο στον καταναλωτή και άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια, τον καθιστούν πιο προσεκτικό στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια και συμβάλλουν

έτσι στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση της ενέργειας. Επιπλέον η συχνότερη παρατήρηση του μετρητή ενέργειας θα οδηγήσει στην εκδήλωση ενδιαφέροντος για το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται. Η μύηση του καταναλωτή στη διαδικασία παραγωγής ενέργειας και η ενασχόλησή του με την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια του νοικοκυριού του τον οδηγεί στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στοχεύοντας όχι μόνο στην εξοικονόμηση χρημάτων αλλά και στην προστασία του περιβάλλοντος. Ένα παράδειγμα που υποστηρίζει αυτή τη θεωρία είναι η αύξηση της χρήσης συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας (πχ. συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού) τα τελευταία χρόνια.

Η στροφή προς την πράσινη επιχειρηματικότητα, με την αξιοποίηση των ΑΠΕ, οδήγησε στην ανάπτυξη της πράσινης οικονομίας και στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας στο χώρο της ενέργειας. Τα Φ/Β είναι μια από τις λίγες ενεργειακές τεχνολογίες όπου η Ελλάδα έχει τη δυνατότητα να έχει σημαντικό μερίδιο με εγχώρια παραγωγή. Ήδη στην παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών, στην εμπορία, εγκατάσταση και συντήρηση Φ/Β συστημάτων δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα πάνω από 200 εταιρείες με εκατοντάδες εργαζόμενους. Επιπλέον, δημιουργούνται μονάδες παραγωγής επικουρικού εξοπλισμού όπως βάσεις στήριξης, ηλιοστάτες (trackers), μπαταρίες, αντιστροφείς ισχύος. Σήμερα λειτουργούν 5 εργοστάσια παραγωγής Φ/Β στην Ελλάδα που σε πλήρη ανάπτυξη θα απασχολούν περίπου 1000 άτομα.

Η νέα έκθεση «Εξελιγμένη Στρατηγική στις Ανανεώσιμες» που υποστηρίχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, υπολόγισε ότι η προώθηση των ΑΠΕ θα προσφέρει 2,5εκ. θέσεις έως το 2020. Τουλάχιστον 55.000 άνθρωποι απασχολούνται στον τομέα των Φ/Β στη Γερμανία. Με συντηρητικούς υπολογισμούς ο αριθμός των εργαζομένων της Ε.Ε. στα Φ/Β αναμένεται να φτάσει τους 727.000 εργαζόμενους το 2020 και το 1,4εκ. το 2030. Ανάλογα με το σενάριο υλοποίησης Φ/Β στην Ελλάδα, θα υπάρχει και ανάλογη κάλυψη θέσεων εργασίας.^{xxiv}



Εικόνα 3.18 Θέσεις πλήρους απασχόλησης στα φ/β το 2020 (3 σενάρια διεξόδου στο ενεργειακό ισοζύγιο)

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Για να κάνουμε πρόβλεψη παραγωγής χρειαζόμαστε ένα μαθηματικό μοντέλο ενεργειακής απόδοσης Φ/Β. Διαθέτοντας χρονοσειρές με ωριαίες τιμές μετεωρολογικών δεδομένων, χρειαζόμαστε ένα μαθηματικό μοντέλο που τις χρονοσειρές αυτές θα τις μετατρέψει σε χρονοσειρές Φ/Β παραγωγής. Ο στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι η εξαγωγή ωριαίας χρονοσειράς παραγωγής ενός φανταστικού πλαισίου ESP series60 poly 225w, εγκατεστημένου στο πολυτεχνείο Κρήτης.

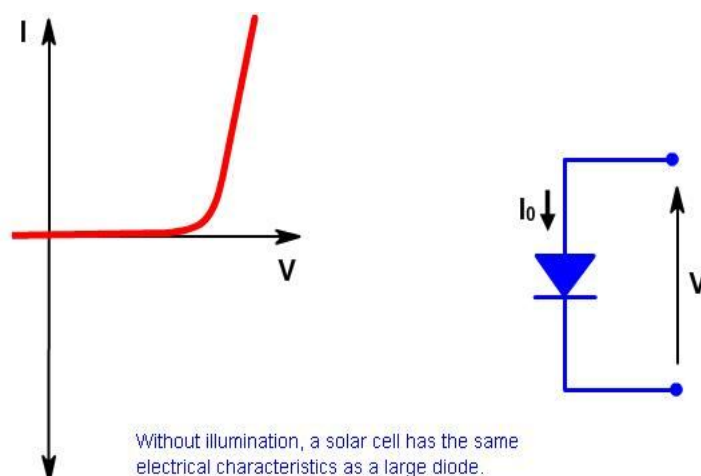
Γενικά στη βιβλιογραφία μπορεί κανείς να βρει αρκετά μοντέλα πρόβλεψης της ενεργειακής απόδοσης ενός Φ/Β συστήματος. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία περιγραφή δύο, διαφορετικής λογικής, μοντέλων πρόβλεψης της ενεργειακής απόδοσης. Αρχικά θα παρουσιαστεί εν συντομία ένα θεωρητικό μοντέλο, μοντέλο της μιας διόδου(single diode model) και στη συνέχεια ένα εμπειρικό μοντέλο βασισμένο σε μετρήσεις, που προτάθηκε από τη Sandia National Laboratories.

4.1 Μοντέλο της μιας Διόδου(single diode model)

Το μοντέλο αυτό έχει ως στόχο τη μοντελοποίηση της Φ/Β κυψέλης σε ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Σκοπός του είναι η πρόβλεψη της DC ενέργειας που παράγεται από ένα Φ/Β πλαίσιο σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας, ενώ μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου.

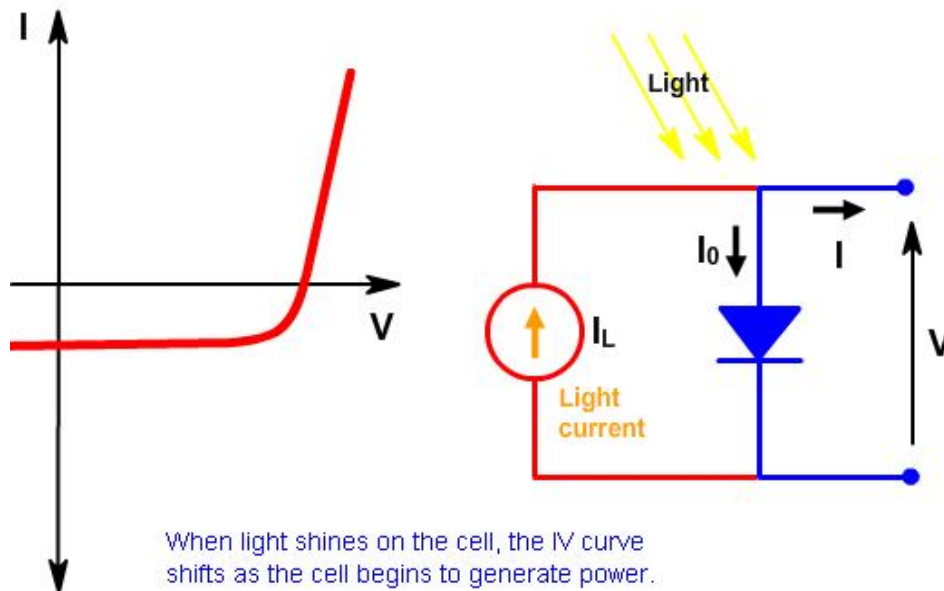
Όπως έχει αναφερθεί(στο κεφάλαιο 3.1), η Φ/Β κυψέλη λειτουργεί σαν μια μεγάλη διάδος, με ορθή πόλωση, όταν η άνοδος (περιοχή πρόσμιξης p) έχει θετικό δυναμικό και κάθοδος (η περιοχή πρόσμιξης n) έχει αρνητικό δυναμικό. Όταν η διάδος είναι ανάστροφα πολωμένη, τότε εμποδίζεται η ροή του ρεύματος προς αυτήν την διεύθυνση. Η καμπύλη ρεύματος τάσης που ισχύει για την κλασσική διάοδο, ισχύει και για την Φ/Β κυψέλη.

Όταν η κυψέλη δεν φωτίζεται, το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται μόνο από μια διάοδο. Η τάση στα άκρα της κυψέλης ισούται με την τάση στα άκρα της διόδου και το ρεύμα εξόδου είναι το ίδιο με αυτό που διαρρέει την διάοδο αλλά με αντίθετη φορά. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.1.

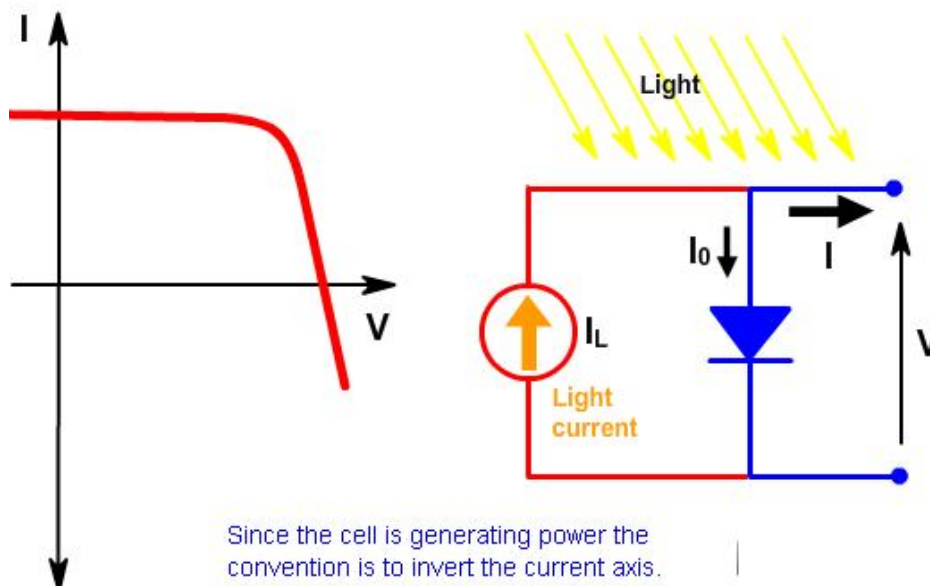


Εικόνα 4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα και διάγραμμα I-V όταν η κυψέλη δεν απορροφά φως

Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στην κυψέλη τότε η ενέργεια των φωτονίων δημιουργεί φορτισμένους φορείς. Μια κυψέλη η οποία δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έχει σαν ισοδύναμο κύκλωμα μια δίοδο παράλληλα τοποθετημένη σε μια πηγή ρεύματος. Αυτή η πηγή ρεύματος παράγει το φωτοηλεκτρικό ρεύμα ή αλλιώς φωτο-ρεύμα I_L . Το ρεύμα εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας. Τώρα η χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου μετατοπίζεται προς τα κάτω ανάλογα με το μέγεθος του φωτο-ρεύματος. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες 4.2 και 4.3.



Εικόνα 4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα και διάγραμμα I-V όταν η κυψέλη απορροφά φως



Εικόνα 4.3 Ισοδύναμο κύκλωμα όταν η κυψέλη απορροφά φως, και αντιστροφή του I-V διαγράμματος, ως προς τον οριζόντιο άξονα, αφού η κυψέλη δίνει ισχύ

Η σχέση που συνδέει την τάση (V) και το ρεύμα (I) για δεδομένη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία του παραπάνω ισοδύναμου είναι η εξής:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] - I_L \quad (4.1.1)$$

Όπου:

q: το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

k: η σταθερά του Boltzmann

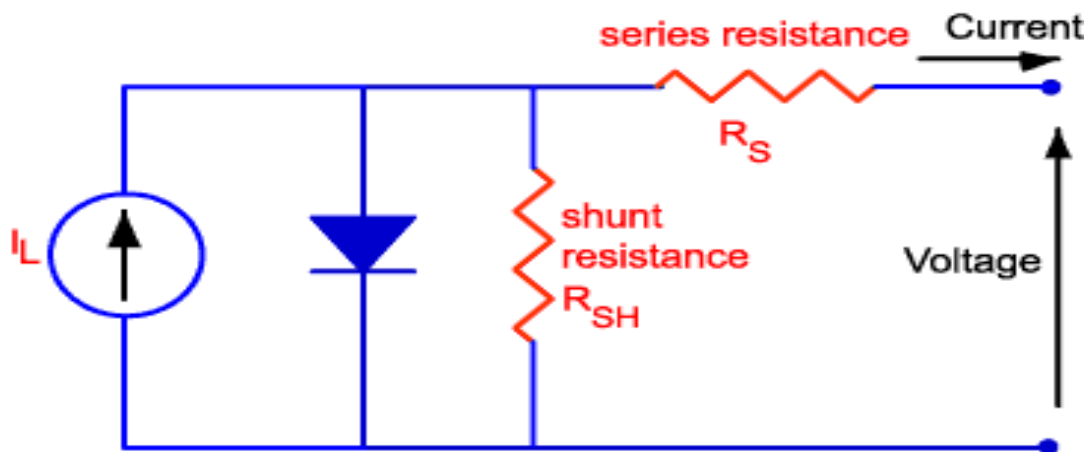
n: ο ιδανικός συντελεστής της διόδου

T: η θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου (Kelvin)

I_0 : ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

I_L : φωτο-ρεύμα

Επειδή όμως στις Φ/Β κυψέλες παρατηρείται μια πτώση τάσης καθώς οι φορτισμένοι φορείς μετακινούνται από το υλικό του ημιαγωγού στις ηλεκτρικές επαφές, προστίθεται εν σειρά στο μοντέλο μια ωμική αντίσταση R_S . Επίσης εμφανίζονται τα λεγόμενα ρεύματα διαρροής τα οποία συμβολίζονται με την παράλληλη αντίσταση R_{SH} . Η προσθήκη αυτών των αντιστάσεων δίνει στο μοντέλο μεγαλύτερη ακρίβεια. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4 Πλήρες ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα μοντέλου μιας διόδου

Με την προσθήκη λοιπόν και των δυο αντιστάσεων η σχέση που συνδέει το ρεύμα με την τάση, πάντα για δεδομένη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία, γίνεται:

$$I = I_L - I_0 \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (4.1.2)$$

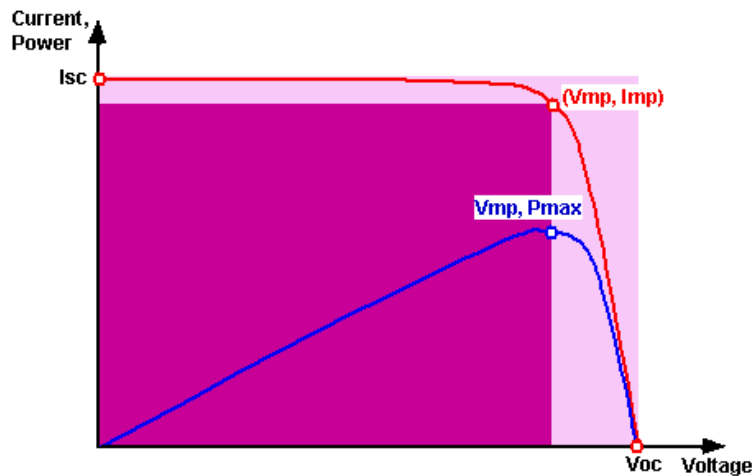
Όπου:

R_S : αντίσταση σε σειρά (series resistance)

R_{SH} : εγκάρσια αντίσταση (shunt resistance)

Η εξίσωση αυτή είναι μια μη γραμμική πεπλεγμένη εξίσωση, $I = f(I, V)$. Αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός πλαισίου σε στατικές

καταστάσεις, σύμφωνα με το μοντέλο της μιας διόδου. Από αυτήν προκύπτει διαγράμματα ρεύματος-τάσης και ρεύματος-ισχύος, όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.5



Εικόνα 4.5 Διαγράμματα I-V και I-P που προκύπτουν από το μοντέλο μιας διόδου

Όπου:

I_{sc} : Ρεύμα βραχυκύκλωσης στην έξοδο της κυψέλης για τάση εξόδου $V=0V$

V_{oc} : Τάση ανοιχτοκύκλωσης για ρεύμα $I=0A$

MP: Σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point): Το σημείο μέγιστης ισχύος είναι το σημείο της I-V καμπύλης όπου αντιστοιχεί το ορθογώνιο με την μέγιστη επιφάνεια. Η ισχύς στο σημείο αυτό, για δοσμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

I_{mp} : Ρεύμα μέγιστης ισχύος

V_{mp} : Τάση μέγιστης ισχύος

Από την πεπλεγμένη εξίσωση $I = f(I, V)$ μπορούμε να βρούμε τα παραπάνω σημεία για συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας αν ο κατασκευαστής μας έχει δώσει τις τιμές των αντιστάσεων και τα χαρακτηριστικά της διόδου. Στην (4.1.2) θέτουμε $I = I_{sc}$ και $V = 0$ για να βρούμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης, θέτουμε $I=0$ και $V = V_{oc}$ για να βρούμε την τάση ανοιχτοκύκλωσης και $I = I_{mp}$ και $V = V_{mp}$ με χρήση της παραγώγου του P ως προς V ίσον με μηδέν.^{xxv}

Ο βασικότερος λόγος που απορρίψαμε αυτό το μοντέλο είναι γιατί δεν έχει εξισώσεις που να παραγραφούν την μεταβολή των σημείων (I , I_{sc} , V_{oc} , και V) συναρτήσει της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμα και να μας έχει δώσει ο κατασκευαστής τις τιμές των αντιστάσεων και τα χαρακτηριστικά της διόδου, θα είναι για δεδομένες τιμές θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, κάτι που καθιστά το μοντέλο μη λειτουργικό για μελέτη απόδοσης φωτοβολταϊκού. Έτσι λοιπόν επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλου που αναπτύχθηκε στα Sandia National Laboratories, που περιγράφουμε στη συνέχεια.

4.2 Μοντέλο της Sandia National Laboratories

Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει ηλεκτρικά, θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων και είναι σχεδιασμένο να χρησιμοποιεί ως είσοδο ωριαίες χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικών δεδομένων και να δίνει ως έξοδο χρονοσειρές σχετικές με την ωριαία απόδοση Φ/Β κυψελών, πλαισίων ή συστοιχιών, όπως το ρεύμα και η

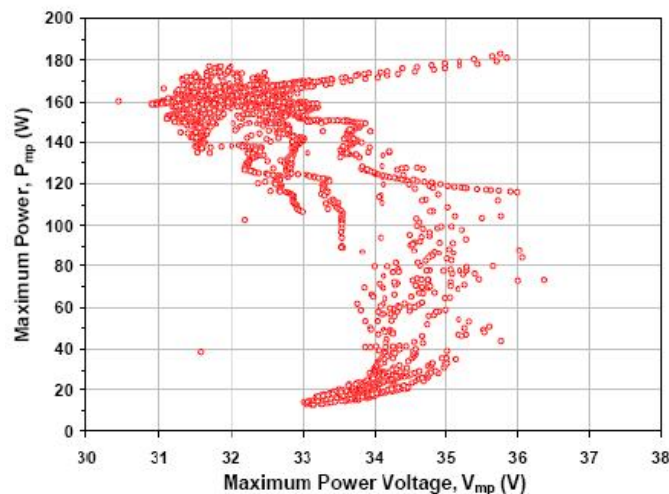
τάση μέγιστης ισχύος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό μιας Φ/Β συστοιχίας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή βασισμένη στην αναμενόμενη ισχύ ή/και ενέργεια σε ωριαία, μηνιαία ή ετήσια βάση. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση της πραγματικής ως προς την αναμενόμενη απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του Φ/Β συστήματος και με τον τρόπο αυτό να συμβάλλει στη διάγνωση προβλημάτων.

Το μοντέλο απόδοσης είναι εμπειρικό, ωστόσο επιτυγχάνει καθολικότητα και ακρίβεια από το γεγονός ότι οι ξεχωριστές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σ' αυτό προκύπτουν από τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά των ηλιακών στοιχείων. Στην παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων λαμβάνονται υπόψη ηλεκτρικές, θερμικές, φασματικές και οπτικές επιδράσεις. Η μοντελοποίηση της απόδοσης έχει αξιολογηθεί επιτυχώς κατά τη διάρκεια εκτεταμένων πειραμάτων και συγκριτικών μελετών με άλλα εργαστήρια και οργανισμούς ελέγχου^{xxvi}.

4.2.1 Εξισώσεις Απόδοσης Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Ο έλεγχος και η μοντελοποίηση της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων σε εξωτερικό περιβάλλον αποτελούν μια περίπλοκη διαδικασία εξαιτίας των επιδράσεων από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με το περιβάλλον και τη φυσική των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό, εφαρμογή και παρατήρηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ένα μοντέλο απόδοσης πρέπει να είναι σε θέση να διαχωρίζει και να ποσοτικοποιεί την επίδραση όλων των σημαντικών παραγόντων.

Η παρακάτω γραφική (εικόνα 4.6) παράσταση απεικονίζει την πολυπλοκότητα της προαναφερθείσας διαδικασίας χρησιμοποιώντας δεδομένα που καταγράφηκαν για ένα πολυκρυσταλλικό (mc-Si) Φ/Β πλαίσιο πυριτίου 165-Wp για μια περίοδο πέντε ημερών τον Ιανουάριο του 2002, που είχε και καθαρό ουρανό και συννεφιάς. Η κατακόρυφη διασπορά στις τιμές της μέγιστης ισχύος P_{mp} οφείλεται πρωταρχικά σε διακυμάνσεις του επιπέδου ηλιακής ακτινοβολίας και δευτερευόντως σε επιδράσεις από το ηλιακό φάσμα, τη θερμοκρασία πλαισίου και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στοιχείων. Η οριζόντια διασπορά στις αντίστοιχες τιμές τάσεως V_{mp} οφείλεται κατά κύριο λόγο στη θερμοκρασία πλαισίου με μικρότερη επίδραση από την ηλιακή ακτινοβολία και τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στοιχείων. Το μοντέλο απόδοσης που θα περιγράψουμε εδώ θα πρέπει να διαχωρίσει τις επιδράσεις αυτές έτσι ώστε η χαοτική συμπεριφορά της εικόνα 4.6 να μπορεί να μοντελοποιηθεί με κατάλληλες εξισώσεις.



Εικόνα 4.6 Διάγραμμα μετρούμενων τιμών P_{mp} και V_{mp} πολυκρυσταλλικού πλαισίου

4.2.2 Βασικές Εξισώσεις

Οι παρακάτω εξισώσεις ορίζουν το μοντέλο της Sandia που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της ενεργειακής παραγωγής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι εξισώσεις μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα για οποιοδήποτε συνδυασμό πλαισίων, συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα, μιας συστοιχίας. Οι ίδιες εξισώσεις εφαρμόζονται εξίσου καλά για μεμονωμένα στοιχεία, πλαίσια, συστοιχίες τόσο επίπεδων όσο και συγκεντρωτικών πλαισίων.

Οι εξισώσεις (4.2.1) έως (4.2.10) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ισχύος και ενέργειας που παράγεται από ένα πλαίσιο θεωρώντας ότι οι προκαθορισμένοι συντελεστές απόδοσης πλαισίων καθώς και δεδομένα ακτινοβολίας είναι διαθέσιμα.

$$I_{sc} = I_{sco} \cdot f_1(AM_a) \cdot \{(E_b \cdot f_2(AOI) + f_d \cdot E_{diff}) / E_o\} \cdot \{1 + \alpha_{Isc} \cdot (T_c - T_o)\} \quad (4.2.1)$$

$$I_{mp} = I_{mpo} \cdot \{C_0 \cdot E_e + C_1 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + \alpha_{Imp} \cdot (T_c - T_o)\} \quad (4.2.2)$$

$$V_{oc} = V_{oco} + N_s \cdot \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + \beta_{Voco} \cdot (T_c - T_o) \quad (4.2.3)$$

$$V_{mp} = V_{mpo} + C_2 \cdot N_s \cdot \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + C_3 \cdot N_s \cdot \{\delta(T_c) \cdot \ln(E_e)\}^2 + \beta_{Vmpo} \cdot (T_c - T_o) \quad (4.2.4)$$

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (4.2.5)$$

$$FF = P_{mp} / (I_{sc} \cdot V_{oc}) \quad (4.2.6)$$

$$E_e = I_{sc} / [I_{sco} \cdot \{1 + \alpha_{Isc} \cdot (T_c - T_o)\}] \quad (4.2.7)$$

$$\delta(T_c) = n \cdot k \cdot (T_c + 273.15) / q \quad (4.2.8)$$

$$I_x = I_{xo} \cdot \{C_4 \cdot E_e + C_5 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + (\alpha_{Isc}) \cdot (T_c - T_o)\} \quad (4.2.9)$$

$$I_{xx} = I_{xxo} \cdot \{C_6 \cdot E_e + C_7 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + (\alpha_{Imp}) \cdot (T_c - T_o)\} \quad (4.2.10)$$

Όπου:

I_{sc} : ρεύμα βραχυκύκλωσης (Short-circuit current) (A)

I_{mp} : ρεύμα στο σημείο μέγιστης λειτουργίας (Current at the maximum-power point) (A)

I_x : ρεύμα για τάση $V = 0.5 \cdot V_{oc}$

I_{xx} : ρεύμα για τάση $V = 0.5 \cdot (V_{oc} + V_{mp})$

V_{oc} : τάση ανοιχτοκύκλωσης (Open-circuit voltage) (V)

V_{mp} : τάση στο σημείο μέγιστης λειτουργίας (Voltage at maximum-power point) (V)

P_{mp} : ισχύ στο σημείο μέγιστης λειτουργίας (Power at maximum-power point) (W)

FF: Fill Factor (αδιάστατο)

N_s : αριθμός κελίων σε σειρά

N_p : αριθμός κελίων παράλληλα

K: σταθερά Boltzmann's, $1.38066E-23$ (J/K)

Q: στοιχειώδες φορτίο (Elementary charge), $1.60218 \cdot 10^{-19}$ (coulomb)

T_c : θερμοκρασία κελιού (°C)

T_o : θερμοκρασία αναφοράς (25°C)

E_o : ακτινοβολία αναφοράς (1000 W/m²)

$E_e = \eta$ 'ενεργή' ηλιακή ακτινοβολία (αδιάστατο)

$\delta(T_c)$: 'Θερμική τάση' ('Thermal voltage') ανά κελί σε θερμοκρασία T_c

E_b : Ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου, (W/m^2)

E_{diff} : Διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου, (W/m^2)

fd : Κλάσμα της διάχυτης ακτινοβολίας που λαμβάνεται από το πλαίσιο, τυπικά ίσο με τη μονάδα για επίπεδα πλαίσια

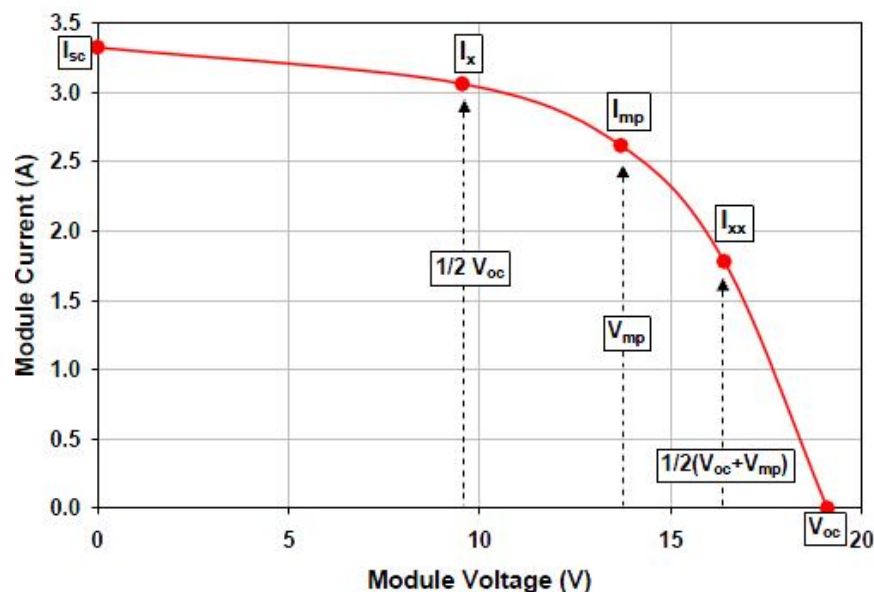
AMa : Απόλυτη αέρια μάζα, (αδιάστατο). Η τιμή της υπολογίζεται από τη γωνία ανύψωσης του ήλιου και το υψόμετρο της τοποθεσίας, και παρέχει μια σχετική μέτρηση για το μήκος της διαδρομής που ακολουθεί ο ήλιος μέσα από την ατμόσφαιρα.

AOI : Γωνία πρόσπτωσης του ήλιου, (μοίρες). AOI είναι η γωνία μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια του πλαισίου και της ακτινικής συνιστώσας του ήλιου.

$f1(AMa)$: Εμπειρική συνάρτηση που σχετίζει την επίδραση του ηλιακού φάσματος στο ρεύμα I_{sc} με τη μεταβολή της αέριας μάζας.

$f2(AOI)$: Εμπειρική συνάρτηση που σχετίζει την επίδραση των οπτικών απωλειών στο ρεύμα I_{sc} με τη γωνία πρόσπτωσης (AOI).

Τα τρία χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης I-V ενός πλαισίου, ρεύμα βραχυκύκλωσης, τάση ανοιχτοκύκλωσης και σημείο μέγιστης ισχύος δίνονται από τις τέσσερις πρώτες εξισώσεις. Στην παρακάτω εικόνα 4.7 φαίνονται τα τρία αυτά σημεία μαζί με δύο πρόσθετα που ορίζουν καλύτερα τη μορφή της καμπύλης.



Εικόνα 4.7 Βασική μορφή της καμπύλης I-V με τα πέντε χαρακτηριστικά σημεία

Τα δύο πρόσθετα σημεία της καμπύλης I-V υπολογίζονται από τις εξισώσεις (9) και (10). Το τέταρτο σημείο (I_x) υπολογίζεται για τάση ίση με το μισό της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc}) και το πέμπτο (I_{xx}) για τάση ίση με το ημίθροισμα της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mp}). Τα πέντε αυτά σημεία παρέχουν τη βασική μορφή της καμπύλης I-V και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μιας καλής προσέγγισης ολόκληρης της καμπύλης I-V σε περιπτώσεις που η τάση λειτουργίας που απαιτείται είναι διαφορετική από τη βέλτιστη (V_{mp})^{xxvii}.

Ακολουθώς θα ορίσουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, την εξάρτηση από την ακτινοβολία, τις φασματικές και οπτικές επιδράσεις, τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς, τη θερμοκρασιακή εξάρτηση και τη θερμοκρασία λειτουργίας πλαισίου, και θα παρουσιάσουμε κάποιες παραδοχές και απλοποιήσεις που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

4.2.3 Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς (Standard Test Conditions, STC)

Ας αρχίσουμε ορίζοντας τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς^{xxviii}. Με στόχο τη δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικών κελιών ή και πάνελ υπό κοινές συνθήκες, έχουν οριστεί οι λεγόμενες Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου, περισσότερο γνωστές ως STC συνθήκες από τα αρχικά των λέξεων Standard Test Conditions.

Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν σε:

- Ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας E_o ίσης προς 1000W/m^2 .
- Θερμοκρασία κελιού T_o ίση προς 25°C .
- Μάζα αέρα AM_a ίση με 1.5

Στις εξισώσεις του μοντέλου μας μοντέλο κάνουμε χρήση κάποιων παραμέτρων οι οποίες έχουν δείκτη μηδέν. Αυτές οι παράμετροι δεν είναι τίποτα άλλο παρά οι τιμές των αντιστοιχων μεταβλητών στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων συμπεριλαμβάνονται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

$$I_{sco} = I_{sc} (E = E_o \text{ W/m}^2, AM_a = 1.5, T_c = T_o, AOI = 0^\circ) \text{ (A)}$$

$$I_{mpo} = I_{mp} (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (A)}$$

$$V_{oco} = V_{oc} (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (V)}$$

$$V_{mpo} = V_{mp} (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (V)}$$

$$I_{xo} = I_x (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (A)}$$

$$I_{xxo} = I_{xx} (E_e = 1, T_c = T_o) \text{ (A)}$$

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στον παράγοντα της θερμοκρασίας κελιού, η οποία είναι συνήθως κατά $25\text{-}30^\circ\text{C}$ υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι συνήθως οι κατασκευαστές παρέχουν και τα δεδομένα ισχύος στις λεγόμενες NOCT συνθήκες (Normal Operating Cell Temperature), οι οποίες αντιστοιχούν σε θερμοκρασία κελιού περί τους $45\text{-}48^\circ\text{C}$ για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C , ένταση ακτινοβολίας 800W/m^2 $AM=1.5$ και ταχύτητα ανέμου 1m/sec . Τα δεδομένα αυτά παρέχουν μία περισσότερο ρεαλιστική εικόνα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλιακά κελιά, αναφορικά με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες.

4.2.4 Παράμετροι σχετικοί με την Ακτινοβολία

Οι παρακάτω παράμετροι συσχετίζουν την τάση και το ρεύμα του πλαισίου και εν συνέπεια τη μορφή της καμπύλης I-V, με την ακτινοβολία. Οι ορισμοί και οι τιμές των συντελεστών αυτών των συντελεστών είναι οι ακόλουθοι:

E_e : Η «ενεργός» ηλιακή ακτινοβολία όπως ορίζεται από την εξίσωση (4.2.7). Η μεταβλητή αυτή περιγράφει το κλάσμα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου στο οποίο ουσιαστικά οι φωτοβολταϊκές κυψέλες αποκρίνονται.

C_0, C_1 : Εμπειρικοί συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα μέγιστης ισχύος (I_{mp}) με την ενεργό ακτινοβολία(E_e). $C_0+C_1=1$ (αδιάστατα). Για το δικό μας πλαίσιο θεωρήσαμε $C_0 = 0,988$ και $C_1 = 0,012$.

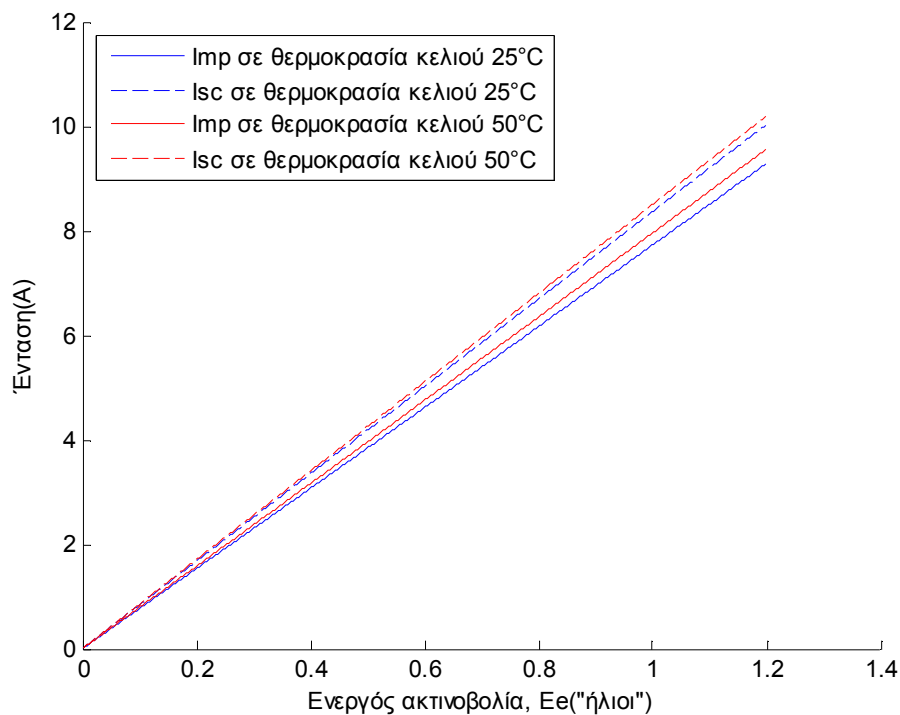
C_2, C_3 : Εμπειρικοί συντελεστές που συσχετίζουν την τάση μέγιστης ισχύος (V_{mp}) με την ενεργό ακτινοβολία(E_e). Το C_2 είναι αδιάστατο και το C_3 έχει μονάδες $1/V$. Για το δικό μας πλαίσιο θεωρήσαμε $C_2 = 0,21$ και $C_3 = -5.48$.

C_4, C_5 : Εμπειρικοί συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα I_x με την ενεργό ακτινοβολία(E_e). $C_4+C_5=1$ (αδιάστατα).

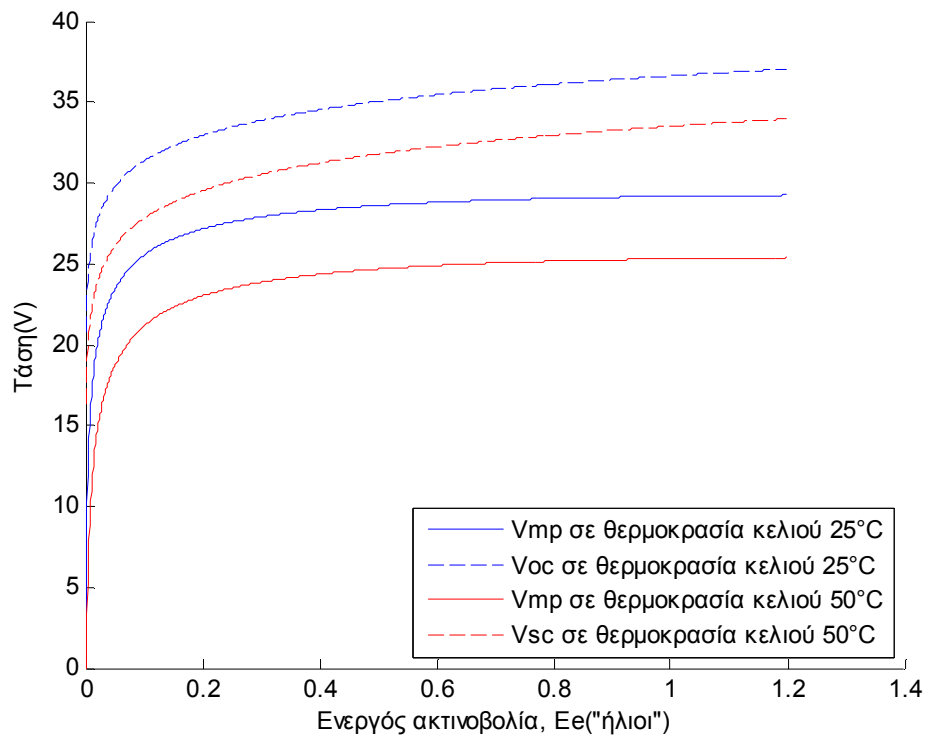
C_6, C_7 : Εμπειρικοί συντελεστές που συσχετίζουν το ρεύμα I_{xx} με την ενεργό ακτινοβολία(E_e). $C_6+C_7=1$ (αδιάστατα)

n = Εμπειρικός «συντελεστής ποιότητας διόδου» που σχετίζεται με τα μεμονωμένα φωτοβολταϊκά κελιά ενός πλαισίου, με τυπική τιμή κοντά στη μονάδα (αδιάστατο). Στα πιο πολλά εμπορικά φωτοβολταϊκά πλαίσια η τιμή του είναι περίπου 1,486.

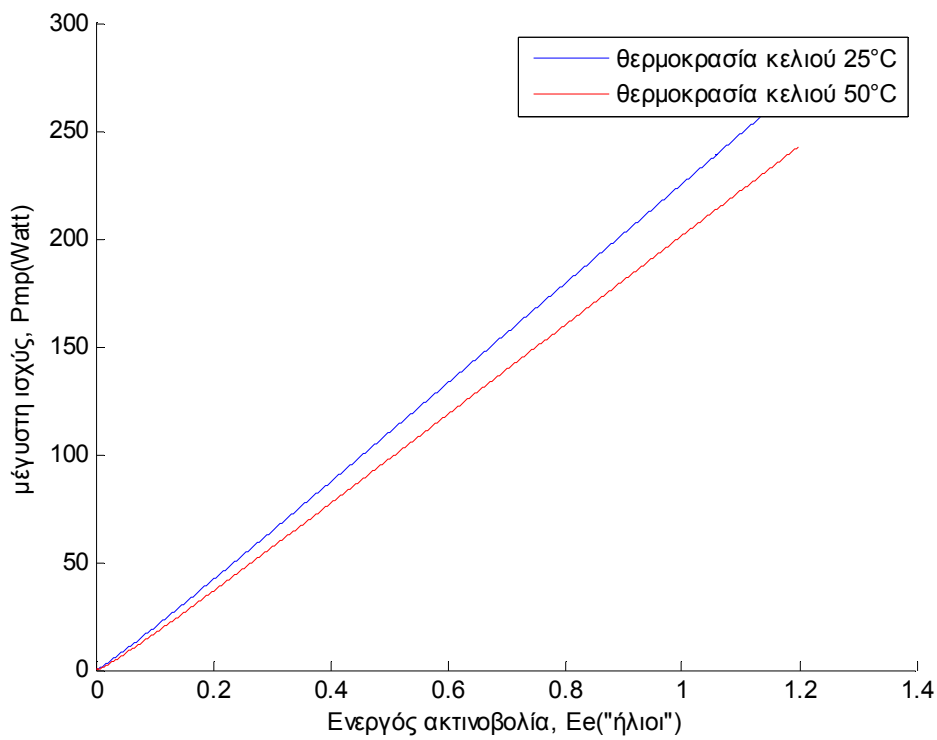
Στις εικόνες 4.8 και 4.9 παρουσιάζουμε την επιρροή που έχει η μεταβολή της ακτινοβολίας στο ρεύμα και την τάση μέγιστης ισχύος και εν συνέπεια στην παραγωγή του φωτοβολταϊκού, εικόνα 4.10. Για σταθερή θερμοκρασία μέσα στις φωτοβολταϊκές κυψέλες 25 και 50 βαθμούς κελσίου βλέπουμε πως μεταβάλλονται τα ρεύματα και οι τάσεις για το δικό μας φωτοβολταϊκό πλαίσιο ESP series60 poly 225w.



Εικόνα 4.8 Μεταβολή ρευμάτων συναρτήσει της ενεργού ακτινοβολίας



Εικόνα 4.9 Μεταβολή τάσεων συναρτήσει της ενεργού ακτινοβολίας



Εικόνα 4.10 Μεταβολή παραγωγής ισχύος συναρτήσει της ενεργού ακτινοβολίας

Μια παρατήρηση που πρέπει να κάνουμε εδώ είναι ότι το ρεύμα και τάση σύμφωνα με τις σχέσεις 4.2.1 έως 4.2.4 αυξάνονται με την αύξηση της ακτινοβολίας, όπως άλλωστε φαίνεται και στα σχήματα, όμως κάτι που δεν έχουμε εξετάσει ως τώρα είναι ότι ελαττώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Βέβαια θεωρήσαμε σταθερή θερμοκρασία κυψέλης οπότε είμαστε καλυμμένοι. Γενικά η θερμοκρασία της κυψέλης αυξάνεται με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό κάτι που θα το παρουσιάσουμε στις επόμενες σελίδες.

4.2.5 Προσδιορισμός της Ενεργού Ακτινοβολίας (E_p)

Ο πρωταρχικός σκοπός στον έλεγχο της απόδοσης και στον προσδιορισμό της I-V καμπύλης είναι ο καθορισμός μιας κατάλληλης τιμής για την “ενεργό ακτινοβολία”, E_e («ήλιους»), διότι μεγαλύτερη πηγή σφαλμάτων στην εκτίμηση της ισχύος σχετίζεται συνήθως με τα όργανα μέτρησης και τη διαδικασία ποσοτικοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν αρκετές πηγές συστηματικών λαθών στα αποτελέσματα των δοκιμών: τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποκρίνονται σε ένα μόνο τμήμα του ηλιακού φάσματος, οι συσκευές μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πιθανό να αποκρίνονται σε όλα τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας ή σε ένα τμήμα παρόμοιο με αυτό των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η γωνία λήψης ακτινοβολίας του πλαισίου μπορεί να διαφέρει σημαντικά από αυτή του ηλιακού αισθητήρα, η απόκριση τόσο του πλαισίου όσο και του αισθητήρα διαφέρουν σημαντικά βάσει της γωνίας πρόσπτωσης και τέλος, ο αισθητήρας και το πλαίσιο μπορεί να έχουν τοποθετηθεί με διαφορετικό προσανατολισμό.

Η έννοια της «ενεργού ακτινοβολίας» παρέχει μία μέθοδο χειρισμού αυτών των συστηματικών επιδράσεων και περιορίζει την αβεβαιότητα που υφίσταται στις διάφορες δοκιμές. Η «ενεργός ακτινοβολία» είναι η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του πλαισίου στην οποία τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ουσιαστικά αποκρίνονται, αφού έχουν ληφθεί υπ’ όψιν οι επιδράσεις του ηλιακού φάσματος, οι οπτικές απώλειες εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης και η ρύπανση των πλαισίων.

Η Sandia National Laboratories προτείνει μερικές διαφορετικές προσεγγίσεις σχετικά με τον προσδιορισμό της ενεργού ακτινοβολίας, όπως την λεπτομερή εργαστηριακή προσέγγιση, απ ευθείας μέτρηση με χρήση ταιριαστού μοντέλου, την απλοποιημένη προσέγγιση με χρήση αισθητήρα και την χρήση προκαθορισμένης χρονοσειράς ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Εμείς λόγω απλότητας και λόγω της φύσης των δεδομένων που διαθέτουμε υπολογίσαμε την ενεργό ακτινοβολία με την απλοποιημένη προσέγγιση με χρήση αισθητήρα. Thermopile-based και photodiode-based πυρανόμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως για μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας κατά την μελέτη απόδοσης φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ιστορικά είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται εργαστηριακά αλλά έχει αρκετά μειονεκτήματα, όπως συμβιβασμοί σχετικά με το κόστος των αισθητήρων, calibration rigor, φασματικοί και οπτικοί παράμετροι εισάγουν σφάλματα τα οποία είναι και δύσκολο να εκτιμηθούν.

Τα Thermopile-based πυρανόμετρα είναι ακριβά και απαιτούν προσεκτικό καλιμπράρισμα. Αυτά τα πυρανόμετρα δέχονται ακτινοβολία από ευρύτερη οπτική γωνία (larger AOI) από ότι τα συνηθισμένα επίπεδα φωτοβολταϊκά πλαίσια, και σε αντίθεση με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες δεν επηρεάζονται από τις φασματικές παραμέτρους του φωτός. Επίσης ένας τέτοιος αισθητήρας δεν μπορεί να ξεχωρίσει πιο μέρος της ακτινοβολίας είναι η άμεση και πιο μέρος είναι η διάχυτη, κάτι που δημιουργεί πρόβλημα στην χρήση της εξίσωσης 4.2.1.

Τα photodiode-based πυρανόμετρα έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν είναι πολύ ακριβά. Σαν αποτέλεσμα, υπάρχουν κυριολεκτικά χιλιάδες στην χρήση για μέτρηση ηλιακής

ακτινοβολίας που σχετίζεται με φωτοβολταϊκά συστήματα. Παρόλα αυτά, έχουν και αυτά μειονεκτήματα. Τα photodiode-based πυρανόμετρα αποκρίνονται διαφορετικά από τα επίπεδα φωτοβολταϊκά πλαίσια από την επιρροή της γωνιάς λήψης της ηλιακής ακτινοβολίας. Όμως πολλά από αυτά αποκρίνονται στα ίδια φάσματα με αυτά των φωτοβολταϊκών κυψελών.

Γενικά η Sandia υποστηρίζει οι μετρήσεις που παίρνουμε από αυτά τα όργανα δεν θα πρέπει να θεωρούνται «ταιριαστές» με την ακτινοβολία που απορροφούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία στην πράξη, και πραγματοποιεί μελέτες σε αυτό τον τομέα για να προτείνει μοντέλα που θα μπορούν να διορθώσουν αυτά τα σφάλματα(εμείς δεν θα επεκταθούμε άλλο σε αυτό). Πάντως παραδέχεται ότι οι στις πιο πολλές μελέτες θεωρεί ότι το Φ/Β απορροφά όλη την ακτινοβολία που έχει μετρήσει το πυρανόμετρο. Έτσι η 4.2.1 απλοποιείται και γίνεται η 4.2.7 ως εξής:

$$I_{sc} = I_{sco} \cdot E_e \{1 + \alpha_{isc} \cdot (T_c - T_0)\} \quad (4.2.11)$$

$$E_e = (E/E_0) \cdot SF \text{ όπου:}$$

E : ηλιακή ακτινοβολία που μέτρησε ο αισθητήρας

E_0 : ακτινοβολία αναφοράς (1000 W/m^2)

SF: 'soiling factor' ή «παράγοντα ρύπανσης», ο οποίος εκτιμά τις αναπόφευκτες απώλειες ρύπανσης όταν γίνεται αναφορά σε πραγματικές συνθήκες εξωτερικού χώρου. Ο παράγοντας SF έχει τιμή ίση με τη μονάδα στην περίπτωση καθαρών συστοιχιών(όπως θεωρήσαμε το δικό μας φωτοβολταϊκό πλαίσιο), ενώ συνήθως είναι μεγαλύτερος από 0,95 εκτός των περιπτώσεων που παρατηρείται αισθητή ρύπανση στη συστοιχία. Κάτι που σημαίνει ξεκάθαρα 5% λιγότερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες^{xxix}.

4.2.6 Παράμετροι Εξαρτώμενοι από τη Θερμοκρασία

Η Sandia National Laboratories προτείνει τη χρήση τεσσάρων ξεχωριστών θερμοκρασιακών συντελεστών είναι σημαντική προκειμένου το μοντέλο απόδοσης να εφαρμόζεται εξίσου καλά σε όλες τις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Θα σκεπτόταν κανείς εσφαλμένα ότι ο θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{oc} μπορεί να εφαρμοστεί και για την V_{mp} , όπως επίσης ότι ο θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα I_{sc} μπορεί να εφαρμοστεί και για το I_{mp} . Οι τέσσερις αυτοί συντελεστές είναι συνήθως διαθέσιμοι από τον κατασκευαστή του πλαισίου, όπως για το δικό μας φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Αν όχι, οι απαιτούμενες παράμετροι μπορούν να αναζητηθούν στην βάση δεδομένων των Sandia. Επιπλέον, το μοντέλο απόδοσης επιτρέπει οι θερμοκρασιακοί συντελεστές για την τάση (V_{oc} και V_{mp}) να μεταβάλλονται με την ηλιακή ακτινοβολία, εάν είναι απαραίτητο, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση συγκεντρωτικών πλαισίων. Ωστόσο για μη συγκεντρωτικά επίπεδα πλαίσια σταθερές τιμές για τους συντελεστές της τάσης είναι γενικά επαρκείς, όπως και θεωρήσαμε και εμείς^{xxx}.

Οι ορισμοί των συντελεστών είναι οι ακόλουθοι:

$\alpha_{I_{sc}}$: Κανονικοποιημένος θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα I_{sc} , ($1/^\circ\text{C}$). Η παράμετρος αυτή “κανονικοποιείται” διαιρώντας τη θερμοκρασιακή εξάρτηση ($A/^\circ\text{C}$) που μετράται για ένα συγκεκριμένο πρότυπο ηλιακό φάσμα και επίπεδο ακτινοβολίας με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς, I_{sco} . Με τη χρήση της συγκεκριμένης μονάδας μέτρησης ($1/^\circ\text{C}$) η ίδια τιμή του συντελεστή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για ανεξάρτητα πλαίσια όσο και για παράλληλες σειρές πλαισίων.

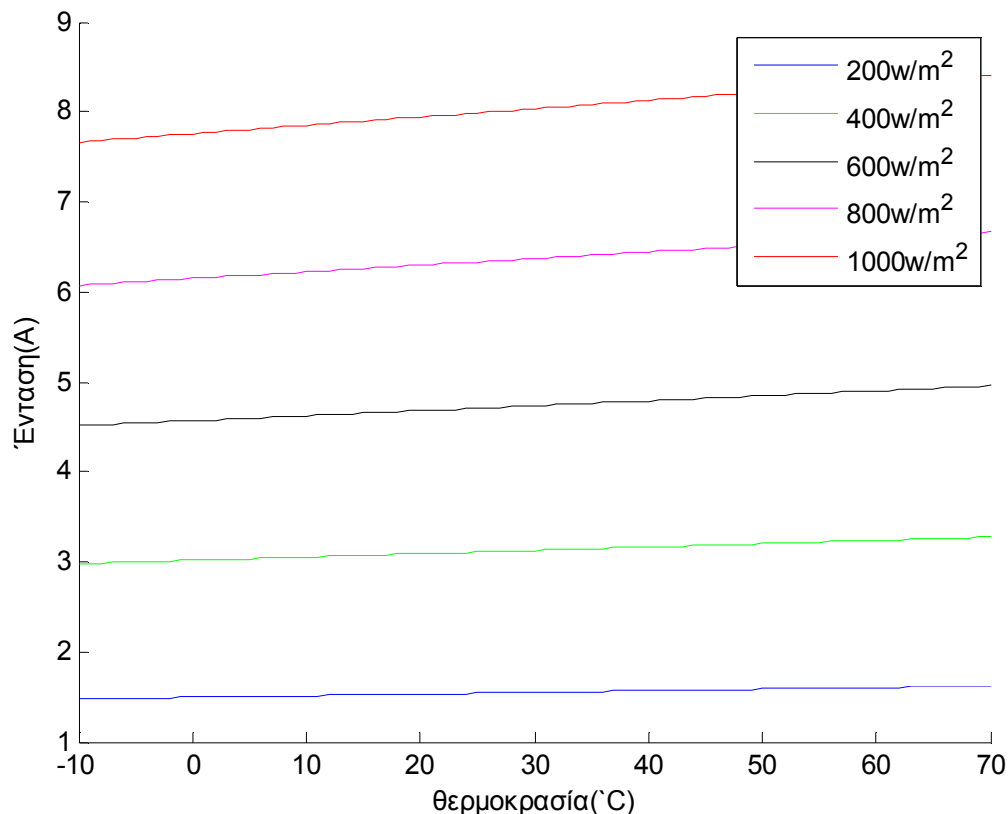
$\alpha_{I_{mp}}$: Κανονικοποιημένος θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα I_{mp} , ($1/^\circ\text{C}$).
Κανονικοποιημένος με τον ίδιο τρόπο όπως το $\alpha_{I_{sc}}$.

$\beta_{V_{oc}}$: Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{oc} του πλαισίου σε επίπεδο ακτινοβολίας 1000 W/m^2 , ($\text{V}/^\circ\text{C}$).

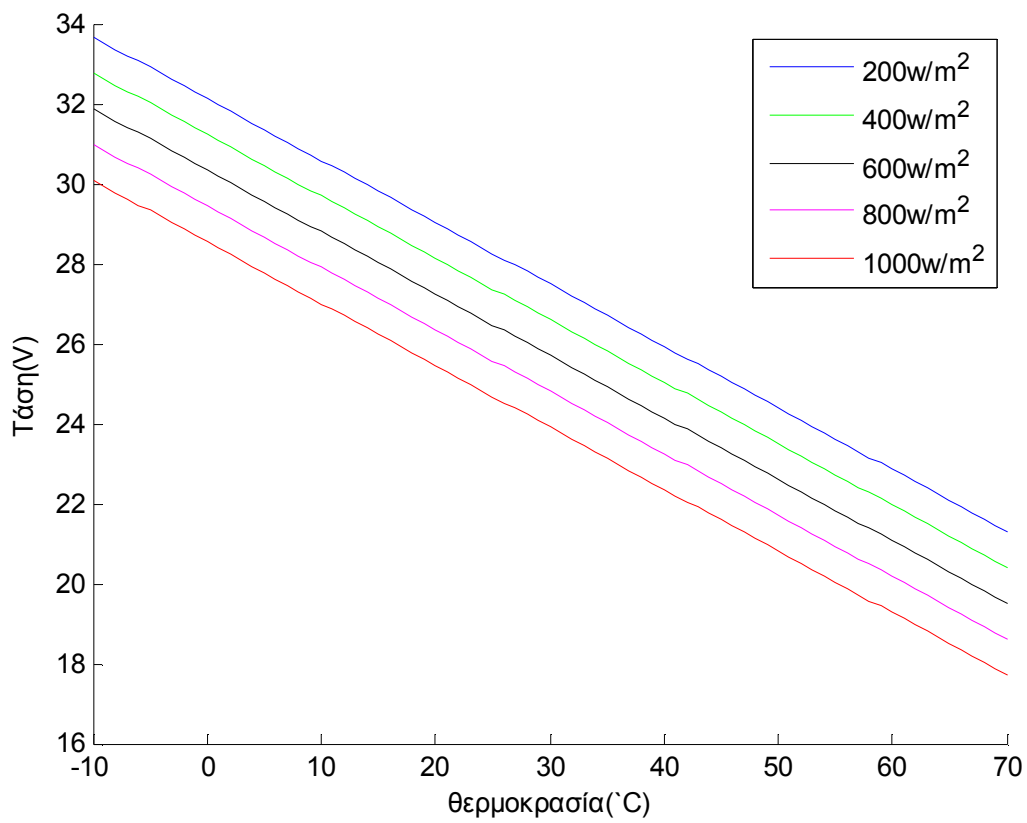
$\beta_{V_{mp}}$:Θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση V_{mp} του πλαισίου σε επίπεδο ακτινοβολίας 1000 W/m^2 , ($\text{V}/^\circ\text{C}$).

4.2.7 Θερμοκρασία Λειτουργίας Πλαισίου

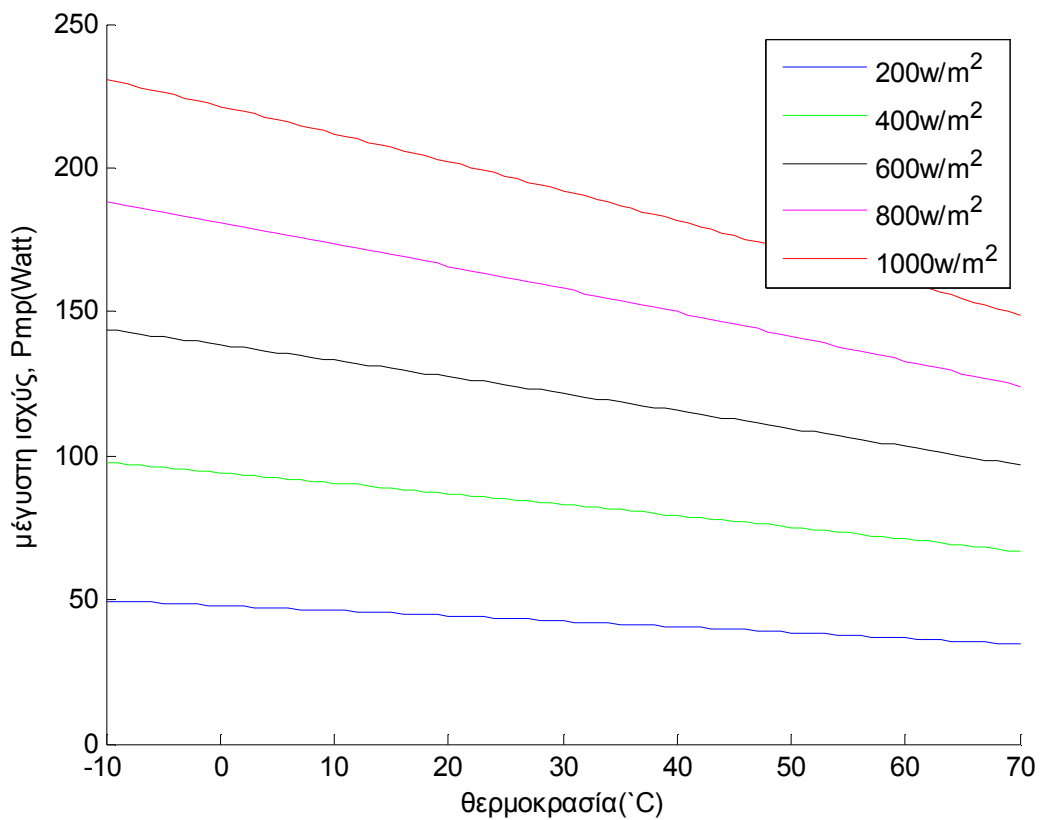
Σύμφωνα με το μοντέλο της Sandia η θερμοκρασία των στοιχείων του πλαισίου παίζει σημαντικό ρόλο στην παράγωγή του. Μπορεί όχι όσο η ακτινοβολία αλλά αρκετά σημαντικό ρόλο ώστε να μας ενδιαφέρει η γνώση της. Στις εικόνες 4.11 και 4.12 παρουσιάζουμε την επιρροή που έχει η μεταβολή της τιμής της θερμοκρασίας στο ρεύμα και την τάση μεγίστης ισχύος και εν συνέπεια στην παραγωγή του φωτοβολταϊκού. Για σταθερή ακτινοβολία 200, 600, 1000 και 1400 watt/m^2 βλέπουμε πως μεταβάλλονται τα ρεύματα και οι τάσεις στο σημείο μεγίστης ισχύος και εν συνέπεια η παραγωγή του φωτοβολταϊκού, εικόνα 4.13, για το δικό μας φωτοβολταϊκό πλαίσιο ESP series60 poly 225w.



Εικόνα 4.11 Μεταβολή ρευμάτων μεγίστης ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας κυψέλης



Εικόνα 4.12 Μεταβολή τάσεων μεγίστης ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας κυψέλης



Εικόνα 4.13 Μεταβολή παραγωγής ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας κυψέλης

Όπως γίνεται κατανοητό κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι απαραίτητη η πρόβλεψη της θερμοκρασίας κυψέλης για την παραγωγή. Επειδή όμως είναι δύσκολο να γνωρίζουμε την θερμοκρασία που επικρατεί μέσα στις φωτοβολταϊκές κυψέλες, απαιτείται ένα θερμοκρασιακό μοντέλο για την εκτίμηση της, βασισμένο σε τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου και κατεύθυνση ανέμου.

Στο θερμοκρασιακό μοντέλο της Sandia (4.2.12 και 4.2.13) γίνεται χρήση μέσων ωριαίων τιμών ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ταχύτητας ανέμου, για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας κυψέλης του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η κατεύθυνση του ανέμου μπορεί να έχει μια μικρή αλλά αξιοσημείωτη επίδραση. Ωστόσο, ενσωματώνοντας την επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου στο θερμοκρασιακό μοντέλο θεωρείται ότι αυτό γίνεται ασκόπως πολύπλοκο. Επομένως, στην παρούσα προσέγγιση, η επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου στη θερμοκρασία λειτουργίας θεωρείται τυχαία. Το μοντέλο αυτό έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε επίπεδα πλαίσια τοποθετημένα με ελεύθερη την πίσω όψη, σε επίπεδα πλαίσια με μονωμένη την οπίσθια επιφάνεια προσομοιώνοντας περιπτώσεις πλαισίων ενσωματωμένα σε κτίρια, καθώς και σε συγκεντρωτικά πλαίσια. Εκτιμά την αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας με ακρίβεια ± 5 °C και αβεβαιότητες αυτής της κλίμακας έχουν σαν αποτέλεσμα σφάλμα μικρότερο του 3% στην ισχύ εξόδου του πλαισίου.

Οι εμπειρικά προσδιορισμένοι συντελεστές (a, b) που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο καθορίζονται χρησιμοποιώντας χιλιάδες μετρήσεις θερμοκρασίας καταγεγραμμένες κατά τη διάρκεια πολλών διαφορετικών ημερών με το πλαίσιο να λειτουργεί σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας (ονομαστικές συνθήκες καθαρού ουρανού χωρίς απότομες θερμοκρασιακές μεταπτώσεις λόγω διαλειπόντων νεφών). Οι συντελεστές αυτοί επηρεάζονται από την κατασκευή του πλαισίου, το είδος της τοποθέτησης (mounting configuration), και την τοποθεσία και το ύψος που μετράται η ταχύτητα του ανέμου.

Η συνήθης μετεωρολογική πρακτική για την καταγραφή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου είναι η τοποθέτηση του οργάνου μέτρησης (ανεμομέτρου) να γίνεται σε ύψος 10m σε περιοχή με μικρό αριθμό κτιρίων ή κατασκευών που εμποδίζουν την κίνηση του αέρα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι αναλύοντας τα δεδομένα μετά την εγκατάσταση του συστήματος, το θερμοκρασιακό μοντέλο μπορεί να “ρυθμιστεί” ανάλογα καθορίζοντας νέους συντελεστές (a, b), οι οποίοι αντισταθμίζουν τις επιδράσεις του περιβάλλοντος χώρου και της θέσης του ανεμομέτρου όταν αυτές διαφέρουν από τις πρότυπες(όμως εμείς δεν επεκτεινόμαστε εδώ).

$T_c = T_m + Ee \cdot \Delta T$ (4.2.12), όπου:

ΔT : Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ στοιχείων και οπίσθιας επιφάνειας σε επίπεδο ακτινοβολίας 1000 W/m².

T_m : Θερμοκρασία πίσω πλευράς πλαισίου που υπολογίζεται με την 4.2.13

$T_m = E \cdot \exp(a + b \cdot WS) + T_a$ (4.2.13), όπου:

T_a : Θερμοκρασία περιβάλλοντος, (°C)

E : Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του πλαισίου, (W/m²)

WS : Ταχύτητα ανέμου στο πρότυπο ύψος 10m, (m/s)

a: Εμπειρικά προσδιορισμένος συντελεστής που θέτει το άνω όριο της θερμοκρασίας πλαισίου σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου και υψηλή ηλιακή ακτινοβολία

b: Εμπειρικά προσδιορισμένος συντελεστής που καθορίζει το ρυθμό πτώσης της θερμοκρασίας πλαισίου καθώς η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται.

Εμπειρικές τιμές για αυτές τις παραμέτρους μπορούμε να βρούμε στον παρακάτω πίνακα που δίνει η Sandia, γνωρίζοντας τον κατασκευαστικό τύπο και τον τρόπο εγκατάστασης του πλαισίου.

Module Type	Mount	a	b	$\Delta T(^{\circ}C)$
Glass/cell/glass	Open rack	-3.47	-0.0594	3
Glass/cell/glass	Close roof mount	-2.98	-0.0471	1
Glass/cell/polymer sheet	Open rack	-3.56	-0.0750	3
Glass/cell/polymer sheet	Insulated back	-2.81	-0.0455	0
Polymer/thin-film/steel	Open rack	-3.58	-0.113	3
22X Linear Concentrator	Tracker	-1.30	-0.130	13

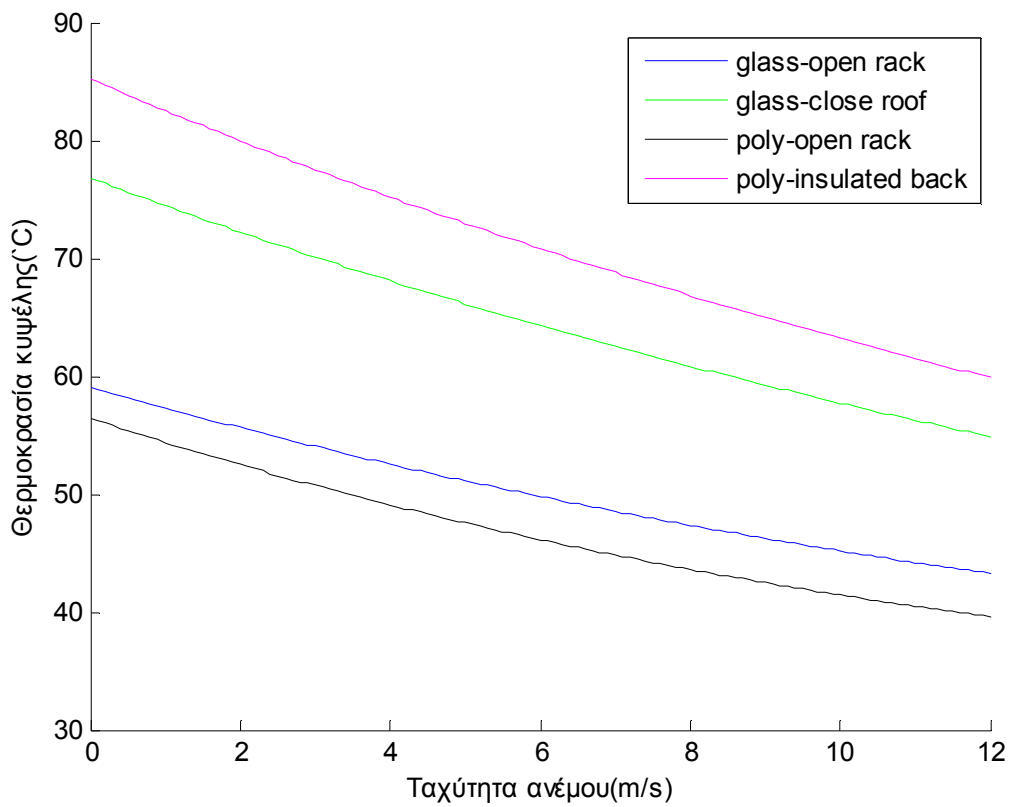
Πινάκας 4.1 Εμπειρικές τιμές για τις παραμέτρους Empirically που χρησιμοποιούμε για να υπολογίζουμε τη θερμοκρασία της πίσω επιφάνειας ενός Φ/Β πλαισίου σαν συναρτήσει της έντασης της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και της ταχύτητας του ανέμου μετρημένη σε 10 μέτρα από την επιφάνεια.

4.2.8 Επιρροή της Ταχύτητας του Άνεμου

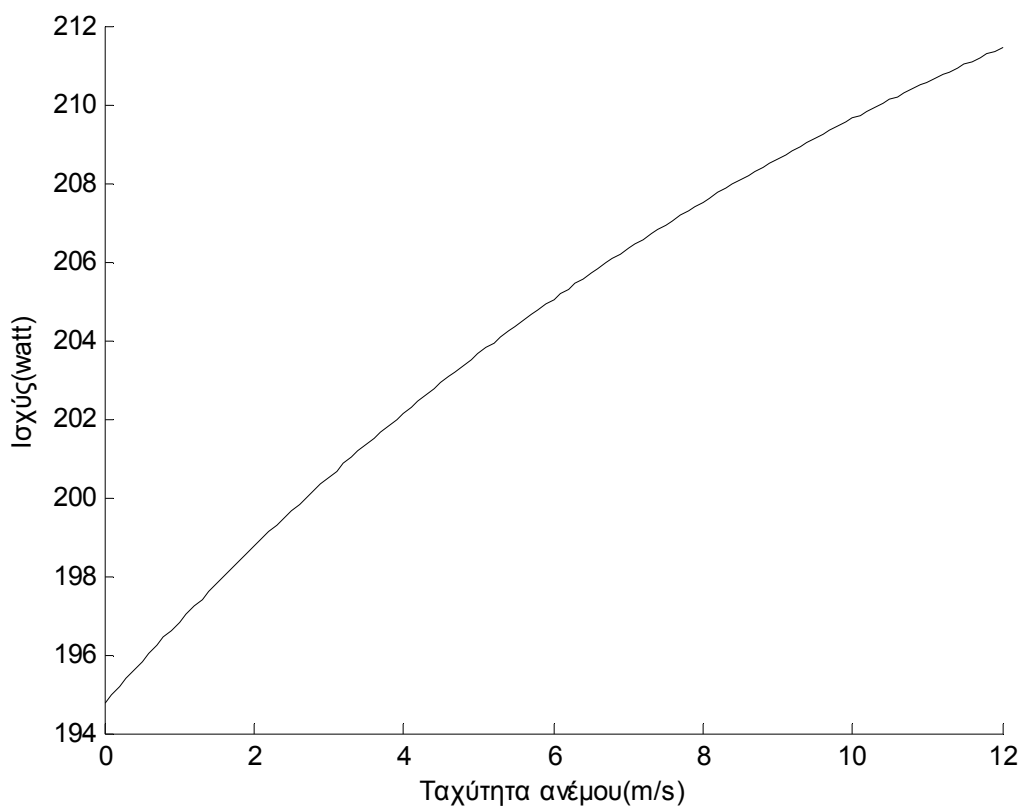
Παρατηρούμε ότι τα πλαίσια που είναι εγκατεστημένα με απόσταση από το δάπεδο εγκατάστασης «αερίζονται» πιο πολύ, δηλαδή κατεβάζουν πιο πολύ την θερμοκρασία τους με την επίδραση του ανέμου. Όσο πιο μακριά από το δάπεδο είναι τοποθετημένο το πλαίσιο τόσο πιο πολύ ο άνεμος το «δροσίζει» (μεγαλύτερα a και b κατά απόλυτη τιμή) και η ακτινοβολία του αυξάνει λιγότερο την θερμοκρασία. Αυτά που έχουν όμως μονωμένη πίσω πλευρά είτε είναι εγκατεστημένα πάνω στο δάπεδο είναι πιο ανθεκτικά στην αύξηση της θερμοκρασίας πίσω επιφάνειας, και σε συνέπεια και θερμοκρασίας κυψέλης, που οφείλεται από την ακτινοβολία (λόγω μικρότερου ΔT). Γενικά πάντως όσο πιο μεγάλη η ταχύτητα του ανέμου τόσο πιο θετικά δρα στην μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου από την ακτινοβολία, οπότε ο άνεμος έχει αντίστροφες επιρροές στην παράγωγη από αυτά που είδαμε σχετικά με την θερμοκρασία.

Στην εικόνα 4.15 βλέπουμε πως η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει την θερμοκρασία κυψέλης για 4 συνδυασμούς κατασκευαστικού τύπου και τρόπου εγκατάστασης πλαισίου, για σταθερή τιμή ηλιοφάνειας 1000w/m^2 και σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος $25^{\circ}C$. Διαπιστώνουμε ότι ο καλύτερος συνδυασμός πίσω επιφάνειας και εγκατάστασης για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι πολυμερές πίσω επιφάνεια και εγκατεστημένο με απόσταση από το δάπεδο.

Στην εικόνα 4.16 βλέπουμε πως η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει την απόδοση του δικού μας φωτοβολταϊκού πλαισίου των 225watt, για σταθερή τιμή ηλιοφάνειας 1000w/m^2 και σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος $25^{\circ}C$. Η ταχύτητα του ανέμου λοιπόν παίζει πάρα πολύ μικρό ρολό στην παράγωγη του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όχι τόσο ασήμαντο ώστε να αγνοηθεί η επιρροή του. Βέβαια συμπεραίνουμε ότι δεν μας ενδιαφέρει να έχουμε πολύ καλή ακρίβεια στην πρόβλεψη.



Εικόνα 4.14 Μεταβολή της θερμοκρασίας κυψέλης συναρτήσει ταχύτητας ανέμου



Εικόνα 4.15 Μεταβολή της παραγωγής του πλαισίου συναρτήσει ταχύτητας ανέμου

4.2.9 Λόγοι που επιλέχτηκε το μοντέλο της Sandia National Laboratories

Το μοντέλο αυτό επιλέχτηκε λόγω της απλότητας στην εφαρμογή και στην μεγάλη ευελιξία που έχει να προσαρμόζεται σε κάθε λογής δεδομένα και φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Το μοντέλο αυτό προσαρμόζεται:

- Στην πιο αναλυτική του μορφή του, απαιτεί να γνωρίζουμε χρονοσειρές ωριαίων μετεωρολογικών δεδομένων, όπως οι τιμές της θερμοκρασίας, της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου, της έντασης άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας και της πίεσης.
- Μια πιο απλή εκδοχή του μοντέλου, την οποία θα υλοποιήσουμε, απαιτεί γνώση μόνο των ωριαίων τιμών θερμοκρασίας, ταχύτητας ανέμου και έντασης ολικής ακτινοβολίας.

Για να προσομοιώσουμε την παραγωγή με οποιοδήποτε από τα παραπάνω μοντέλα απαιτούνται κάποιοι συντελεστές. Οι συντελεστές αυτοί προέρχονται από τα ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού. Τα χαρακτηριστικά αυτά τα, τα βρίσκουμε είτε από τον κατασκευαστή είτε από την βάση δεδομένων που διαθέτει η Sandia, η οποία προέρχεται από πειράματα και μετρήσεις που έχει κάνει πάνω σε πολλά φωτοβολταϊκά συστήματα όπως είπαμε και στην ενότητα 4.2.

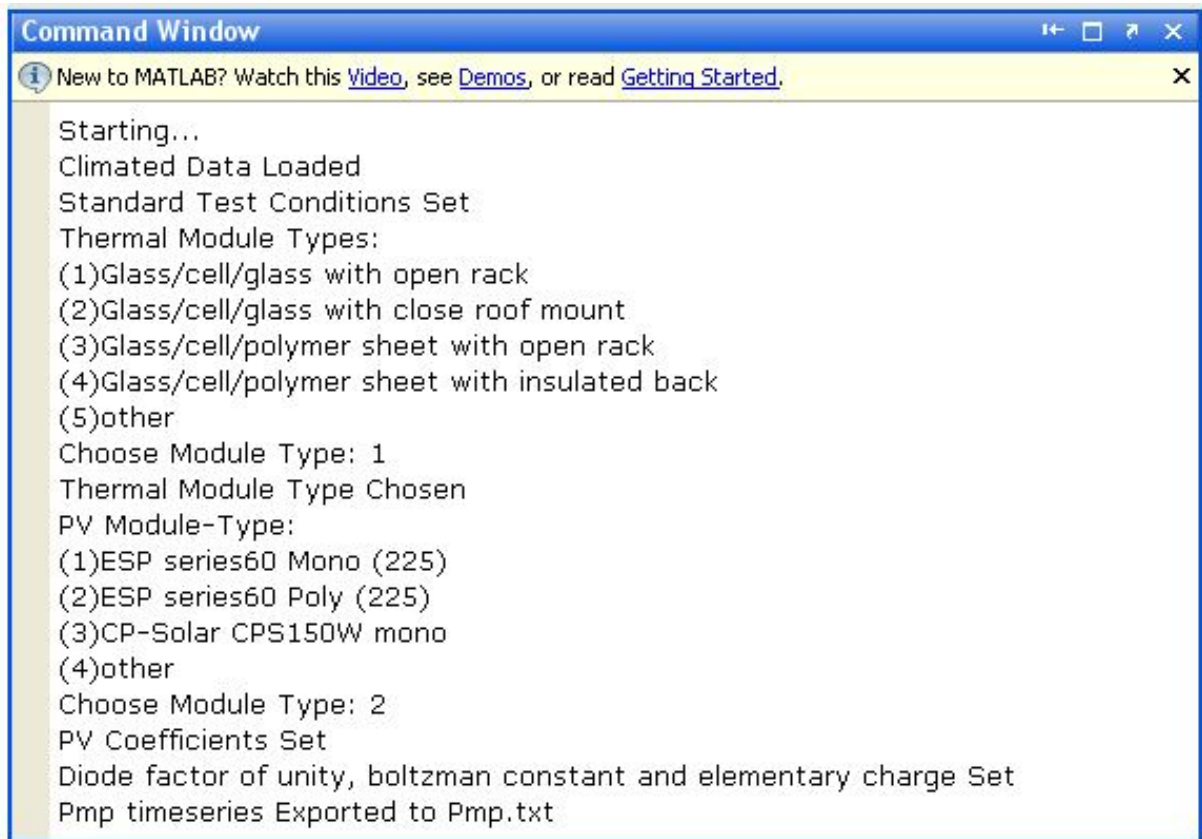
4.3 Υλοποίηση του μοντέλου της Sandia National Laboratories σε Matlab

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε το πώς υλοποιήσαμε το μοντέλο προσομοίωσης ενός Φ/Β συστήματος σε Matlab. Αν και το πρόγραμμα είναι ενιαίο για λόγους απλότητας στην εξήγηση το χωρίζουμε σε 4 μέρη:

- Στο πρόγραμμα αρχικά εισάγουμε αυτόματα τις χρονοσειρές των ωριαίων τιμών της θερμοκρασίας, ταχύτητας ανέμου και έντασης ακτινοβολίας, καθώς και τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς. Αυτές τις χρονοσειρές θα πρέπει να τις έχουμε βάλει στα κατάλληλα .txt αρχεία για να φορτωθούν. Το script αυτό λοιπόν εξάγει αποτελέσματα παραγωγής για κάθε τόπο που μπορεί να είναι εγκατεστημένο το Φ/Β αρκεί να έχει τις κατάλληλες χρονοσειρές σαν εισόδους. Αυτό το script δεν εκτίμα αυτές τις χρονοσειρές, τις παίρνει σαν εισόδους για να εξάγει το τελικό αποτέλεσμα που είναι μια χρονοσειρά τιμών παραγωγής. Άρα θα πρέπει από κάπου να έχουμε μετρήσει ή εκτιμήσει αυτές τις τιμές που αφορούν τον τόπο που είναι εγκατεστημένο το Φ/Β.
- Έπειτα στο πρόγραμμα έχουμε την δυνατότητα να διαλέξουμε έναν από τους τέσσερις τρόπους εγκατάστασης του πλαισίου(πίνακας 4.1) και αυτόματα επιλέγονται η κατάλληλες τιμές σε αντίστοιχους συντελεστές. Αυτή η επιλογή μας, δίνει τιμές σε συντελεστές που έχουν να κάνουν με την επιρροή της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του στην παραγωγή του Φ/Β. Αν θέλουμε κάποια διαφορετική εγκατάσταση από αυτά, το πρόγραμμα μας ζητά να εισάγουμε τους απαραίτητους συντελεστές.
- Δυνατότητα επιλογής μέσα από τρία διαφορετικά μοντέλα Φ/Β πλαισίων. Θα μπορούσαν να υλοποιηθούν περισσότερα, αλλά δεν είναι αυτός ο σκοπός της εργασίας. Όμως, αν θέλουμε κάποιο διαφορετικό πλαίσιο από αυτά που είναι ήδη έτοιμα στις επιλογές, το πρόγραμμα μας ζητά να εισάγουμε έναν-έναν τους

απαραίτητους συντελεστές(εικόνα 4.16). Έχουμε τη δυνατότητα στο πρόγραμμα να εκτιμήσουμε την παραγωγή οποιουδήποτε Φ/Β πλαισίου αρκεί να ξέρουμε να εισάγουμε τους θερμοκρασιακούς, ηλεκτρικούς και μηχανικούς συντελεστές(ενότητα 4.2). Αν θέλουμε να εκτιμήσουμε παραγωγή Φ/Β συστοιχιών και πάρκων τότε με απλούς γραμμικούς υπολογισμούς μπορούμε να αναγάγουμε τα αποτελέσματα.

- Αφού διαλέξουμε τα παραπάνω, το πρόγραμμα φορτώνει και κάποιες σταθερές και μας φτιάχνει την χρονοσειρά των ωριαίων τιμών της παραγωγής(watt) στο workspace και τις εξάγει στο αρχείο Pmp.txt



Εικόνα 4.16 Από το πρόγραμμα κατά την εισαγωγή τρόπου εγκατάστασης του πλαισίου

4.4 Χρήση του μοντέλο της Sandia National Laboratories σε Matlab

Έχουμε λοιπόν υλοποιήσει σε Matlab ένα script, σύμφωνα με τις εξισώσεις που περιγράφουμε στο 4.2-Μοντέλο της Sandia National Laboratories. Όμως για να μας εξάγει το script αποτελέσματα παραγωγής πρέπει να του δώσουμε κάποια μετεωρολογικά δεδομένα και να επιλέξουμε μεταξύ κάποιων επιλογών. Για να δικαιολογήσουμε τις επιλογές μας πρέπει πρώτα από όλα, πρέπει να διαλέξουμε Φ/Β συστήματα, την περιοχή και τον τρόπο που θα κάνουμε την εγκατάσταση του.

4.4.1 Επιλογή Φ/Β Συστήματος

Καταρχήν ως Φ/Β σύστημα προς μελέτη, για απλότητα, στα μεγέθη και στους υπολογισμούς, επιλέξαμε να είναι ένα Φ/Β πλαίσιο μόνο του. Λόγο των δύσκολων καιρών επιλέξαμε ένα Φ/Β πλαίσιο ελληνικής κατασκευής, το ESP series60 Poly 225 της ExelGroup. Έτσι στο σημείο που το πρόγραμμα μας ζητά να διαλέξουμε Φ/Β πλαίσιο, βάζουμε το ESP series60 Poly (225).

Η εταιρία ExelGroup είναι μια ελληνική εταιρία ευρωπαϊκών προδιαγραφών που διαθέτει ένα πρότυπο βιοκλιματικό κτήριο, σαν μονάδα παραγωγής Φ/Β πλαισίων, στη ΒΙ.ΠΕ Σταυροχωρίου στο Κιλκίς και είναι μια από τις μεγαλύτερες επενδύσεις στην Ελλάδα στην πράσινη ενέργεια.^{xxxii}



Εικόνα 4.17 Πρότυπο βιοκλιματικό κτήριο της ExelGroup

Σχετικά με το ESP series60 Poly 225 πλαίσιο (όπως και με όλα) η εταιρία μας δίνει πολλά από τα χαρακτηριστικά του.

Καταρχήν, μας δίνει κάποια ποιοτικά χαρακτηριστικά στοιχεία τα οποία αποτελούν κυρίως διαφήμιση για το πλαίσιο. Από αυτά εμείς κρατάμε δυο, τα οποία θα χρειαστούμε αργότερα:

- Σχεδιασμός πλαισίου με χρήση πολυκρυσταλλικών κυψελών
- Ειδικό γυαλί, για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο και υψηλούς συντελεστές διαπερατότητας της ακτινοβολίας για μεγαλύτερη απόδοση

Δίνει επίσης τις τεχνικές προδιαγραφές, οι οποίες είναι χρήσιμες για μελέτες σχετικά με την εγκατάστασή τους. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν μας αφορούν.

Δίνει ακόμα τα ηλεκτρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και τους θερμοκρασιακούς συντελεστές για όλα τα πλαίσια που βγάζει στην αγορά. Όλα αυτά μας είναι απαραίτητα για το μοντέλο πρόβλεψης και κρατάμε τα ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά και τους θερμοκρασιακούς συντελεστές του ESP series60 Poly 225 πλαισίου.^{xxxii}

4.4.2 Επιλογή Τύπου Εγκαταστάτης του Φ/Β Συστήματος

Επιλέξαμε να εγκαταστήσουμε το Φ/Β μας πλαίσιο στην περιοχή του πολυτεχνείου Κρήτης για να εκμεταλλευτούμε τα μετεωρολογικά δεδομένα που διαθέτουμε από την βάση δεδομένων του πολυτεχνείου για το έτος 2003. Από την βάση δεδομένων διαθέτουμε τρεις χρονοσειρές δεδομένων, τις ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για όλο το έτος του 2003. Η θερμοκρασία μετρήθηκε υπό σκιά, η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος δεκαπέντε μέτρα από το έδαφος (153 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας) και η ένταση της ακτινοβολίας μετρήθηκε με πυρανόμετρο στο οριζόντιο επίπεδο. Αυτές λοιπόν τις 3 χρονοσειρές χρησιμοποιήσαμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας για να εκτιμήσουμε την παραγωγή. Σε πρώτη φάση θεωρώντας ότι είναι γνώστες, ενώ σε δεύτερη φάση θα τις εκτιμήσουμε, κάτι που περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 7.2.

Το υλοποιημένο σε matlab μοντέλο πρόβλεψης της Sandia National Laboratories εξάγει αποτελέσματα παραγωγής για κάθε τόπο που μπορεί να είναι εγκατεστημένο το Φ/Β.

4.4.3 Επιλογή Τρόπου Εγκατάστασης του Φ/Β Συστήματος

Αποφασίσαμε να εγκαταστήσουμε το Φ/Β μας πλαίσιο σε μια ταράτσα ενός κτιρίου του πολυτεχνείου, χωρίς κλίση, οριζόντια, διότι στα δεδομένα μας η ακτινοβολία ήταν μετρημένη στο οριζόντιο επίπεδο, ώστε να μπορούμε να εισάγουμε την χρονοσειρά των τιμών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατευθείαν, χωρίς να πρέπει να υπολογίζουμε E_b (Ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας) και E_{diff} (Διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας), διότι πρακτικά η μέτρηση από το πυρανόμετρο είναι ίση με την ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του πλαισίου. Επίσης διαλέξαμε να κάνουμε εγκατάσταση του Φ/Β πλαισίου με ανοικτή πίσω πλευρά, διότι είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος εγκατάστασης.

Αν θελήσουμε να το χρησιμοποιήσουμε για πρόβλεψη παραγωγής Φ/Β συστημάτων που δεν είναι εγκατεστημένα οριζόντια, ή είναι εγκατεστημένα πάνω σε trackers είναι και αυτό εφικτό αλλά όχι άμεσα. Δεν είναι αναγκαίο να αλλάξουμε το κομμάτι της πρόβλεψης ακτινοβολίας του συνολικού μοντέλου μας. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ίδιο μοντέλο, όμως επειδή, το Φ/Β μοντέλο είναι υλοποιημένο να παίρνει σαν είσοδο την τιμή της ολικής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου θα πρέπει με κάποιο τρόπο να υπολογίσουμε την ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο, δοσμένης της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο οριζόντιο. Θα μπορούσαμε να υλοποιήσουμε ένα ακόμα script, για αυτό το σκοπό, το οποίο θα βασίζει τη λειτουργία του σε σχέσεις από το κεφάλαιο 2.2, όπου περιγράφεται η κίνηση του Ήλιου.

4.4.3.1 Μετατροπή οριζόντιας ακτινοβολίας σε ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου

Το script θα παίρνει σαν εισόδους την χρονοσειρά από τιμές ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (που έχουμε ήδη εκτιμήσει) μαζί με την γωνία και γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που είναι εγκατεστημένο το Φ/Β πλαίσιο και θα εξάγει την χρονοσειρά από τιμές ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Ας δούμε συνοπτικά πως υλοποιείται: Αρχικά υπολογίζουμε την G_{on} , την ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας μετρημένη σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου την n-οστή ημέρα του έτους, σύμφωνα με τη σχέση 2.1,

και τη γωνία ζενίθ Θ_z στο μέσο της αντίστοιχης ώρας σύμφωνα με τη σχέση 2.4, γνωρίζοντας το γεωγραφικό πλάτος ϕ της περιοχής που είναι εγκατεστημένο το πλαίσιο.

Έπειτα μπορούμε να υπολογίσουμε την εκτός γήινης ατμόσφαιρας ωριαία ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (E_{oh}): $E_{oh} = G_{oh} \cdot \cos\Theta_z$ (4.3.1)

Αφού έχουμε υπολογίσει την εκτός γήινης ατμόσφαιρας ωριαία ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (E_{oh}) μπορούμε να υπολογίσουμε τον ωριαίο δείκτη αιθριότητας (K_T), σύμφωνα με τη σχέση 2.9.

Στη συνέχεια με την παρακάτω κλαδική εξίσωση μπορούμε να υπολογίσουμε την διάχυτη συνιστώσα τις ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο:

$$\frac{E_d}{E_{οριζ}} = \begin{cases} 1.0 - 0.09 \cdot K_T, & K_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604 \cdot K_T + 4.388 \cdot K_T^2 - 16.638 \cdot K_T^3 + 12.336 \cdot K_T^4, & 0.22 < K_T \leq 0.80 \\ 0.165, & K_T > 0.80 \end{cases}$$

(4.3.2)

Όταν υπολογίσουμε την διάχυτη συνιστώσα E_d μπορούμε να βρούμε και την ακτινική συνιστώσα E_b στο οριζόντιο επίπεδο, απλά αφαιρώντας την διάχυτη από την ολική, σύμφωνα με της σχέση 2.10.

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της γης αποτελείται από τρεις συνιστώσες, την ακτινική, τη διάχυτη και την ανακλώμενη με κάθε συνιστώσα να πολλαπλασιάζετε με ένα διορθωτικό συντελεστή(σχέση 2.14). Τους διορθωτικούς συντελεστές κάθε συνιστώσας μπορούμε να τους υπολογίσουμε σύμφωνα με τις σχέσεις 2.11, 2.12 και 2.13. Αν γνωρίζουμε και το «γειτονικό» περιβάλλον που είναι εγκατεστημένο το Φ/B , μπορούμε να εκτιμήσουμε καλύτερα τον συντελεστής ανάκλασης, αλλιώς θεωρούμε τη μέση τιμή για την Ελλάδα $\rho = 0.25$.

5. ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ

Τι είναι τα νευρωνικά δίκτυα(TNΔ); Μηχανές που μοιάζουν με τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η έρευνα σχετικά με τα TNΔ είναι βασισμένη στην δομή και τη λειτουργία του εγκεφάλου. Βασικό δομικό στοιχείο του εγκεφάλου είναι οι νευρώνες.

Ως νευρωνικό δίκτυο ορίζεται μια αρχιτεκτονική δομή (δίκτυο) αποτελούμενη από ένα πλήθος διασυνδεδεμένων μονάδων (τεχνητοί νευρώνες). Στην περίπτωση βιολογικών νευρώνων πρόκειται για ένα τμήμα νευρικού ιστού. Στην περίπτωση τεχνητών νευρώνων(προσομοίωση της λειτουργίας των βιολογικών νευρωνικών δικτύων με βάση κάποιο μαθηματικό μοντέλο) πρόκειται για ένα αφηρημένο αλγοριθμικό κατασκεύασμα, όπου στόχος είναι η επίλυση κάποιου υπολογιστικού προβλήματος. Από εδώ και πέρα θα χρησιμοποιούμε την συντομογραφία TNΔ αντί για τεχνητά TNΔ.

Κάθε μονάδα χαρακτηρίζεται από εισόδους και εξόδους και υλοποιεί τοπικά έναν απλό υπολογισμό. Κάθε σύνδεση μεταξύ δυο μονάδων χαρακτηρίζεται από μια τιμή βάρους. Οι τιμές των βαρών των συνδέσεων αποτελούν τη γνώση που είναι αποθηκευμένη στο δίκτυο και καθορίζουν τη λειτουργικότητά του. Η έξοδος κάθε μονάδας καθορίζεται από τον τύπο της μονάδας, τη διασύνδεση με τις υπόλοιπες μονάδες και πιθανώς κάποιες εξωτερικές εισόδους. Πέρα από μια πιθανή δεδομένη (εκ κατασκευής) λειτουργική ικανότητα ενός δικτύου, συνήθως ένα δίκτυο αναπτύσσει μια συνολική λειτουργικότητα μέσω μιας μορφής εκπαίδευσης.^{xxxiii}

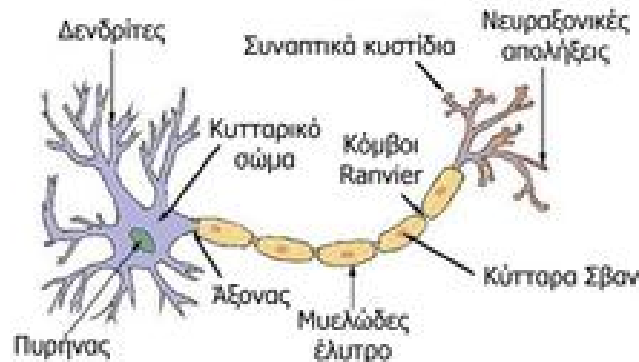
5.1 Ο ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΝΕΥΡΩΝΑΣ

Με τον όρο νευρώνας ορίζουμε το κύτταρο που αποτελεί δομικό μέρος και λειτουργική μονάδα του νευρικού συστήματος. Κάθε νευρώνας αποτελείται από ένα κυτταρικό σώμα (περιλαμβάνει τον πυρήνα και μεγάλο αριθμό οργανιδίων) και από μία ή περισσότερες αποφυάδες. Αυτές ονομάζονται "δενδρίτες" όταν συλλέγουν τα σήματα που στέλνονται στο κύτταρο, και " νευράξονας " όταν μεταδίδει ώσεις από το κυτταρικό σώμα.

Ο Νευράξονας, που ονομάζεται και νευρίτης ή απλά άξονας, είναι μια λεπτή ίνα που μπορεί να είναι μέχρι και δεκάδες χιλιάδες φορές μεγαλύτερη σε μήκος από τη διάμετρο του σώματος. Αυτή η δομή μεταφέρει τα νευρικά σήματα από τον νευρώνα. Κάθε νευρώνας διαθέτει μόνο ένα άξονα, αλλά αυτός ο άξονας μπορεί να διακλαδίζεται έντονα, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η επικοινωνία με πολλά κύτταρα-στόχους. Εκεί που τελειώνει ο άξονας υπάρχουν σημαντικά στοιχεία τα τελικά κομβία που χρειάζονται για την μεταφορά των πληροφοριών προς άλλους δενδρίτες άλλων νευρώνων. Οι περισσότεροι νευράξονες είναι μονωμένοι με έλυτρα μυελίνης.

Οι δενδρίτες είναι σχετικά κοντές διακλαδιζόμενες κυτταρικές προεξοχές ή αποφυάδες. Ο κάθε νευρώνας έχει πολλούς δενδρίτες με πολλές διακλαδώσεις. Αυτές οι δομές αποτελούν το δίκτυο με το οποίο ο νευρώνας προσλαμβάνει σήματα από άλλα κύτταρα. Τα κύματα αυτά φτάνουν στους δενδρίτες του κάθε νευρικού κυττάρου από νευρίτες (έναν ή περισσότερους) άλλων νευρικών κυττάρων. Με τον τρόπο αυτό συνδέονται, διακλαδίζονται και συνεργάζονται μεταξύ τους τα νευρικά κύτταρα, κατά ομάδες, για να επιτελέσουν το σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκαν, τη διάδοση των ερεθισμάτων από την περιφέρεια προς το κέντρο (εγκέφαλο) και το αντίστροφο. Στην άκρη των δενδριτών βρίσκονται τα προσυναπτικά κομβία και οι συνάψεις και από εκεί το κύτταρο λαμβάνει ή μεταδίδει τα σήματα.

Τόσο ο νευράξονας όσο και οι δενδρίτες έχουν τυπικό μέγεθος γύρω στο 1 μm, ενώ το Σώμα είναι γύρω στα 25 μm, όχι πολύ μεγαλύτερο από τον πυρήνα που περιέχει. Ο νευράξονας ενός κινητικού νευρώνα μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 1 μέτρο σε μήκος, συνδέοντας, για παράδειγμα, τη βάση της σπονδυλικής στήλης με τα δάχτυλα των ποδιών.



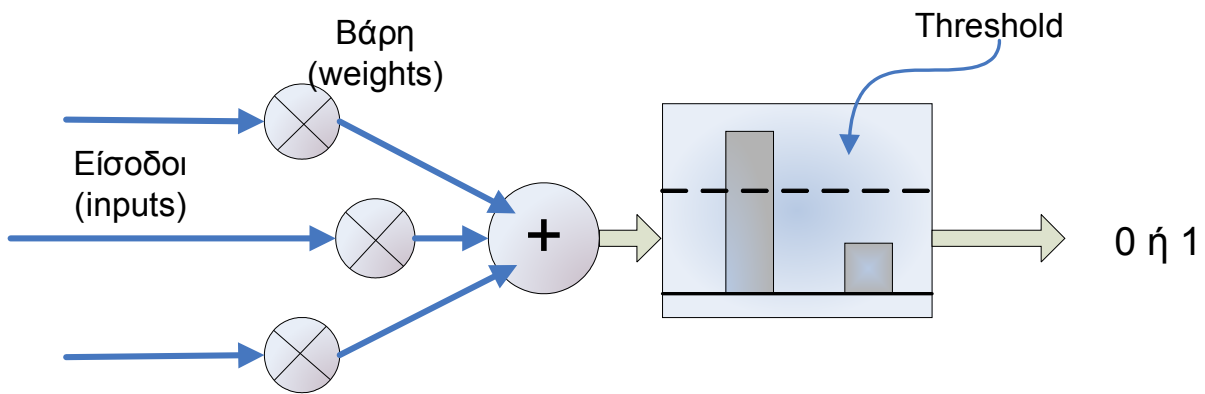
Εικόνα 5.1 Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού βιολογικού νευρώνα

Οι νευρώνες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των συναπτικών συνδέσεων (η άκρη ενός νευράξονα καταλήγει στους δενδρίτες, στο σώμα ή, σπανιότερα στον νευράξονα άλλων νευρώνων). Οι συνάψεις είναι κύστες με ηλεκτροχημικό υλικό, κυρίως ιόντα καλίου και νατρίου (Na^+ , K^+). Η επικοινωνία τους επιτυγχάνεται με χημικό τρόπο με την ταχύτατη έκκριση μορίων νευροδιαβιβαστών. Το προ-συναπτικό νευρωνικό κύτταρο (αυτό που απελευθερώνει το νευροδιαβιβαστή) μπορεί να επάγει στο μετά-συναπτικό κύτταρο (το οποίο προσλαμβάνει το νευροδιαβιβαστή) μια ηλεκτρική διέγερση που θα διαβιβαστεί στο αξονικό λοφίδιο ώστε να δημιουργηθεί ένα δυναμικό ενέργειας το οποίο μετά θα διαβιβαστεί ως ηλεκτρική διέγερση κατά μήκος του νευράξονα.

Κατά την άφιξη στην απόληξη του νευράξονα, θα προκληθεί απελευθέρωση του νευροδιαβιβαστή στο συναπτικό κενό. Οι νευροδιαβιβαστές γενικά μπορεί είτε να προκαλέσουν διέγερση είτε να εμποδίσουν τη διέγερση του κυττάρου-στόχου. Το δυναμικό ενέργειας θα παραχθεί στο κύτταρο-στόχο αν τα μόρια του νευροδιαβιβαστή που δρουν στους μετά-συναπτικούς υποδοχείς οδηγήσουν το κύτταρο-στόχο στο να φτάσει τον ουδό πυροδότησής του.

5.2 Ο ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΝΕΥΡΩΝΑΣ

Ο νευρώνας είναι μια θεμελιακή μονάδα επεξεργασίας πληροφορίας η οποία αποτελείται από τρία στοιχεία: ένα σύνολο κλάδων διασύνδεσης (συνάψεων), έναν κόμβο άθροισης (γραμμικής άθροισης) και μια συνάρτηση ενεργοποίησης (μη γραμμικότητα). Κάθε κλάδος διασύνδεσης έχει ένα βάρος (weight) το οποίο είναι θετικό αν η σύναψη είναι διεγερτικού τύπου και αρνητικό αν η σύναψη είναι ανασταλτικού τύπου. Ο κόμβος άθροισης αθροίζει τα σήματα εισόδου πολλαπλασιαζόμενα με τα αντίστοιχα βάρη των συνάψεων. Συνεπώς ο κόμβος άθροισης είναι μια μονάδα γραμμικού συνδυασμού. Τέλος η συνάρτηση ενεργοποίησης (ή συνάρτηση σύνθλιψης / squashing function) περιορίζει (συνθλίβει) το επιτρεπόμενο πλάτος του σήματος εξόδου σε κάποια πεπερασμένη τιμή (συνήθως στο κανονικοποιημένο διάστημα $[0,1]$ ή εναλλακτικά στο $[-1,1]$). Το μοντέλο του νευρώνα περιέχει επίσης ένα κατώφλι θ που εφαρμόζεται εξωτερικά και πρακτικά υποβιβάζει την καθαρή είσοδο στη συνάρτηση ενεργοποίησης.



Εικόνα 5.2 Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού τεχνητού νευρώνα

Ο νευρώνας περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

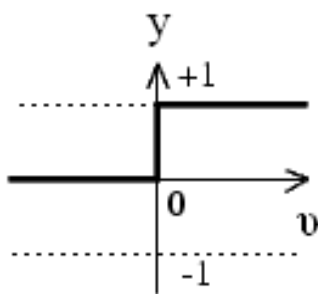
$$u = \sum_{j=1}^n w_j x_j \quad (5.1)$$

$$y = f(u - \theta), \theta > 0 \quad (5.2)$$

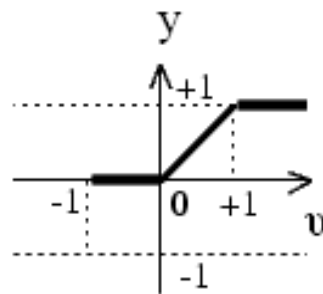
όπου x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) είναι τα σήματα εισόδου, w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) είναι τα συναπτικά βάρη του νευρώνα, u είναι η έξοδος του αθροιστή, θ είναι το κατώφλι, $f(\cdot)$ είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης και y είναι το σήμα εξόδου του νευρώνα. **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης αξίζει να μελετηθούν λίγο αναλυτικότερα και μάλιστα μια συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να έχει μια από τις παρακάτω μορφές: xxxiii

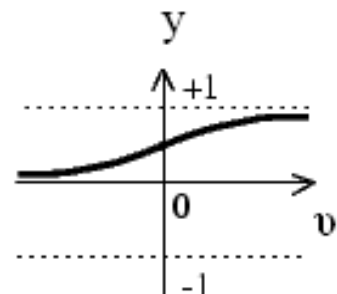
- Συνάρτηση λογικής κατωφλίου (threshold/hard limiter function)
- Κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση (piecewise linear function)
- Συνεχής σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoid/S-shape function)



Λογική κατωφλίου
(α)



Κατά τμήματα γραμμική
(β)



Σιγμοειδής συνάρτηση
(γ)

Εικόνα 5.3 Τρεις βασικές συναρτήσεις ενεργοποίησης στο διάστημα [0,1]

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης ορίζονται ακολούθως:

Συνάρτηση κατωφλίου

$$f(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Και μόνο σε αυτή την περίπτωση το νευρωνικό δίκτυο είναι γνωστό ως νευρωνικό δίκτυο τύπου McCulloch – Pitts, TLU.

Κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση

$$f(u) = \begin{cases} 0, & u \leq -1/2 \\ u, & -1/2 < u < 1/2 \\ 1, & u \geq 1/2 \end{cases} \quad (5.4)$$

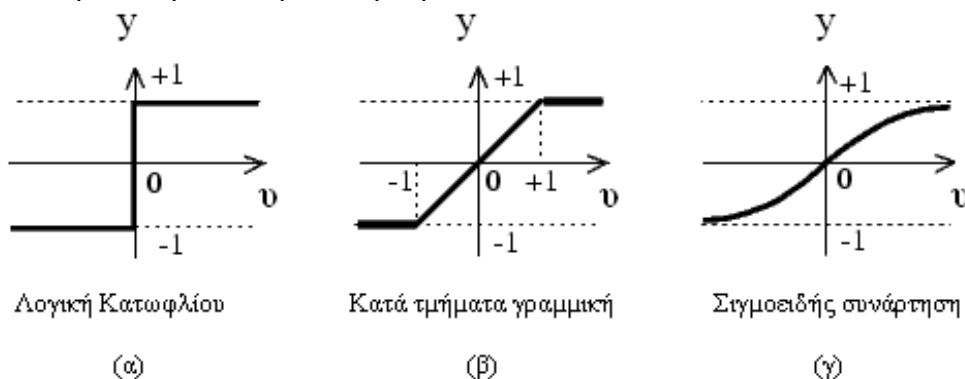
Η συνάρτηση αυτή παριστά ένα γραμμικό ενισχυτή με κορεσμό και μεταπίπτει στη συνάρτηση κατωφλίου αν η απολαβή γίνει πάρα πολύ μεγάλη.

Σιγμοειδής Συνάρτηση

Η σιγμοειδής συνάρτηση είναι η πιο εύρωστα διαδεδομένη συνάρτηση ενεργοποίησης και μπορεί να ορισθεί με πολλούς τρόπους. Ένας από αυτούς είναι με τη παρακάτω λογιστική συνάρτηση, όπου λ είναι η παράμετρος κλίσης είναι της σιγμοειδούς συνάρτησης:

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda \cdot u}} \quad (5.5)$$

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης που περιγράψαμε παίρνουν τιμές από 0 μέχρι 1 αλλά εκτός από αυτές μπορούν να μεταφερθούν και στο διάστημα [-1, 1]. Η μαθηματική τους διατύπωση και η σχηματική αναπαράσταση είναι η παρακάτω.



Εικόνα 5.4 Τρεις βασικές συναρτήσεις ενεργοποίησης στο διάστημα [-1,1]

Συνάρτηση κατοφλίου

$$f(u) = \begin{cases} -1, & u < 0 \\ 0, & u = 0 \\ +1, & u > 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

Κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση

$$f(u) = \begin{cases} -1, & u \leq -1 \\ u, & -1 < u < 1 \\ +1, & u \geq +1 \end{cases} \quad (5.7)$$

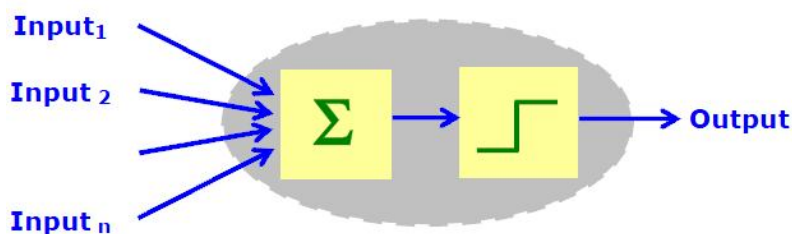
Σιγμοειδής συνάρτηση

$$f(u) = \tanh(u/2) = \frac{1 - e^{-u}}{1 + e^{-u}} \quad (5.8)$$

5.2.1 Ιστορική Αναδρομή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων^{xxxiv}

Η μελέτη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, υποκινήθηκε από την αναγνώριση ότι οι «εγκεφαλικοί υπολογιστές» είναι διαφορετικοί από τους ψηφιακούς υπολογιστές. Τυπικά οι νευρώνες του εγκεφάλου είναι 5-6 τάξεις μεγέθους αργότεροι από τις λογικές πύλες σιλικόνης. Παρόλα αυτά, ο εγκέφαλος οργανώνει τους νευρώνες ώστε να εκτελεί συγκεκριμένους υπολογισμούς πιο γρήγορα από τους πιο γρήγορους ψηφιακούς υπολογιστές. Ο εγκέφαλος είναι ένας πολύπλοκος, μη-γραμμικός και παράλληλος υπολογιστής. Κατά τη γέννησή του ο εγκέφαλος κατασκευάζει τους δικούς του κανόνες, “εμπειρία”, η οποία μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου. Τα ΤΝΔ αποτελούν μια προσπάθεια προσέγγισης της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου, εκπαιδεύονται με τη βοήθεια παραδειγμάτων, έτσι ώστε να μαθαίνουν το περιβάλλον τους.

Η μελέτη των ΤΝΔ, ξεκίνησε τις τελευταίες δεκαετίες αλλά η μεγάλη ώθηση δόθηκε μετά το 1980. Η μοντέρνα περίοδος των ΤΝΔ λέγεται ότι άρχισε με την πρωτοποριακή δουλειά των McCulloch και Pitts, το 1943 όταν αυτοί ανέπτυξαν το πρώτο μοντέλο νευρωνικού δικτύου^{xxxv}.



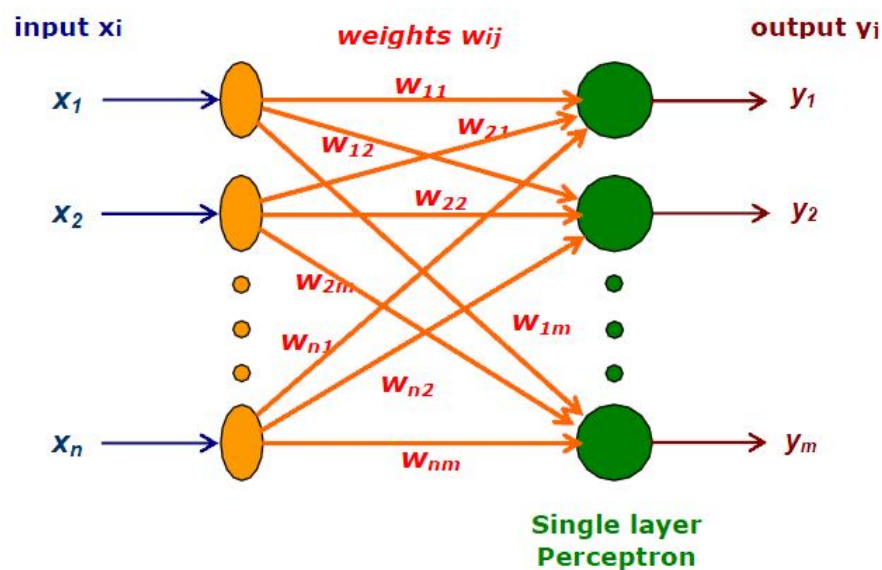
Εικόνα 5.5 Σχηματικό διάγραμμα ενός McCulloch και Pitts νευρώνα

Η επόμενη μεγάλη ανάπτυξη πάνω στα ΤΝΔ, ήρθε το 1949 με την έκδοση του βιβλίου του Hebb με τίτλο “The Organization of Behavior”^{xxxvi}, στο οποίο μια ιδιαίτερη

δήλωση ενός φυσιολογικού κανόνα μάθησης για συναπτικές τροποποιήσεις έγινε για πρώτη φορά. Πιο συγκεκριμένα ο Hebb πρότεινε ότι η συνδετικότητα του εγκεφάλου συνεχώς αλλάζει καθώς ο οργανισμός μαθαίνει διάφορες εργασίες, και ότι οι νευρωνικοί συγκεντρωτές δημιουργούνται από τέτοιες αλλαγές. Επίσης πρότεινε το διάσημο αίτημα μάθησης σύμφωνα με το οποίο η αποτελεσματικότητα μιας σύναψης μεταβλητής ανάμεσα σε δύο νευρώνες αυξάνεται από την επαναλαμβανόμενη ενεργοποίηση του ενός νευρώνα από τον άλλο κατά μήκος της σύναψης.

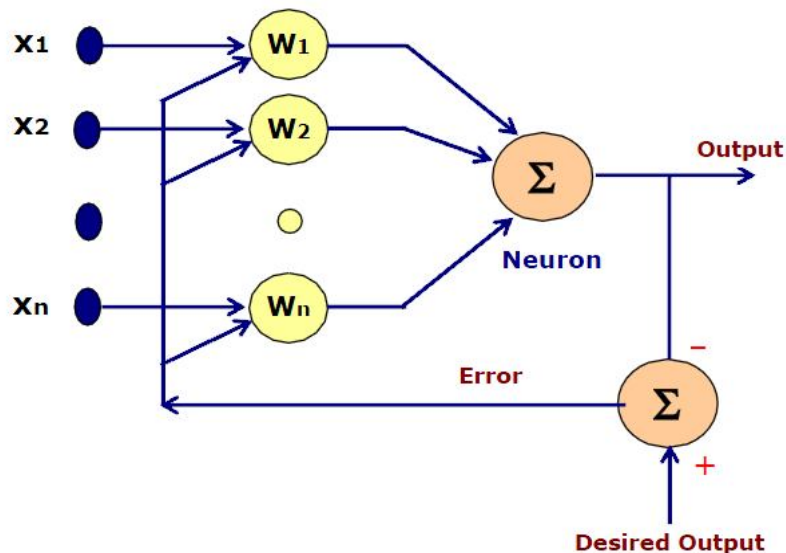
Το 1956 χρησιμοποιώντας την ιδέα του πλεονασμού ο Von Neumann λύνει το σημαντικό πρόβλημα, ενδιαφέροντος για τα ΤΝΔ, της σχεδίασης ενός αξιόπιστου δικτύου με νευρώνες που μπορούν να θεωρηθούν σαν μη αξιόπιστα στοιχεία.

Το 1958 μια νέα προσέγγιση πάνω στο πρόβλημα της αναγνώρισης προτύπων έγινε από τον Rosenblatt στην εργασία του πάνω στο αισθητήριο (perceptron). Το ιδιαίτερο επίτευγμα του ήταν το αποκαλούμενο θεώρημα σύγκλισης αισθητηρίου (perceptron convergence theorem).



Εικόνα 5.6 Σχηματικό διάγραμμα ενός perceptron μοντέλου

Το 1960 οι Widrow και Hoff πρότειναν τον αλγόριθμο ελάχιστου μέσου τετραγώνου (Least Mean-Square, LMS) και τον χρησιμοποίησαν για να σχηματίσουν το Adaline (adaptive linear element). Η διαφορά ανάμεσα στο αισθητήριο και στο Adaline βρίσκεται στον τρόπο μάθησης. Ένα από τα από τα πρόσφατα εκπαιδευσιμα ΤΝΔ με πολλαπλά στοιχεία είναι η δομή Madaline (Widrow).

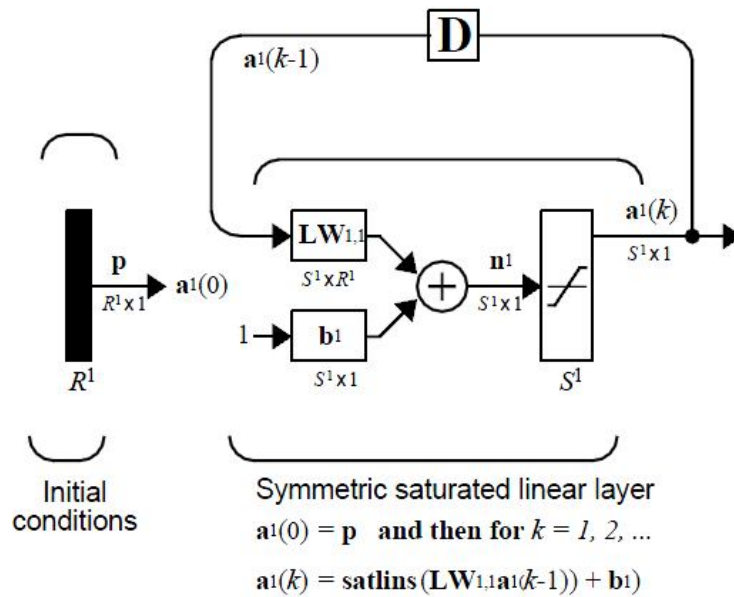


Εικόνα 5.7 Σχηματικό διάγραμμα Adaline μοντέλου

Κατά την διάρκεια της κλασικής περιόδου του perceptron ('60) πιστευόταν ότι τα ΤΝΔ μπορούσαν να κάνουν τα πάντα. Αλλά τότε εκδόθηκε το βιβλίο των Minsky και Papert που με μαθηματικά απέδειξε ότι υπάρχουν όρια πάνω στο τι μπορεί να υπολογιστεί από τα αισθητήρια^{xxxvii}.

Το 1980 έγιναν πολλές εργασίες πάνω στην θεωρία αλλά και στον σχεδιασμό των νευρωνικών δικτύων. Ο Grossberg (1980) ανέπτυξε μια καινούργια αρχή αυτοοργάνωσης που συνδυάζει φιλτράρισμα από “κάτω προς τα πάνω” και αντίθετη αύξηση σε μικρή μνήμη με από “πάνω προς τα κάτω” ταίριασμα προτύπων και σταθεροποίηση του κώδικα μάθησης. Αυτό το φαινόμενο δίνει την βάση για μια νέα κατηγορία ΤΝΔ γνωστά σαν adaptive resonance theory (ART).

Το 1982 ο Hopfield έδειξε με μαθηματική απόδειξη πώς ένα ΤΝΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικός χώρος (storage device) και πώς μπορεί να επανακτήσει όλη την πληροφορία ενός συστήματος αν του δοθούν μερικά τμήματα μόνο και όχι ολόκληρο το σύστημα. Αυτή η δουλειά του άνοιξε τον δρόμο για ένα κατακλυσμό θεωριών για τα ΤΝΔ. Αυτή η συγκεκριμένη τάξη νευρωνικών δικτύων με ανατροφοδότηση χρήστηκε ιδιαίτερης προσοχής το '80 και με το χρόνο έγιναν γνωστά σαν δίκτυα Hopfield.



Εικόνα 5.8 Σχηματικό διάγραμμα δικτύου Hopfield

Το 1983 οι Cohonen και Grossberg έδωσαν μια νέα αρχή για σχεδίαση μιας διευθυνσιοδοτούμενης μνήμης (content-addressable memory) που περιλαμβάνει την έκδοση συνεχούς χρόνου του δικτύου Hopfield σαν μια ιδιαίτερη περίπτωση. Το 1983 επίσης οι Kirkpatrick, Gallat και Vecchi περιέγραψαν μια νέα διαδικασία που λέγεται εξομοιωμένη απόπτηση για λύση προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Η εξομοιωμένη απόπτηση χρησιμοποιείται στην στατιστική θερμοδυναμική και βασίζεται σε μια απλή τεχνική. Την ίδια χρονιά εκδόθηκε μια εργασία από τους Burto, Sutton και Anderson πάνω στην ενισχυμένη μάθηση, η οποία δημιούργησε μεγάλο ενδιαφέρον πάνω στην ενισχυμένη μάθηση και την εφαρμογή της.

Το 1986 οι McClelland και Rumelhart, στο «Parallel Distributed Processing» προτείνουν μία νέα διαδικασία εκπαίδευσης, την μέθοδο της οπισθοδιάδοσης (back-propagation). Το 1985 έχουμε τα πρώτα συνέδρια και περιοδικά σε ΤΝΔ, ειδικές επαγγελματικές εταιρίες νευρωνικών δικτύων.

Το 1988 ο Linsker περιέγραψε μια νέα αρχή για την αυτοοργάνωση σε ένα δίκτυο αισθητηρίων. Η αρχή αυτή σχεδιάστηκε ώστε να διατηρεί μέγιστη πληροφορία σχετικά με την με τα πρότυπα ενεργειών, που υπόκεινται σε περιορισμούς όπως συναπτικές συνδέσεις και δυναμικές περιοχές σύναψης. Ο Linsker χρησιμοποίησε αφηρημένες έννοιες πάνω στη θεωρία πληροφοριών ώστε να σχηματίσει τη αρχή της διατήρησης μέγιστης πληροφορίας. Επίσης το 1988 οι Broomhead και Lowe περιέγραψαν μία διαδικασία για το σχεδιασμό “προς τα εμπρός τροφοδότησης” (feedforward) ΤΝΔ χρησιμοποιώντας συναρτήσεις ακτινικής βάσης (RBF), που είναι μια εναλλαγή των πολυεπίπεδων αισθητηρίων.

Το 1989 εκδόθηκε το βιβλίο του Mead με τίτλο “VLSI and Neural Systems”^{xxxviii}. Αυτό το βιβλίο δίνει μια ασυνήθιστη μίξη περιεχομένων από την νευροβιολογία και την τεχνολογία VLSI.

Τα ΤΝΔ έχουν σίγουρα διανύσει πολύ δρόμο από την εποχή των McCulloch και Pitts. Δεν είναι αναγκαίο να πούμε ότι είναι εδώ για να μείνουν και θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται σε θεωρία, σχεδιασμό και εφαρμογές^{xxxix}.

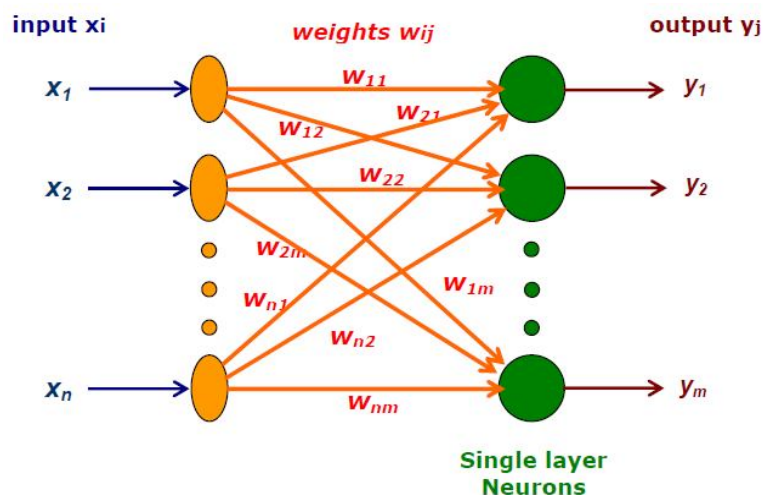
5.3 Αρχιτεκτονικές ΤΝΔ

Η αρχιτεκτονική του ΤΝΔ αφορά στις διασυνδέσεις των νευρώνων. Οι δυο βασικές ιδιότητες που καθορίζουν την αρχιτεκτονική ενός δικτύου είναι το πλήθος των στρωμάτων (layers) και ο τρόπος μετάδοσης του παλμού. Το τρίτο χαρακτηριστικό, το οποίο σχετίζεται φυσιολογικά με τον τρόπο κατά τον οποίο είναι δομημένοι οι νευρώνες, είναι ο αλγόριθμος μάθησης που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου.

5.3.1 Τρόπος Μετάδοσης Παλμού

Εμπρός Τροφοδοτούμενα ΤΝΔ (feed forward neural networks)

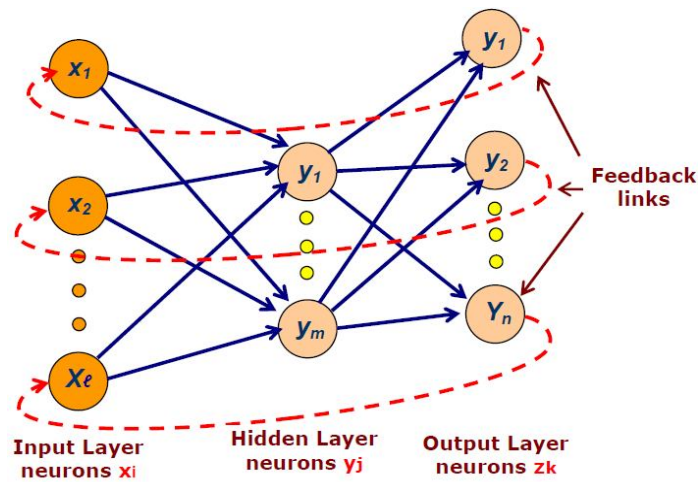
Σαν εμπρός τροφοδότησης, αναφέρονται τα ΤΝΔ, στα οποία τα σήματα κατευθύνονται από την είσοδο στην έξοδο. Δηλαδή κάθε επίπεδο νευρώνων δέχεται εισόδους μόνο από τα προηγούμενα επίπεδα νευρώνων. Έτσι η ροή πληροφορίας είναι μονόδρομη.



Εικόνα 5.9 Εμπρός-τροφοδοτούμενο ΤΝΔ

Ανατροφοδοτούμενα ΤΝΔ (Recurrent Neural Networks)

Όταν οι εξοδοι κάποιων νευρώνων, γίνονται εισοδοι σε νευρώνες προηγούμενων επιπέδων, τότε έχουμε ανάδραση. Τα ανατροφοδοτούμενα ΤΝΔ έχουν ένα τουλάχιστον βρόχο με ανάδραση, δηλαδή νευρώνες μεγαλύτερων επιπέδων τροφοδοτούν είτε νευρώνες του ίδιου επιπέδου είτε νευρώνες προηγούμενων επιπέδων (ακόμα και νευρώνας μπορεί να ανατροφοδοτεί τον ίδιο). Τα ΤΝΔ αυτά παρατηρείται ότι έχουν κάποιου είδους «μνήμης». Αυτό ενδιαφέρει την μελέτη μας, διότι η πρόβλεψη με ΤΝΔ έχει να κάνει με μνήμη παρόμοιας συμπεριφοράς παλαιότερων περιπτώσεων.

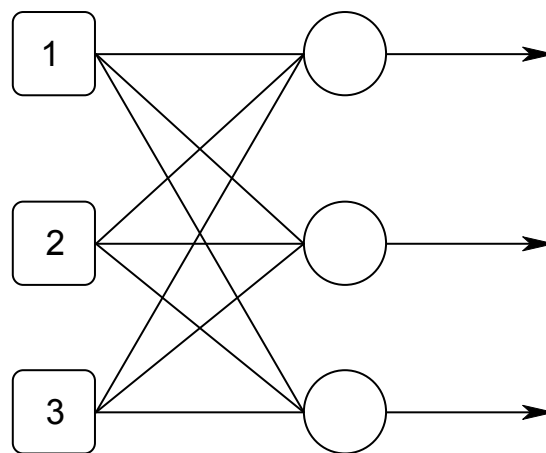


Εικόνα 5.10 Ανατροφοδοτούμενο ΤΝΔ

5.3.2 Επίπεδα Νευρώνων

ΤΝΔ ενός επιπέδου (Single layer FeedForward Networks)

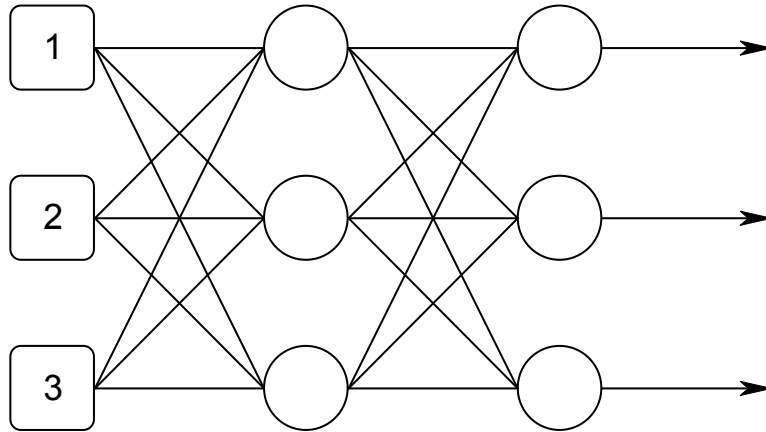
Είναι τα πιο απλά ΤΝΔ. Έχουν μόνο ένα επίπεδο νευρώνων στους οποίους εφαρμόζουμε τα σήματα εισόδου



Εικόνα 5.11 ΤΝΔ ενός επιπέδου

ΤΝΔ πολλών επιπέδων (Multilayer FeedForward Networks)

Τα ΤΝΔ στα οποία μεταξύ των επιπέδων εισόδου και εξόδου υπάρχουν κρυμμένα επίπεδα . Τα κρυμμένα επίπεδα προσδίδουν ευελιξία στο δίκτυο και μπορούν να παράγουν υψηλότερου επιπέδου στατιστικές, καθιστώντας το χρήσιμο ιδιαίτερα όταν το μέγεθος του επιπέδου είναι μεγάλο



Εικόνα 5.12 ΤΝΔ πολλών επιπέδων

5.3.3 Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης ΤΝΔ

Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης Με Επίβλεψη (supervised learning)

Τα ΤΝΔ αυτά τροφοδοτούνται με παραδείγματα εισόδων και τις αντίστοιχες εξόδους. Η διαδικασία της μάθησης περιλαμβάνει την προσαρμογή των βαρών με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ της εξόδου του δικτύου και της πραγματικής εξόδου. Τέτοια ΤΝΔ είναι τα perceptron, ADALINE και τα δίκτυα ακτινικής βάσης. xxxiv

Οι παράμετροι του δικτύου ανανεώνονται με βάση τόσο το διάνυσμα εκπαίδευσης όσο και το σήμα σφάλματος (δηλαδή της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής απόκρισης $y(t)$ και της επιθυμητής απόκρισης $y_d(t)$ του δικτύου). Ορίζοντας μια τετραγωνική συνάρτηση κόστους:

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} E[(y(t) - y_d(t))^2] \quad (5.9)$$

όπου \mathbf{w} είναι το διάνυσμα των προς επιλογή (ελεύθερων) παραμέτρων του συστήματος μάθησης (δηλαδή του ΤΝΔ), η ανανέωση / προσαρμογή των παραμέτρων παίρνει την μορφή του αλγόριθμου διόρθωσης σφάλματος που θα δούμε στην επόμενη ενότητα 5.5. Δυο περιπτώσεις αλγόριθμων επιβλεπόμενης μάθησης είναι ο αλγόριθμος Ελαχίστου Μέσου Τετραγώνου (Least Mean Square, LMS) και η γενίκευση του που είναι γνωστή ως Αλγόριθμος Ανάστροφης Διάδοσης (Back Propagation, BP).

Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης Χωρίς Επίβλεψη (unsupervised learning)

Τα ΤΝΔ αυτά τροφοδοτούνται μόνο με τις εισόδους και η έξοδος προκύπτει μέσω ομαδοποίησης ομοειδών δεδομένων. Πρακτικά το μόνο που χρειάζεται ένα ΤΝΔ μη επιβλεπόμενης μάθησης είναι να συντονισθεί στις στατιστικές ομαλότητες των δεδομένων εισόδου και μετά να μπορέσει να δημιουργήσει εσωτερικές παραστάσεις για την κωδικοποίηση των ιδιοτήτων εισόδου και να παράγει αυτόματα νέες κατηγορίες. Η εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη έχει περισσότερες ομοιότητες με το μοντέλο μάθησης βιολογικών συστημάτων.

Αλγόριθμοι Εκπαίδευσης Με Ενισχυτική Μάθηση (reinforced learning)

Στον τύπο αυτό μάθησης, το ΤΝΔ τροφοδοτείται και πάλι με δειγματικά πρότυπα εισόδου αλλά δεν τροφοδοτείται με τις επιθυμητές αποκρίσεις σε αυτές τις εισόδους. Εδώ χρησιμοποιείται ένα συνολικό μέτρο της επάρκειας της προκύπτουσας απόκρισης (δείκτης συμπεριφοράς) το οποίο μπορεί να οδηγήσει το δίκτυο στην επιθυμητή συμπεριφορά. Το μέτρο αυτό είναι γνωστό ως ενισχυτικό σήμα (reinforcement signal) και ανατροφοδοτείται στο ΤΝΔ έτσι ώστε να επιβραβεύσει (reward) τις ορθές συμπεριφορές και να τιμωρήσει (penalize) τις λανθασμένες.

Η ενισχυτική μάθηση στηρίζεται στο νόμο του Thorndike που λέει ότι «Αν μια ενέργεια ενός συστήματος μάθησης ακολουθείται από μια ικανοποιητική κατάσταση ή συμπεριφορά, τότε η τάση του συστήματος αυτού να παράγει τη συγκεκριμένη ενέργεια ενισχύεται (ενδυναμώνεται). Διαφορετικά, η τάση του συστήματος να παράγει την ενέργεια αυτή εξασθενείται».

Συνοπτικά, η ενισχυτική μάθηση λειτουργεί ως εξής: Το ΤΝΔ υπολογίζει τις εξόδους που παράγονται από την παρούσα είσοδο με τις παρούσες τιμές των βαρών. Το σύστημα αξιολογεί την έξοδο και το ενισχυτικό σήμα τροφοδοτείται στο δίκτυο. Τα βάρη ανανεώνονται με βάση το ενισχυτικό σήμα αυξάνοντας τις τιμές των βαρών που συνέβαλαν σε καλή συμπεριφορά ή μειώνοντας τις τιμές αυτών που προκάλεσαν κακή συμπεριφορά. Το δίκτυο ψάχνει να βρει ένα σύνολο βαρών τα οποία τείνουν να αποφύγουν αρνητικά ενισχυτικά σήματα.

Η διαφορά ανάμεσα στην ενισχυτική και την επιβλεπόμενη μάθηση είναι ότι στην ενισχυτική μάθηση το σύστημα μάθησης βελτιώνεται χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο συμπεριφοράς οι τιμές του οποίου δίνονται από το περιβάλλον, ενώ στην επιβλεπόμενη μάθηση το κριτήριο συμπεριφοράς (συνάρτηση τετραγωνικού σφάλματος) καθορίζεται εσωτερικά με βάση τις επιθυμητές αποκρίσεις (στόχους).

5.4 Μάθηση ΤΝΔ

Το κύριο χαρακτηριστικό των ΤΝΔ είναι η εγγενής ικανότητα μάθησης. Ως μάθηση μπορεί να οριστεί η σταδιακή βελτίωση της ικανότητας του δικτύου να επιλύει κάποιο πρόβλημα (π.χ. η σταδιακή προσέγγιση μίας συνάρτησης). Η μάθηση επιτυγχάνεται μέσω της εκπαίδευσης, μίας επαναληπτικής διαδικασίας σταδιακής προσαρμογής των παραμέτρων του δικτύου (συνήθως των βαρών και της πόλωσής του) σε τιμές κατάλληλες ώστε να επιλύεται με επαρκή επιτυχία το προς εξέταση πρόβλημα. Αφού ένα δίκτυο εκπαιδευτεί, οι παράμετροί του συνήθως «παγώνουν» στις κατάλληλες τιμές και από εκεί κι έπειτα είναι σε λειτουργική κατάσταση. Το ζητούμενο είναι το λειτουργικό δίκτυο να χαρακτηρίζεται από μία ικανότητα γενίκευσης: αυτό σημαίνει πως δίνει ορθές εξόδους για εισόδους καινοφανείς και διαφορετικές από αυτές με τις οποίες εκπαιδεύτηκε.

Αλγόριθμος μάθησης ή εκπαίδευσης είναι κάθε προκαθορισμένο σύνολο καλά ορισμένων κανόνων επίλυσης του προβλήματος μάθησης (ή εκπαίδευσης) του ΤΝΔ. Γενικά, υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι εκπαίδευσης στα ΤΝΔ, καθένας από τους οποίους έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, προσφέροντας έναν άλλο τρόπο προσαρμογής (επιλογής / ανανέωσης) των βαρών. Ένα άλλο θέμα το οποίο πρέπει να ληφθεί υπ' όψη κατά τη σχεδίαση ΤΝΔ είναι το περιβάλλον στο οποίο εργάζεται κάθε δίκτυο. Έτσι, διαφορετικά μοντέλα του περιβάλλοντος οδηγούν σε διαφορετικά παραδείγματα μάθησης, όπως αναφέραμε πριν στην ενότητα 5.4.xxiv

5.4.1 ΜΑΘΗΣΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Στον τύπο αυτό μάθησης η απαιτούμενη ανανέωση (αλλαγή, προσαρμογή) των συναπτικών βαρών υπολογίζεται παρουσιάζοντας στο ΤΝΔ δεδομένα πρότυπα (διανύσματα) εισόδου, συγκρίνοντας τις προκύπτουσες αποκρίσεις με τις (από πριν δοσμένες / a-priori) επιθυμητές αποκρίσεις και ακολούθως αλλάζοντας τα βάρη προς την κατεύθυνση μείωσης του σφάλματος. Συγκεκριμένα έστω:

$d_k(t)$: η επιθυμητή έξοδος (απόκριση στόχου) του k νευρώνα στη διακριτή χρονική στιγμή t

$x(t)$: το διάνυσμα εισόδου (ερεθισμού) που εφαρμόζεται στο στρώμα εισόδου του ΤΝΔ

$y_k(t)$: η πρακτικά λαμβανόμενη απόκριση του k νευρώνα

Προφανώς το ζεύγος $(x(t), d_k(t))$ αποτελεί ένα παράδειγμα που παρουσιάζεται στο νευρώνα κατά τη χρονική στιγμή t . Το σφάλμα (διαφορά) μεταξύ της επιθυμητής εξόδου $d_k(t)$ και της πραγματικής εξόδου $y_k(t)$ είναι:

$$e_k(t) = d_k(t) - y_k(t) \quad (5.10)$$

Το πρόβλημα μάθησης (εκπαίδευσης) είναι τώρα: «Να επιλεγούν τα συναπτικά βάρη των νευρώνων έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα».

Ο κανόνας μάθησης («κανόνας δέλτα») ο οποίος βασίζεται στη διόρθωση του σφάλματος είναι τότε:

$$\Delta w_{kj}(t) = \gamma \cdot e_k(t) \cdot x_j(t) \quad (5.11)$$

όπου $\Delta w_{kj}(t)$ είναι η ποσότητα αλλαγής (προσαρμογής, ανανέωσης) στο χρόνο t του συναπτικού βάρους w_{kj} και γ είναι μια θετική σταθερά η οποία καθορίζει το ρυθμό μάθησης (learning rate). Η ανανεωμένη (νέα) τιμή $w_{kj}(t+1)$ του θεωρούμενου συναπτικού βάρους δίνεται από τη σχέση:

$$w_{kj}(t+1) = w_{kj}(t) + \Delta w_{kj}(t) \quad (5.12)$$

Για

το ξεκίνημα του κανόνα μάθησης χρειαζόμαστε τη γνώση κάποιων αρχικών τιμών για τα βάρη στη χρονική στιγμή $t = 0$. Αν το ΤΝΔ περιέχει μόνο γραμμικά στοιχεία επεξεργασίας τότε ο αλγόριθμος οδηγεί βήμα – προς – βήμα στο ολικό ελάχιστο. Όταν όμως το ΤΝΔ περιέχει μη γραμμικότητες, τότε το ολικό ελάχιστο δεν μπορεί να ληφθεί πάντα γιατί ο αλγόριθμος μπορεί να εγκλωβισθεί σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.

Επιπλέον, λόγω του ότι η μάθηση διόρθωσης σφάλματος συμπεριφέρεται σαν σύστημα κλειστής αναδρομής πρέπει να επιλεγεί με πολύ προσοχή η τιμή του ρυθμού μάθησης γ ώστε να εξασφαλισθεί η σταθερότητα της διαδικασίας. Αυτό γιατί ο ρυθμός μάθησης έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση της μεθόδου και επιδρά όχι μόνο στην ταχύτητα σύγκλισης της μάθησης αλλά και στην ίδια την κατάληξή της. Αν το γ έχει μικρή τιμή η διαδικασία προχωρά ομαλά αλλά μπορεί να πάρει πολύ χρόνο στο σύστημα να συγκλίνει σε σταθερή λύση. Αντίθετα, αν η τιμή του γ είναι μεγάλη η πορεία της μάθησης επιταχύνεται αλλά υπάρχει κίνδυνος η διαδικασία να αποκλίνει και το σύστημα να γίνει ασταθές.

5.5 Ταξινόμηση ΤΝΔ

Εδώ παραθέτουμε τα πιο δημοφιλή ΤΝΔ:

- ADALINE (Adaptive Linear Neural Element)
- ART (Adaptive Resonance Theory)
- AM (Associative Memory)
- BAM (Bidirectional Associative Memory)
- Boltzmann Machines

- BSB (Brain state in a box)
- Cauchy Machines
- Hopfield Networks
- LVQ (Learning Vector Quantization)
- Neocognition
- Perceptron
- RBF (Radial Basis Function)
- RNN (Recurrent Neural Network)
- SOFM (Self-organizing Feature Map)

Έπειτα στο παρακάτω πινάκα τα κατηγοριοποιούμε με βάση την αρχιτεκτονική και την μέθοδο εκπαίδευσης.

		Μέθοδοι Μάθησης			
		Καθόδου	Χεββιανή	Ανταγωνιστική	Στοχαστική
Αρχιτεκτονικές ΤΝΔ	Ενός-επιπέδου Εμπρός-τροφοδοτούμενα	ADALINE, Hopfield, Perceptron	AM, Hopfield	LVQ, SOFM	
	πολλών επιπέδων- εμπρός-τροφοδοτούμενα	CCM, MLFF, RBF	Neocognition		
	Ανατροφοδοτούμενα	RNN	BAM, BSB, Hopfield	ART	Boltzman, Cauchy Machines

Εικόνα 5.13 Κατηγοριοποίηση ΤΝΔ με βάση την αρχιτεκτονική και την μέθοδο εκπαίδευσης.

5.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τα ΤΝΔ είναι εφαρμόσιμα σχεδόν σε κάθε κατάσταση στην οποία ισχύει μια σχέση μεταξύ μεταβλητών πρόβλεψης (ανεξάρτητες, εισροές) και προβλεπόμενες μεταβλητές (εξαρτημένες, εκροές), ακόμα και όταν αυτή η σχέση είναι πολύ περίπλοκη για να αποδοθεί με τους συνηθισμένους όρους της «συσχέτισης» ή των «διαφόρων ομάδων». Ενδεικτικά αντιπροσωπευτικά παραδείγματα προβλημάτων στα οποία η ανάλυση των νευρωνικών δικτύων έχει εφαρμοστεί με επιτυχία είναι τα εξής:

- Επεξεργασία εικόνας και μηχανική όραση (π.χ. ταίριασμα εικόνας, προ-επεξεργασία, κατάτμηση, ανάλυση, συμπίεση εικόνας και επεξεργασία χρονικά μεταβαλλόμενων εικόνων).^{xi}
- Επεξεργασία σήματος (π.χ. ανάλυση και μορφολογία σεισμικού σήματος).
- Αναγνώριση προτύπων (π.χ. εξαγωγή χαρακτηριστικών, ανάλυση και κατηγοριοποίηση σήματος radar, αναγνώριση φωνής, κειμένου, χειρονομιών και πιστοποίηση ταυτότητας)^{xii}.
- Ιατρική (π.χ. ανάλυση ηλεκτροκαρδιογραφήματος, ιατρική διάγνωση και επεξεργασία ιατρικής εικόνας).^{xiii}
- Αμυντικά συστήματα (π.χ. υποβρύχια ανίχνευση ναρκών).
- Οικονομία (π.χ. ανάλυση αγοράς μετοχών, ασφάλεια συναλλαγών, εκτίμηση φερεγγυότητας δανειζόμενου πελάτη, εκτίμηση ακίνητης περιουσίας).

- Σχεδίαση, έλεγχος και αναζήτηση (π.χ. παράλληλη υλοποίηση NP-πλήρων προβλημάτων, αυτόματος έλεγχος, ρομποτική).
- Τεχνητή νοημοσύνη (π.χ. υλοποίηση έμπειρων συστημάτων).
- Δυναμικά εξελισσόμενα συστήματα, πρόβλεψη χρονοσειρών (π.χ. εκτίμηση κατάστασης συστήματος, ανίχνευση βλαβών και ανάκαμψη).
- Επικοινωνία ανθρώπου – υπολογιστή.

5.6.1 Εφαρμογές στον Τομέα της Ενέργειας

Τα ΤΝΔ είναι μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται ευρέως στο τομέα της ενέργειας για πρόβλεψη φορτίου από τη δεκαετία του '70 και παραγωγής ΑΠΕ^{xliii} μια δεκαετία αργότερα.

Παραλλαγές διαφόρων ΤΝΔ είτε αυτόνομα είτε ως υβριδικές μέθοδοι που λαμβάνοντας υπ' όψιν παραμέτρους όπως το φορτίο προηγούμενων ημερών και ωρών, μετεωρολογικές πληροφορίες έχουν χρησιμοποιηθεί για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου, όπως ενδεικτικά παρουσιάζουν οι εργασίες^{xliv}, ^{xlvi} για ένα σύστημα, είτε για επιμέρους κόμβους του ^{xlvi}.

Συγκριτική παρουσίαση μεθόδων πρόβλεψης φορτίου που χρησιμοποιούν ΤΝΔ, από εργασίες δημοσιευμένες σε επιστημονικά περιοδικά της περιόδου 1991-1999, γίνεται σε δυο μελέτες ^{xlix}, ¹. Τα διάφορα μοντέλα ΤΝΔ που μελετώνται κατηγοριοποιούνται με βάση τον αριθμό των εισόδων τους, την αρχιτεκτονική και τη συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιούν καθώς και τον αριθμό των παραμέτρων τους. Παρουσιάζονται επίσης οι διάφορες τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία ΤΝΔ για το σκοπό αυτό και επισημαίνεται η ανάγκη για επαρκή αποτίμηση της επίδοσης των μοντέλων αυτών με συστηματικό τρόπο και όχι απλά η παρουσίαση μέσω τετραγωνικών μέσων σφαλμάτων. Αναφέρουμε ονομαστικά και άλλες εφαρμογές:

- Πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας θερμοκηπίου. Σε αυτή τη μελέτη έχουμε 2 επίπεδα ΤΝΔ. Στο πρώτο επίπεδο γίνεται πρόβλεψη θερμοκρασίας και υγρασίας και στο δεύτερο γίνεται πρόβλεψη κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας^{li}.
- Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας και Φ/Β παράγωγης με χρήση ΤΝΔ^{lii}. Σε αυτή την πτυχιακή εργασία, που με αφορμή της ξεκινήσαμε τη δική μας, γίνεται πρόβλεψη έντασης ηλιακής ακτινοβολίας με ΤΝΔ και στη συνέχεια χωρίς να γίνεται εκτίμηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου, με χρήση του μοντέλου της Sandia National Laboratories, υπολογίζεται η τελική πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής πλαισίου με MAPE 4-12% κατά για τις ώρες με παραγωγή.
- Υπολογισμός παραγωγής Φ/Β με χρήση ΤΝΔ με εκ των προτέρων γνώση μετεωρολογικών δεδομένων. Σε αυτή τη μελέτη γίνεται χρήση ΤΝΔ για την δημιουργία ενός μοντέλου, που υπολογίζει την παραγωγή Φ/Β πλαισίων με γνώση των μετεωρολογικών δεδομένων αλλά χωρίς γνώση εξισώσεων λειτουργίας Φ/Β^{liiii}.
- Πρόβλεψη χρονοσειρών ηλιακής ακτινοβολίας με χρήση ΤΝΔ. Σε αυτή τη μελέτη γίνεται πρόβλεψη έντασης ηλιακής ακτινοβολίας από παρελθοντικές και μόνο τιμές της.^{liv}
- Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου με χρήση ΤΝΔ και μετασχηματισμού κυματιδίων (wavelet transformation). Σε αυτή τη μελέτη η χρονοσειρά του φορτίου αποσυντίθεται σε υπο-χρονοσειρές, με το μετασχηματισμό κυματιδίων. Πρόβλεψη των επιμέρους υπό-χρονοσειρές έγινε με ΤΝΔ και έπειτα έγινε επανασύνδεση των επιμέρους υπό-χρονοσειρών για την τελική πρόβλεψη^{lv}.
- Προβλέψεις με χρήση ΤΝΔ δεν γίνονται μόνο στο φορτίο και στα Φ/Β, συναντάμε και στο τομέα της πρόβλεψης αιολικής παραγωγής^{lvi}. Ένα παράδειγμα είναι ο συνδυασμός ασαφούς

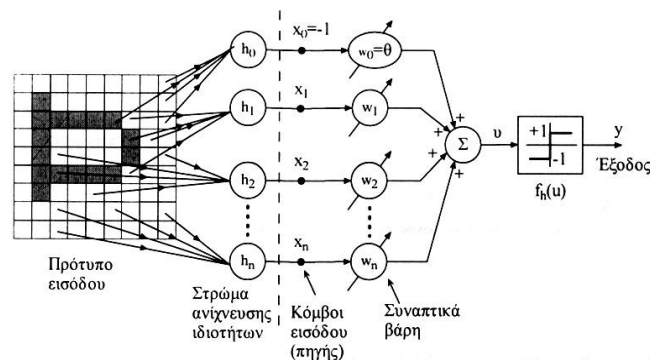
λογικής και ΤΝΔ για πρόβλεψη αιολικής παραγωγής^{lvii}. Σε μια άλλη εργασία έχουμε 2 μοντελα προβλεψεις αιολικής παραγωγής, ένα με συνδυασμός ασαφούς λογικής και ΤΝΔ και ένα με συνδυασμός αυτό-οργανούμενου χάρτη και ΤΝΔ^{lviii}. Μια ακόμα εργασία έχουμε αναπτυξη ενός μοντελου που χρησιμοποιεί έναν αυτό-οργανούμενο χάρτη και έπειτα αναδρομικά ΤΝΔ για την παραγωγή προβλέψεων της αιολικής ισχύος για μέχρι και 40 ώρες μπροστά^{lix}.

5.7 Perceptron ΤΝΔ

Τα ΤΝΔ με τη βοήθεια των οποίων θα προσπαθήσουμε να κάνουμε πρόβλεψη είναι τα ονομαζόμενα πολυστρωματικά perceptron (Multi-Layer Perceptrons, MLP), τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των ΤΝΔ επιβλεπόμενης μάθησης (ανανεώνουν δηλαδή τις παραμέτρους τους με τον κανόνα επιβλεπόμενης μάθησης που παρουσιάστηκε νωρίτερα). Πριν παρουσιασθούν τα MLP και ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης (back-propagation) που αυτά χρησιμοποιούν, κρίνεται απαραίτητη μια σύντομη παρουσίαση του απλού (μονόστρωματικού) perceptron. xxxiv

5.7.1 ΤΟ ΑΠΛΟ PERCEPTRON

Το ΤΝΔ Perceptron αποτελείται από έναν απλό νευρώνα με προσαρμόσιμα βάρη ο οποίος ακολουθείται από μια διπολική συνάρτηση ενεργοποίησης. Η δομή του perceptron (ενός νευρώνα) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτό το δίκτυο μπορεί να πραγματοποιήσει ταξινόμηση στην περίπτωση που έχουμε μόνο δυο κατηγορίες. Για να είναι δυνατή η ταξινόμηση περισσότερων γραμμικά διαχωρίσιμων κατηγοριών (κλάσεων) το στρώμα εξόδου χρειάζεται να έχει περισσότερους από έναν νευρώνα.



Εικόνα 5.14 Perceptron ενός νευρώνα

Η έξοδος του perceptron δίνεται από τη σχέση:

$$y(t) = f_h(v(t)) \quad (5.13)$$

$$v(t) = \sum_{i=0}^n w_i x_i = \mathbf{w}^T(t) \mathbf{x}(t) \quad (5.14)$$

όπου $f_h(v)$ είναι η συνάρτηση του σκληρού περιοριστή (διπολικής συνάρτησης) και

$$\mathbf{x}(t) = [-1, x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \quad (5.15)$$

$$\mathbf{w}(t) = [\theta(t), w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t)]^T \quad (5.16)$$

Ο σκοπός του perceptron είναι να ταξινομήσει τα εξωτερικά πρότυπα x_1, x_2, \dots, x_n σε μια από δυο κατηγορίες K_1 ή K_2 . Τούτο γίνεται εκχωρώντας ένα σημείο $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ στην κατηγορία K_1 αν η έξοδος y είναι +1 και στην κατηγορία K_2 αν είναι -1. Η διδασκαλία του perceptron πρέπει να γίνει με καλά παραδείγματα κάθε μιας κατηγορίας. Αν οι προς διαχωρισμό κατηγορίες μοιάζουν πολύ μεταξύ τους τότε είναι δύσκολο να εκπαιδευτεί το perceptron να ταξινομεί τα πρότυπα που του παρουσιάζονται στη μια ή στην άλλη κατηγορία.

Ο αλγόριθμος επιλογής (ανανέωσης) των βαρών στηρίζεται στο γεγονός ότι αν οι κλάσεις K_1 και K_2 είναι γραμμικά διαχωρίσιμες, τότε υπάρχει ένα διάνυσμα βαρών w τέτοιο ώστε:

$w^T x \geq 0$ όταν το x ανήκει στην K_1

$w^T x < 0$ όταν το x ανήκει στην K_2

Συνεπώς όταν το perceptron λάβει ένα ζευγάρι εκπαίδευσης (x_1, x_2) πρέπει να προσδιορίσει ένα διάνυσμα βάρους w τέτοιο ώστε να ικανοποιούνται οι δυο ανισότητες

Ο αλγόριθμος perceptron περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Διάλεξε μια αρχική τιμή $w(0)$ του διανύσματος βάρους $w(t)$. Συνήθως παίρνουμε $w(0)=0$ ή δίνουμε στα αρχικά βάρη $w_i(0)$ μικρές τυχαίες τιμές.
2. Παρουσίασε στο perceptron το διάνυσμα εισόδου x και την επιθυμητή έξοδο $d(t)$.
3. Υπολόγισε την προκύπτουσα έξοδο

$$y(t) = f_h(w^T(t)x(t)) = \text{sgn}\{w^T(t)x(t)\} \quad (5.17)$$

όπου $\text{sgn}\{ \}$ είναι η συνάρτηση προσήμου:

$$f_h(v) = \text{sgn}(v) = \begin{cases} +1, v \geq 0 \\ -1, v < 0 \end{cases} \quad (5.18)$$

4. Αν η πραγματική έξοδος είναι σωστή, δηλαδή αν $w^T(t)x(t) \geq 0$ και το $x(t)$ ανήκει στην κατηγορία K_1 ή αν $w^T(t)x(t) < 0$ και το $x(t)$ ανήκει στην κατηγορία K_2 , τότε δεν γίνεται καμία διόρθωση βάρους, δηλαδή:

$$w(t+1) = w(t)$$

Διαφορετικά γίνεται διόρθωση (ανανέωση) του βάρους ως εξής:

$$w(t+1) = w(t) - \gamma x(t), \text{ αν } w^T(t)x(t) \geq 0 \text{ και } x(t) \text{ ανήκει στην } K_2 \quad \text{ή}$$

$$w(t+1) = w(t) + \gamma x(t), \text{ αν } w^T(t)x(t) < 0 \text{ και } x(t) \text{ ανήκει στην } K_1 \quad \text{όπου } \gamma > 0 \text{ είναι η}$$

παράμετρος που καθορίζει το ρυθμό μάθησης (ανανέωσης).

Ο Rosenblatt απέδειξε ότι ο αλγόριθμος αυτός συγκλίνει υπό την έννοια ότι το $w(t^*) = w(t^*+1) = w(t^*+2) = \dots$ είναι ένα διάνυσμα βάρους λύσης για $t^* \leq t_{\max}$, όπου t^* είναι ένας πεπερασμένος αριθμός επαναλήψεων. Με άλλα λόγια, μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων t^* σταματάει η μεταβολή των βαρών, ήτοι το perceptron έχει ταξινομήσει σωστά όλα τα διανύσματα εισόδου.

Ένας άλλος παρόμοιος αλγόριθμος δόθηκε από τους Widrow και Hoff και διαφέρει μόνο στο βήμα 4 που τώρα είναι το εξής:

$$w(t+1) = w(t) + \gamma[d(t)-y(t)]x(t) \quad (5.19)$$

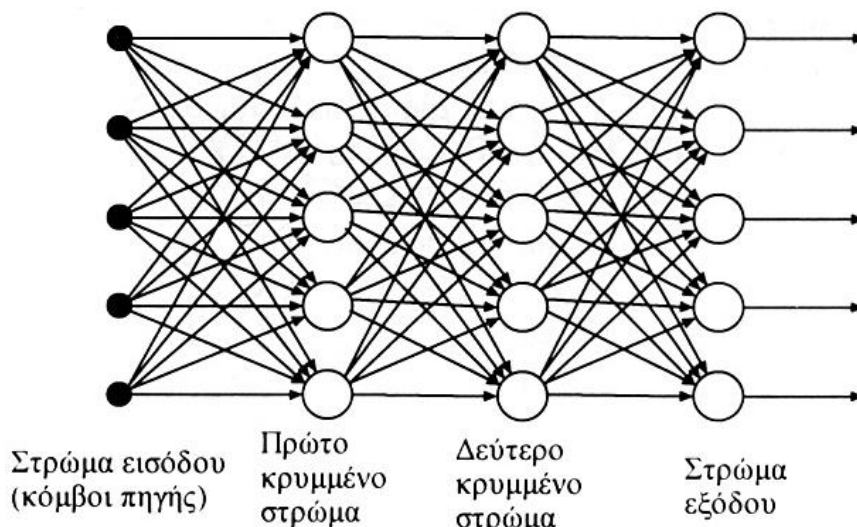
όπου

$$d(t) = \begin{cases} +1, \alpha v & \mathbf{x}(t) \in K_1 \\ -1, \alpha v & \mathbf{x}(t) \in K_2 \end{cases} \quad (5.20)$$

Ο αλγόριθμος αυτός είναι γνωστός ως αλγόριθμος δέλτα (δ -algorithm) από το συμβολισμό του λάθους $\delta(t) = d(t) - y(t)$ που χρησιμοποίησαν οι Widrow και Hoff.

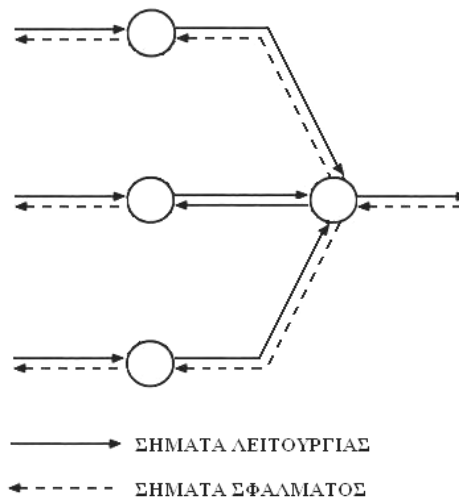
5.7.2 ΤΟ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ PERCEPTRON

Τα πολυστρωματικά perceptron (Multi-Layer Perceptron, MLP) είναι δίκτυα προσοτροφοδότησης (feedforward), αποτελούν γενίκευση του μονοστρωματικού perceptron και περιλαμβάνουν, εκτός από το στρώμα κόμβων εισόδου (πηγής) και το στρώμα εξόδων (αποκρίσεων), ένα ή περισσότερα στρώματα κρυμμένων κόμβων (hidden layers)



Εικόνα 5.15 Πολυστρωματικό perceptron με δυο κρυμμένα στρώματα.

Τα πολυστρωματικά perceptron είναι κατάλληλα για την επίλυση πλήθους πολύπλοκων προβλημάτων και εκπαιδεύονται με επιβλεπόμενη μάθηση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης (BP, Back Propagation) ο οποίος στηρίζεται στον κανόνα μάθησης διόρθωσης σφάλματος. Η διαδικασία εκπαίδευσης στον αλγόριθμο back-propagation περιλαμβάνει υπολογισμούς που υλοποιούνται σε δυο περάσματα μέσω των στρωμάτων του δικτύου: ένα πέρασμα κατά την ευθεία φορά (από την είσοδο προς την έξοδο) και ένα κατά την ανάστροφη φορά (από την έξοδο προς την είσοδο). Στο ευθύ πέρασμα, εφαρμόζεται ένα πρότυπο στις εισόδους του δικτύου, πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί κατά την ορθή φορά και στο τέλος παράγεται ένα σύνολο από εξόδους που αποτελούν και την πραγματική έξοδο του δικτύου. Κατά τη διάρκεια αυτού του περάσματος τα βάρη των συνδέσεων του δικτύου είναι σταθερά. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια του αντίστροφου περάσματος, τα βάρη προσαρμόζονται σύμφωνα με τον κανόνα διόρθωσης σφάλματος. Συγκεκριμένα, η πραγματική τιμή της εξόδου αφαιρείται από την αντίστοιχη επιθυμητή και παράγεται το σήμα σφάλματος. Αυτό το σήμα στη συνέχεια προωθείται στο δίκτυο κατά την ανάστροφη κατεύθυνση. Στη διαδικασία αυτή τα συναπτικά βάρη αναπροσαρμόζονται ώστε να μετατοπισθεί η απόκριση του δικτύου πλησιέστερα στην επιθυμητή.



Εικόνα 5.16 Ροή σημάτων σε τμήμα ενός MLP

Ένα πολυστρωματικό perceptron έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Κάθε κρυμμένος νευρώνας περιέχει μια μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης.

$$y_k = f(v_k) = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda v_k)} \quad (5.21)$$

ή η υπερβολική εφαπτομένη:

$$y_k = f(v_k) = \frac{1 - \exp(-v_k)}{1 + \exp(-v_k)} \quad (5.22)$$

όπου $v_k = u_k - \theta_k$ είναι η καθαρή εσωτερική δραστηριότητα (κατάσταση) του k νευρώνα και y_k είναι η έξοδος του. Η ύπαρξη της μη-γραμμικότητας είναι πολύ σημαντική και είναι αυτή που προσδίδει στα δίκτυα MLP τις επιθυμητές υπολογιστικές δυνατότητες. Επιπλέον, η χρήση μια τέτοιας συνάρτησης υποστηρίζεται και βιολογικά από τη λειτουργία των φυσικών νευρώνων.

2. Το δίκτυο περιέχει ένα ή περισσότερα κρυμμένα στρώματα μη γραμμικών νευρώνων τα οποία δεν ανήκουν στα επίπεδα εισόδου ή εξόδου. Αυτοί οι νευρώνες καθιστούν το δίκτυο ικανό να μάθει πολύπλοκα πρότυπα εξάγοντας από αυτά κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ νευρώνων του ίδιου επιπέδου και συνήθως υπάρχει πλήρης διασύνδεση μεταξύ των νευρώνων δυο διαδοχικών επιπέδων.

Η υπολογιστική ισχύς του πολυστρωματικού perceptron προέρχεται από το συνδυασμό αυτών των χαρακτηριστικών και από την ικανότητα μάθησης μέσω εκπαίδευσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι όμως ταυτοχρόνως υπεύθυνα για τις ελλείψεις που παρουσιάζουν οι γνώσεις μας γύρω από τη συμπεριφορά αυτών των δικτύων. Η παρουσία καταναμημένης μορφής μη-γραμμικότητας και η μεγάλη συνδεσιμότητα καθιστούν υπερβολικά δύσκολη τη θεωρητική ανάλυσή τους. Επίσης, η χρήση κρυμμένων νευρώνων δυσκολεύει την οπτικοποίηση της διαδικασίας μάθησης.

5.7.3 Ο Αλγόριθμος Ανάστροφης Διάδοσης (Back Propagation)

Ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης (BP) αποτελεί επέκταση του κανόνα δέλτα που χρησιμοποιείται στο απλό perceptron και που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα. Η ανάπτυξη του αποτελεί ορόσημο στην εξέλιξη των νευρωνικών δικτύων διότι παρέχει μια υπολογιστικά αποτελεσματική μέθοδο εκπαίδευσης των πολυστρωματικών perceptrons. Αναλυτική μαθηματική παρουσίαση του αλγορίθμου ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας. Για χάρη πληρότητας λοιπόν παρουσιάζονται εν συντομία τα βήματά του:

1. Διάλεξε τα αρχικά βάρη και κατώφλια χρησιμοποιώντας μικρές θετικές τυχαίες τιμές.
2. Παρουσίασε στο ΤΝΔ το διάνυσμα εκπαίδευσης

$$\mathbf{x}(t) = [x_0(t), x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \quad (5.23)$$

και το επιθυμητό διάνυσμα εξόδου (στόχο)

$$\mathbf{d}(t) = [d_1(t), d_2(t), \dots, d_m(t)]^T \quad (5.24)$$

3. Υπολόγισε τα σήματα εξόδου όλων των νευρώνων του δικτύου νευρώνα-νευρώνα προς τα εμπρός χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες τιμές των συναπτικών βαρών, δηλαδή:

$$y_j(t) = f_j(v_j(t)), \quad v_j(t) = \sum_i w_{ji}(t)y_i(t) \quad (5.25) \quad \text{όπου } y_i(t) \text{ είναι η } i \text{ είσοδος του } j$$

νευρώνα (δηλαδή η έξοδος του i νευρώνα) και w_{ji} είναι το συναπτικό βάρος που συνδέει τον i με τον j νευρώνα. Για τους νευρώνες j του πρώτου κρυμμένου στρώματος ισχύει $y_i(t) = x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ όπου $x_i(t)$ είναι η i είσοδος (πρότυπο) ερεθισμού. Για τους νευρώνες j του στρώματος εξόδου, το $y_i(t)$ είναι η j πραγματική έξοδος (απόκριση) του δικτύου.

4. Ανανέωσε (βελτίωσε) τα βάρη αρχίζοντας από τους νευρώνες της εξόδου και προχωρώντας ανάστροφα προς το στρώμα εισόδου, χρησιμοποιώντας τον κανόνα:

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \gamma \delta_j(t)y_i(t) + \alpha[w_{ji}(t) - w_{ji}(t-1)] \quad (5.26)$$

όπου α είναι μια παράμετρος με τιμές στο διάστημα $0 < \alpha < 1$ και το $\delta_j(t)$ ονομάζεται «τοπική κλίση» και αν ο θεωρούμενος νευρώνας ανήκει στο στρώμα εξόδου δίνεται από την:

$$\delta_j(t) = [d_j(t) - y_j(t)]y_j[1 - y_j(t)] \quad (5.27)$$

ενώ αν ο νευρώνας j ανήκει σε κρυμμένο στρώμα δίνεται από την:

$$\delta_j(t) = y_j(t)[1 - y_j(t)] \sum_m \delta_m(t)w_{mj}(t) \quad (5.28)$$

με το δείκτη m να εκτείνεται σε όλους τους νευρώνες του στρώματος εξόδου και το $w_{ji}(t)$ να παριστάνει το συναπτικό βάρος που συνδέει τον νευρώνα j ενός στρώματος με τον νευρώνα i του αμέσως προηγούμενου στρώματος (που κείται στα αριστερά του).

5. Επανέλαβε τη διαδικασία από το βήμα 2.

Στην εφαρμογή του αλγορίθμου back propagation, η εκπαίδευση επιτυγχάνεται με την παρουσίαση στο δίκτυο ενός συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης (Training Data Set, TDS). Η παρουσίαση όλων των προτύπων του συνόλου εκπαίδευσης μια φορά το καθένα ονομάζεται εποχή (epoch). Η διαδικασία εκπαίδευσης εκτελείται σε επαναλήψεις εποχών ως ότου τα βάρη του δικτύου σταθεροποιηθούν σε συγκεκριμένες τιμές, για τις οποίες η μέση τιμή του σφάλματος (για το σύνολο προτύπων εκπαίδευσης) συγκλίνει στην ελάχιστη τιμή της. Είναι καλό σε κάθε εποχή να παρουσιάζεται με τυχαία σειρά το σύνολο προτύπων, έτσι ώστε η διαδικασία αναζήτησης στο χώρο των βαρών να είναι περισσότερο στοχαστική.

5.7.3 Εφαρμογές – Δυνατότητες του Πολυστρωματικού Perceptron

Η βασική λειτουργία που επιτελεί ένα πολυστρωματικό perceptron (MLP) είναι η υλοποίηση απεικόνισης (mapping) από το χώρο των εισόδων στο χώρο των εξόδων, χρησιμοποιώντας τα ζεύγη εκπαίδευσης και τους κατάλληλους αλγορίθμους εκπαίδευσης.

Έτσι το MLP έχει χρησιμοποιηθεί με ιδιαίτερη επιτυχία για την κατασκευή συστημάτων πρόβλεψης (prediction), για την ταξινόμηση προτύπων (classification), για την κατασκευή μοντέλων από δεδομένα (data fitting), για τον έλεγχο συστημάτων, μέχρι και για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Κλείνοντας αυτή την ενότητα θα πρέπει να γίνει σύντομη αναφορά σε δυο πολύ βασικές δυνατότητες των πολυστρωματικών perceptron: τη δυνατότητα γενίκευσης και την ανεκτικότητα σε βλάβες.

Γενίκευση (generalization) είναι η δυνατότητα ενός ΤΝΔ να ταξινομεί πρότυπα τα οποία ποτέ δεν γνώρισε. Η γενίκευση είναι μια από τις πιο σημαντικές δυνατότητες των ΤΝΔ. Υποτίθεται βεβαίως ότι οι προς ταξινόμηση είσοδοι (πρότυπα) λαμβάνονται από τον ίδιο πληθυσμό προτύπων ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του δικτύου. Η γενίκευση επιτυγχάνεται ανιχνεύοντας ιδιότητες του προτύπου εισόδου που είναι σημαντικές και έχουν εμφυτευθεί (κωδικοποιηθεί) στους εσωτερικούς κόμβους. Ένα γνωστό πρότυπο ταξινομείται τότε μαζί με τα άλλα πρότυπα που έχουν τις ίδιες χαρακτηριστικές ιδιότητες. Το ΤΝΔ έχει επίσης την δυνατότητα να διακρίνει και να ταξινομεί (σχετικά καλά) ελλιπή, παραμορφωμένα και διαταραχθέντα με θόρυβο δεδομένα. Αν το δίκτυο έχει εκπαιδευτεί όπως πρέπει, τότε είναι ικανό να δώσει σωστή έξοδο έστω και αν η είσοδος που εφαρμόστηκε είναι ελαφρά διαφορετική από τις εισόδους των παραδειγμάτων με τα οποία εκπαιδεύτηκε.

Στην πράξη λοιπόν προσπαθούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα της γενίκευσης επιλέγοντας όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερο (representative) σύνολο εκπαίδευσης. Η καλύτερη μορφή (αρχιτεκτονική) του δικτύου επιλέγεται συνήθως με προσεκτική μελέτη του υπό εξέταση προβλήματος. Περισσότερα πάνω στην καταλληλότητα ενός δικτύου να λύσει ένα συγκεκριμένο πρόβλημα και την επιλογή της βέλτιστης μορφής θα συζητηθούν σε επόμενο κεφάλαιο, όταν θα προσπαθήσουμε δηλαδή να βρούμε το δίκτυο που θα ταιριάζει καλύτερα στο πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού εργασιών.

Το πολυστρωματικό perceptron είναι ενδογενώς ανεκτικό σε βλάβες γιατί είναι ένα σύστημα παράλληλης επεξεργασίας στο οποίο κάθε κόμβος επεξεργασίας (νευρώνας) συμβάλλει στο τελικό αποτέλεσμα της εξόδου. Αν χαθεί ή χαλάσει ένας νευρώνας ή υποστούν βλάβη τα συναπτικά του βάρη, η «ανάκτηση» πέφτει σε ποιότητα, αλλά η κατανεμημένη φύση της πληροφορίας εξασφαλίζει ότι η βλάβη θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλη για να υποβιβασθεί η ποιότητα της απόκρισης σε μεγάλο βαθμό (επικίνδυνα). Συνεπώς, το δίκτυο παρουσιάζει ελαφρά πτώση της συμπεριφοράς του και όχι καταστροφική. Επίσης το πολυστρωματικό perceptron αντέχει σε θορύβους λόγω της δυνατότητας γενίκευσης που έχει. Η βλάβη στο δίκτυο αντιμετωπίζεται με επανεκπαίδευση και η «ανάρρωση» αυτή του δικτύου είναι συνήθως πολύ γρήγορη. xxxiii

5.8 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΤΝΔ

Επειδή τα ΤΝΔ αποτελούν ένα σχετικά πρόσφατο μοντέλο υπολογισμού, θα πρέπει να πούμε ότι τα πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και η σχέση τους με τις κλασικές μεθόδους υπολογισμού δεν είναι πλήρως ξεκαθαρισμένα. Οι προσδοκίες σε αυτόν τον τομέα είναι μεγάλες. Σε γενικές γραμμές τα ΤΝΔ είναι κατάλληλα να αντιμετωπίσουν συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων και ειδικότερα προβλήματα εκπαίδευσης που αντιμετωπίζονται με συσχέτιση προτύπων. Η αντίληψη ότι τα ΤΝΔ μπορούν να λύσουν όλα τα προβλήματα αυτόματης απόκτησης γνώσης είναι μη ρεαλιστική. xxxiii

5.8.1 Πλεονεκτήματα των Νευρωνικών Δικτύων

- Έμφυτος παραλληλισμός.
- Ανοχή σε βλάβες (λόγω του παραλληλισμού).
- Σχεδιασμένα να είναι προσαρμοζόμενα.
- Δεν υπάρχει η ανάγκη για χαρακτηρισμό του προβλήματος πέρα από το σύνολο των προτύπων εκπαίδευσης.

5.8.2 Μειονεκτήματα των Νευρωνικών Δικτύων

- Δεν υπάρχουν σαφείς κανόνες για την ανάπτυξη ΤΝΔ για οποιαδήποτε εφαρμογή.
- Δεν υπάρχει γενικός τρόπος για την ερμηνεία της εσωτερικής λειτουργίας του δικτύου.
- Η εκπαίδευση μπορεί να είναι δύσκολη ή αδύνατη.
- Η ικανότητα γενίκευσης είναι δύσκολα προβλέψιμη.

6. Δεδομένα και Αποτελέσματα

6.1 Παρουσίαση δεδομένων και παραδοχών που έγιναν

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή του τρόπου και των αποτελεσμάτων των προβλέψεων ας παρουσιάσουμε τα δεδομένα που διαθέτουμε και τις παραδοχές που έγιναν. Πρώτα απ όλα ας ξεκινήσουμε αναφέροντας την πηγή των δεδομένων μας που είναι μετρήσεις από αισθητήρες στο Πολυτεχνείο Κρήτης το έτος 2003.

Από το πυρανόμετρο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας (ήταν τοποθετημένο στο οριζόντιο επίπεδο) έχουμε μια χρονοσειρά από μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας. Εδώ αντιμετωπίζουμε δυο προβλήματα. Κάποιες τιμές έλλειπαν οπότε αναγκαστήκαμε να της καλύψουμε βάζοντας την μέση τιμή των δυο διπλανών μετρήσεων (κάτι που δεν είναι απόλυτα ακριβές διότι είναι πολύ πιθανό ένα σύννεφο να είχε καλύψει την περιοχή απόλυτα μόνο για εκείνη την ώρα), μάλιστα σε κάποιες λίγες περιπτώσεις έλλειπε και ολόκληρη μέρα μετρήσεων οπότε και πάλι θεωρήθηκε η μέση τιμή των μετρήσεων των δυο γειτονικών ημερών για κάθε αντίστοιχη ώρα. Το άλλο πρόβλημα ήταν ότι για κάποιες νυχτερινές ώρες είχαμε ενδείξεις ύπαρξης ηλιακής ακτινοβολίας (ίσως λόγω σεληνιακού φωτός ή σφάλματος οργάνου). Το πρόβλημα αυτό λύθηκε απλά θεωρώντας όλες τις τιμές πριν την ανατολή και μετά την δύση του ηλίου ίσες με μηδέν.^{ix}

Από το ανεμόμετρο πήραμε μετρήσεις ταχύτητας του ανέμου. Το υψόμετρο του ανεμομέτρου από την επιφάνεια του εδάφους ήταν 15m (το υψόμετρο της τοποθεσίας του ανεμομέτρου από την επιφάνεια της θάλασσας είναι 153m) κάτι που μας βολεύει γιατί το μοντέλο της Sandia National Laboratories θέλει την ταχύτητα του ανέμου μετρημένη σε υψόμετρο 15μετρα από την επιφάνεια. Επίσης μας έλλειπαν κάποιες τιμές, οπότε και πάλι εκτιμήθηκαν όσο η μέση τιμή των ταχυτήτων των γειτονικών ωρών. Εδώ δεν έχουμε κανένα πρόβλημα διότι και ο άνεμος δεν μεταβάλλεται τόσο απότομα από την μια ώρα στην άλλη σε αυτή την τοποθεσία και επίσης όπως είδαμε στο παραπάνω κεφάλαιο επηρεάζει πολύ λίγο την παραγωγή.

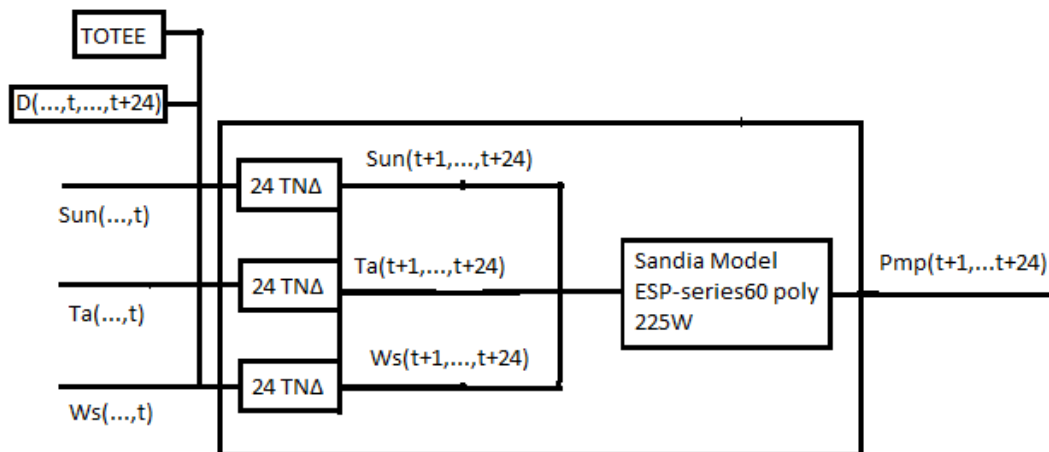
Από θερμόμετρο πήραμε τις τιμές της θερμοκρασίας υπό σκιά, έτσι όπως ακριβώς μας χρειάζονται για το μοντέλο της Sandia National Laboratories (όπως είδαμε στην ενότητα 4.27, μετά υπολογίζεται η θερμοκρασία πάνω στο πλαίσιο και μέσα στα Φ/Β κελιά). Και εδώ μας έλλειπαν τιμές για κάποιες ώρες. Έτσι και πάλι χωρίς κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα εκτιμήθηκαν ως η μέση τιμή των ταχυτήτων των γειτονικών ωρών, διότι και η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται τόσο απότομα από την μια ώρα στην άλλη και επίσης όπως είδαμε σε παραπάνω κεφάλαιο επηρεάζει πολύ λίγο την παραγωγή.

Αυτά είναι τα μετρολογικά μας δεδομένα και οι παραδοχές που έγιναν. Τώρα θέλουμε όμως και μια χρονοσειρά από τιμές παραγωγής ισχύος ενός Φ/Β πλαισίου κάτι που το πολυτεχνείο Κρήτης δεν διαθέτει. Έτσι όλα βασίστηκαν πάνω στο μοντέλο της Sandia National Laboratories (με παραμέτρους που προσομοιώνουν ένα ESP series60 poly 225w πλαίσιο^{ixi}) το οποίο για τα πλαίσια της εργασίας θεωρήθηκε ακριβές, κάτι που δεν είναι αλήθεια. Πρώτον διότι το μοντέλο της Sandia National Laboratories παρουσιάζει απόκλιση έως και 2%. Δεύτερον διότι τα μετρολογικά μας δεδομένα δεν είναι 100% ακριβή, όπως μόλις παραπάνω διατυπώθηκε. Η έξοδος του μοντέλου αυτού είναι η υποθετική χρονοσειρά τιμών παραγωγής ισχύος η οποία θεωρήθηκε η χρονοσειρά στόχος που θέλουμε να προβλέψουμε. Ως πραγματική τιμή παραγωγής από εδώ και εξής στο κεφαλαίο θεωρείται αυτή η χρονοσειρά.

6.2 Περιγραφή μοντέλου πρόβλεψης

Στόχος μας όπως είπαμε είναι να προσπαθήσουμε να εκτιμήσουμε με όσο μικρότερο σφάλμα γίνεται την πραγματική τιμή της παραγωγής του ESP series60 poly 225w πλαισίου. Σε αυτή την εργασία τα δεδομένα μας είναι ωριαίες τιμές των χρονοσειρών των μετεωρολογικών μας δεδομένων, καθώς και ωριαίες τιμές έντασης ακτινοβολίας οι οποίες εξάγονται από το HOMER, αν σε αυτό βάλουμε τις κατάλληλες μέσες τιμές έντασης ημερήσιας ακτινοβολίας για κάθε μήνα που προέρχονται από την TOTEE 20701-3/2010xii. Η πρόβλεψη έγινε σε περιβάλλον matlab, όπου υλοποιήθηκαν τα ΤΝΔ και το μοντέλο της Sandia National Laboratories.

Κάθε ένα από τα ΤΝΔ μας δίνει την τιμή για ένα από τα τρία μετεωρολογικά δεδομένα για την αντίστοιχη ώρα σε σχέση με την παρούσα ώρα που θέλουμε να γίνει πρόβλεψη. Η πρόβλεψη για κάθε ώρα του έτους γίνεται 24 φορές, αφού προβλέπεται από 24 ώρες έως και 1 ώρα πριν. Άρα συνολικά έχουμε κάνει χρήση 24 επί 3 ΤΝΔ, δηλαδή 72 ΤΝΔ. Οι έξοδοι από τα παραπάνω ΤΝΔ ανά τρεις (μια για κάθε μετεωρολογικό δεδομένο), για κάθε ώρα και ώρα πριν πρόβλεψης, εισάγονται στο μοντέλο της Sandia National Laboratories (με παραμέτρους του ESP series60 poly 225w πλαισίου) από το οποίο εξάγεται η τελική πρόβλεψη παραγωγής. Τελικά δηλαδή κάνουμε πρόβλεψη 24 φορές για κάθε ώρα του έτους, που αντιστοιχεί στο πόσες ώρες πριν αναφέρεται η πρόβλεψη. Ας δούμε σε ένα απλό σχηματικό διάγραμμα την κεντρική ιδέα του συνολικού μοντέλου πρόβλεψης.



Εικόνα 6.1 Σύνοψη του Μοντέλου Πρόβλεψης

Ας ξεκινήσουμε την αναλυτική περιγραφή του μοντέλου, εξηγώντας ότι το “t” αναφέρεται στην παρούσα ώρα, πάνω στην οποία θα γίνουν εκτιμήσεις για το κοντινό μέλλον. Τα Sun, Ta και Ws είναι οι χρονοσειρές των τιμών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου αντίστοιχα. Έτσι τα Sun(t), Ta(t) και Ws(t) είναι οι παρούσες τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου. Τα Sun(t-x), Ta(t-x) και Ws(t-x), για κάθε x μεγαλύτερο από το 0, αναφέρονται σε παρελθοντικές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου. Αντίστοιχα τα Sun(t+x), Ta(t+x) και Ws(t+x), για κάθε x μεγαλύτερο από το 0, αναφέρονται σε μελλοντικές τιμές(εκτιμήσεις) της έντασης

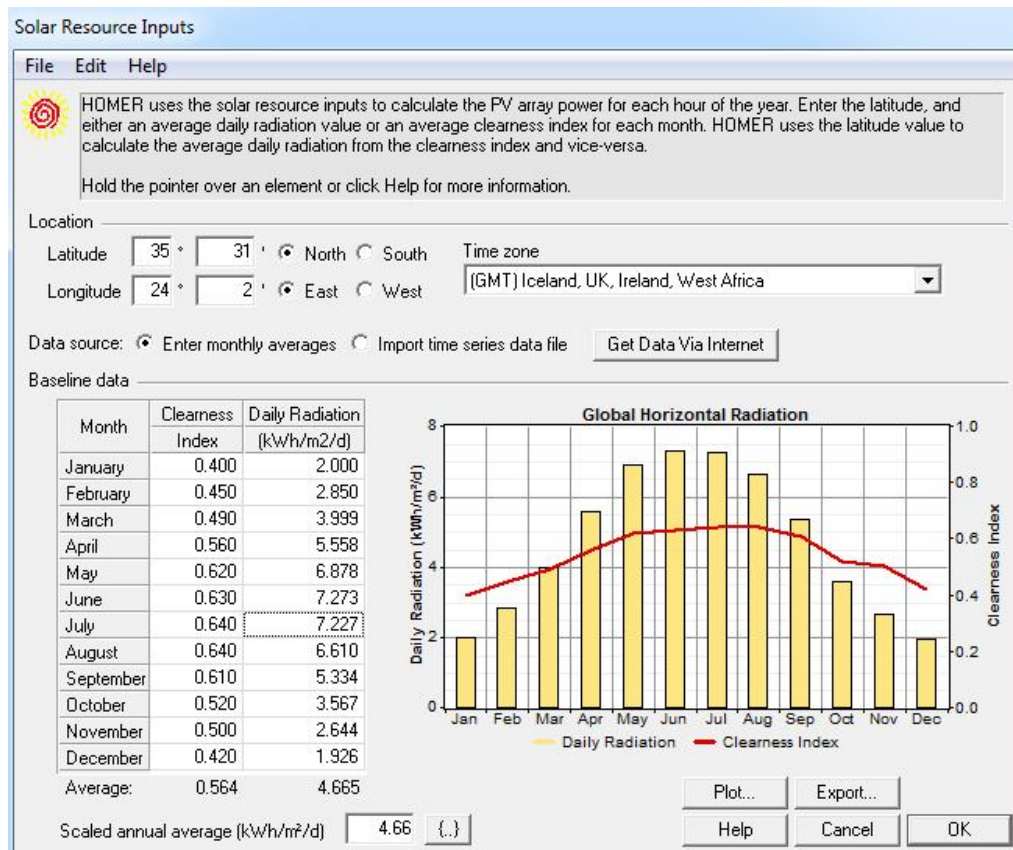
της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου. Το $D(t)$ αναφέρεται στην παρούσα ώρα της ημέρας(πχ 10) άρα τα $D(t-x)$ αναφέρονται στις προηγούμενες ώρες ενώ τα $D(t+x)$ σε μελλοντικές ώρες.

Όπως βλέπουμε και στην εικόνα 6.1 το μοντέλο πρόβλεψης μας παίρνει για εισόδους:

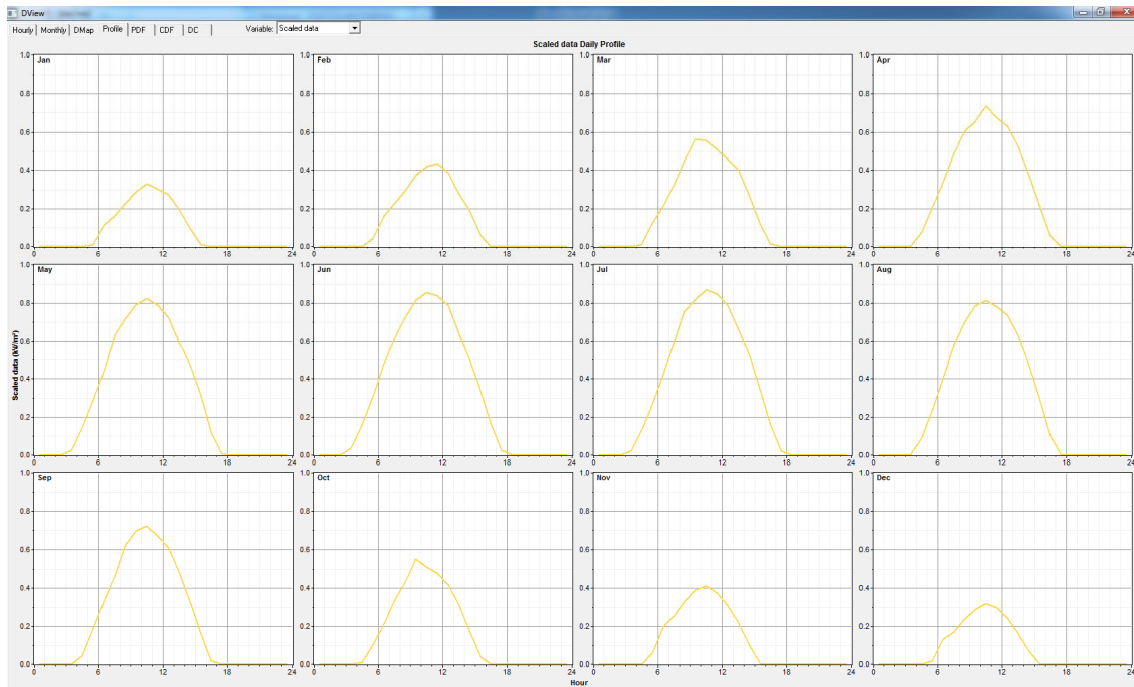
α) $Sun(\dots,t)$, $Ta(\dots,t)$ και $Ws(\dots,t)$: την παρούσα και τις παρελθοντικές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου

β) $D(\dots,t,\dots,t+24)$: τις ώρες στις οποίες αντιστοιχούν οι τιμές των εισόδων (δεδομένα) και οι τιμές των εξόδων (προβλέψεων). Για λόγους απλότητας, θα αναφερόμαστε σε αυτή τη χρονοσειρά με το όνομα «ώρα ημέρας».

γ) $TOTEE(\dots,t,\dots,t+24)$: αυτή η είσοδος δεν υπάρχει σε άλλες παρόμοιες πτυχιακές εργασίες. Η Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (TOTEE 20701-3/2010xii) περιέχει δεδομένα για τη τιμή της μέσης μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για περιοχές της Ελλάδας, συμπεριλαμβανομένων και των Χανίων (πίνακας 2.2). Από την μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία και να την εισάγουμε στο λογισμικού βελτιστοποίησης παραγωγής-κόστους HOMER Energy^{lxiii} (εναλλακτικά μπορούμε να εισάγουμε το μέσο δείκτη διαύγειας του ουρανού και το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής), όπως βλέπουμε στη εικόνα 6.2. Από HOMER μπορούμε να εξάγουμε μια χρονοσειρά από τιμές ηλιακής ακτινοβολίας για όλο το έτος. Επειδή όμως οι τιμές στην διάρκεια τις ημέρας εξελίσσονται με τυχαίες αυξομειώσεις, αυτή τη χρονοσειρά την επεξεργαζόμαστε με ένα απλό matlab script ώστε η καμπύλη ηλιακής ακτινοβολίας να είναι ίδια για κάθε μέρα ίδιου μήνα, όπως είναι στο profile view του HOMER που βλέπουμε στην εικόνα 6.3. Για λόγους απλότητας, θα αναφερόμαστε σε αυτή τη χρονοσειρά με το όνομα «TOTEE».



Εικόνα 6.2 Εισαγωγή δεδομένων στο HOMER ENERGY



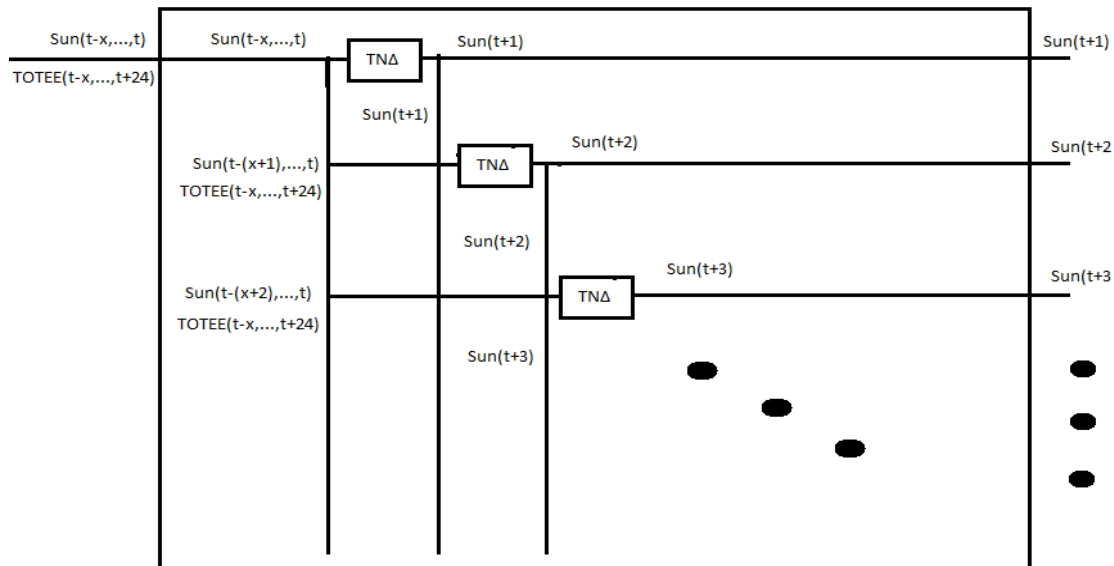
Εικόνα 6.2 Profile view ηλιακής ακτινοβολίας στο HOMER ENERGY

Αυτές οι εισόδους εισέρχονται στο μοντέλο μας και έπειτα στις 3 ομάδες ΤΝΔ. Δεν εισέρχονται όλες οι εισόδους του ΤΝΔ σε όλα τα ΤΝΔ. Παρακάτω θα δούμε πιο αναλυτικά ποιες ακριβώς εισέρχονται και που. Από την πρώτη ομάδα ΤΝΔ εξάγονται 24 μελλοντικές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ($Sun(t+1, \dots, t+24)$), από την δεύτερη ομάδα ΤΝΔ εξάγονται 24 μελλοντικές τιμές της θερμοκρασίας ($Ta(t+1, \dots, t+24)$) και από την τρίτη ομάδα ΤΝΔ εξάγονται 24 μελλοντικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου ($Ws(t+1, \dots, t+24)$). Στη συνέχεια αυτές οι έξοδοι εισέρχονται στο Sandia Model ανά τρεις και από εκεί παίρνουμε την τελική έξοδο που είναι οι μελλοντικές τιμές (εκτίμηση) της παραγωγής $Pmp(t+1, \dots, t+24)$.

Ας δούμε τώρα πιο αναλυτικά τις εισόδους και την διάταξη της κάθε ομάδας των 24 ΤΝΔ που δίνουν τη πρόβλεψη για κάθε μετρολογικό στοιχείο. Για λόγους ευκολίας περιγραφής θα μιλήσουμε για την 24αδα ΤΝΔ που κάνει εκτίμηση τιμής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι άλλες δυο ομάδες είναι δομημένες με το ίδιο ακριβώς σκεπτικό αλλά με τις αντίστοιχες εισόδους. Κάθε 24αδα ΤΝΔ παίρνει ως είσοδο την παρούσα τιμή της ακτινοβολίας $Sun(t)$ καθώς και παρελθοντικές της τιμές. Το πόσες παρελθοντικές τιμές παίρνει θα μελετηθεί παρακάτω σε αυτό το κεφάλαιο. Επίσης 2 ακόμα εισόδους την «TOTEE»($\dots, t, \dots, t+24$), και την «ώρα της ημέρας» $D(\dots, t, \dots, t+24)$ που περιγράφηκαν παραπάνω.

Δεν εισέρχονται όμως όλες αυτές οι εισόδους και στα 24 ΤΝΔ. Στο πρώτο ΤΝΔ εισέρχονται ένας αριθμός από παρελθοντικές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι και η παρούσα τιμή $Sun(\dots, t)$. Επίσης εισέρχονται και οι τιμές από την «TOTEE», από την ίδια παρελθοντική στιγμή μέχρι και για την ώρα που θα γίνει εκτίμηση δηλαδή $TOTEE(\dots, t, t+1)$ για το πρώτο ΤΝΔ καθώς και οι αντίστοιχες ώρες των παρελθοντικών τιμών μέχρι και την πρώτη μελλοντική ώρα. Το δεύτερο ΤΝΔ, που είναι πανομοιότυπο με το πρώτο, ίδιες συνδέσεις και ίδια βάρη, έχει τις ίδιες εισόδους αλλά μετακινημένες χρονικά κατά μια ώρα μπροστά. Δηλαδή θα πάρει από τις παρελθοντικές τιμές μια λιγότερη σε σχέση με το πρώτο και θα πάρει επιπλέον την $Sun(t+1)$, την $TOTEE(t+1)$ και την $D(t+1)$. Όμως η τιμή $Sun(t+1)$ είναι στο μέλλον οπότε δεν μπορεί να είναι δεδομένο εισόδου για το συνολικό μας μοντέλο. Έτσι το δεύτερο ΤΝΔ παίρνει αυτή την είσοδο από την έξοδο του πρώτου ΤΝΔ. Ομοίως το

τρίτο θα πάρει εισόδους από τις εξόδους και των δυο προηγούμενων ΤΝΔ, ενώ θα πάρει δυο λιγότερες παρελθοντικές τιμές. Αυτό συνεχίζεται και για τα 24 ΤΝΔ. Όπως καταλαβαίνουμε το δεύτερο κιάλας ΤΝΔ έχει μια είσοδο η οποία περιέχει κάποιο σφάλμα, διότι προήρθε από πρόβλεψη. Έτσι το σφάλμα διαδίδεται και μεγαλώνει όσο πιο μακροπρόθεσμη χρονικά είναι η πρόβλεψη κάτι που επίσης αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 6.4 Σχηματική αναπαράσταση ομάδας ΤΝΔ για πρόβλεψη ακτινοβολίας

6.2.2 Περιγραφή ΤΝΔ πρόβλεψης

Τα ΤΝΔ που χρησιμοποιήθηκαν υλοποιήθηκαν σε γλώσσα περιβάλλοντος matlab. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το Neural Network Toolbox^{lxiii} αλλά επειδή όπως είδαμε οι δυνατότητες παραμετροποίησης που έχει αυτή η εφαρμογή είναι πολύ περιορισμένες έγινε εξαγωγή κώδικα και έπειτα υλοποιήθηκαν αλλαγές στο script για να καλύψουμε τη μελέτη. Εκπαιδεύτηκαν πολλά ΤΝΔ για την κάθε περίπτωση ώστε να βρούμε αυτό με την καλύτερη πρόβλεψη. Δοκιμάστηκαν διαφορετικοί αριθμοί νευρώνων κρυφού επιπέδου, διαφορετικό αριθμό εισόδων και διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης και πραγματοποιήσαμε πέντε εκπαιδεύσεις για κάθε περίπτωση για να πάρουμε μέσο όρο. Για κάθε περίπτωση καταγράφηκαν το μέσο απόλυτο σφάλμα(mae) και την αντίστοιχη γραμμική παλινδρόμηση (linear regression) για τα δεδομένα training, validation και testing καθώς και το συνολικό μέσο απόλυτο σφάλμα(Mean absolute error/Mae, εξίσωση 6.1) όπως λέει και το όνομα του είναι η μέση τιμή από ένα σύνολο απολύτων τιμών σφαλμάτων. Στην δική μας περίπτωση είναι η μέση τιμή της απόλυτης τιμής των διαφορών μεταξύ της τιμής πρόβλεψης(έξοδος ΤΝΔ) και της πραγματικής τιμής.

Με δεδομένη μιας μεταβλητής y και ενός συνόλου μεταβλητών x_i , οι οποίες σχετίζονται με την y , ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression, εξίσωση 6.2) μπορεί να εφαρμοστεί για να ποσοτικοποιήσει τη δύναμη της σχέσης μεταξύ της y και της κάθε x_i . Αν η τιμή αυτή είναι μηδέν, τότε οι μεταβλητές είναι τελείως άσχετες μεταξύ τους, ενώ όσο η τιμή αυτή πλησιάζει το ένα, τόσο πιο σχετικές είναι οι μεταβλητές. Στη δική μας περίπτωση ψάχνουμε την γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της τιμής πρόβλεψης(έξοδος ΤΝΔ) και της πραγματικής τιμής.

$$Mae = \frac{\sum |P_{predi} - P_{reali}|}{L} \quad 6.1,$$

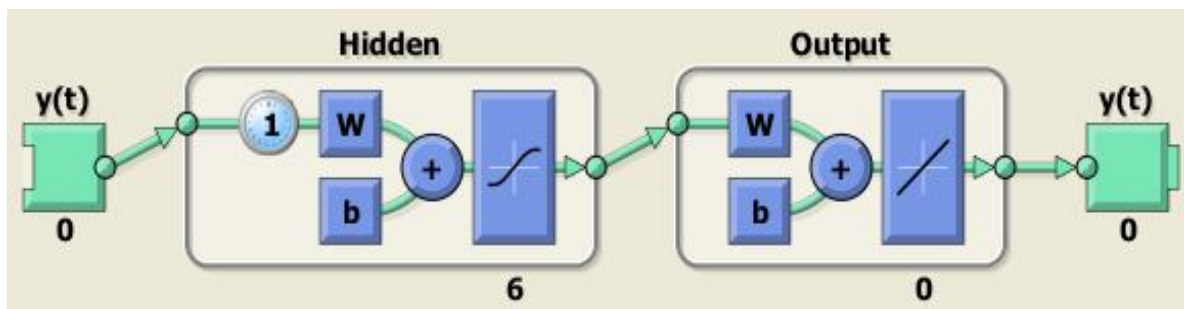
όπου P_{predi} είναι η τιμή της εκτίμησης της παραγωγής, P_{reali} είναι η τιμή της πραγματικής παραγωγής και L είναι το πλήθος των τιμών παραγωγής. Επίσης γίνεται χρήση και του $MAPE = \frac{Mae}{capacity}$, όπου $capacity$ είναι η ονομαστική ισχύς σε W που δίνει ο κατασκευαστής.

$$Regression = \frac{\sum (X_i - x) (Y_i - y)}{(L-1) S_x S_y} \quad 6.2,$$

όπου X_i και Y_i οι τιμές των δυο μεταβλητών που συσχετίζουμε, x και y η μέση τιμή των X_i και Y_i αντίστοιχα, L είναι το πλήθος των τιμών και S_x και S_y είναι οι τυπικές διασπορές των X_i και Y_i αντίστοιχα.

Να προσθέσουμε επίσης, επειδή τα σφάλματα δεν παρουσιάζονται μόνο σε απόλυτη τιμή, ότι σαν σφάλμα εννοούμε $error = Prediction - Real$, για οποιοδήποτε μέγεθος εξετάζεται σε αυτή την εργασία. Οπότε όταν το σφάλμα είναι αρνητικό σημαίνει ότι υποεκτιμούμε την τιμή, ενώ όταν είναι θετικό σημαίνει ότι την υπεκτιμούμε.

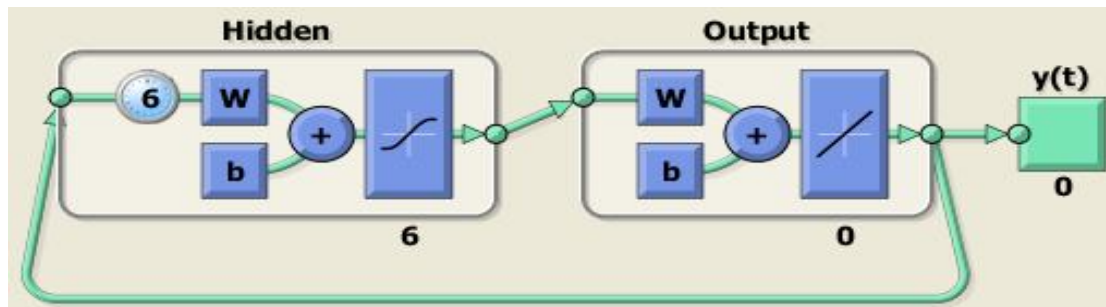
Αρχικά η πρόβλεψη των μετεωρολογικών δεδομένων για την επόμενη ώρα πραγματοποιήθηκε με μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομικά ΤΝΔ (narNN/non linear autoregressive NN) τα όποια όμως υλοποιούνται ως άπλα feed forward. Πριν ξεκινήσει η εκπαίδευση χρειαζόμαστε να ορίσουμε τη χρονοσειρά στόχου η οποία είναι η χρονοσειρά ωριαίων τιμών των μετεωρολογικών δεδομένων. Έπειτα θέτουμε τις διαστάσεις του δικτύου, δηλαδή πόσα κρυφά επίπεδα και πόσους νευρώνες ανά κρυφό επίπεδο καθώς και πόσες προηγούμενες τιμές της χρονοσειρά στόχου. Αν θέλουμε επίσης αλλάζουμε και τις συνδέσεις του δικτύου αλλά προτιμάμε τις προεπιλεγμένες ώστε να είναι μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ. Τα δεδομένα τα μοιράζουμε σε train, validation και test με τυχαίο τρόπο (με αναλογία 70,15, και 15%) για περισσότερη γενίκευση σε συνδυασμό ότι το τρέχουμε πέντε φορές. Παράμετρο επίδοσης από μέσο τετραγωνικό σφάλμα το αλλάζουμε σε μέσο απόλυτο σφάλμα, ενώ αλγόριθμο εκπαίδευσης επιλέγουμε το Levenberg-Marquardt backpropagation. Μετά από αυτά, μπορούμε να αφήσουμε το matlab να μας εκπαιδεύσει το δίκτυο. Στην εικόνα 6.5 βλέπουμε ένα τέτοιο δίκτυο με 1 κρυφό επίπεδο 6 νευρώνων, 1 προηγούμενη τιμή της χρονοσειρά στόχου, σιγμοειδή συνάρτηση ενεργοποίησης στο κρυφό επίπεδο και γραμμική στο εξόδο.



Εικόνα 6.5 Εικόνα μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ NARNN

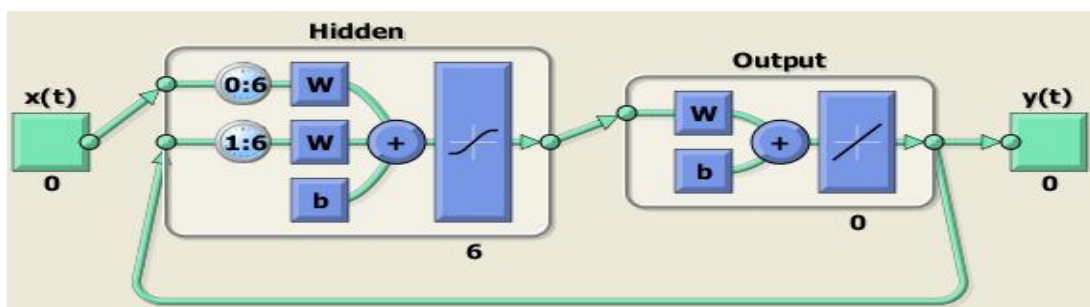
Πρόβλεψη των μετεωρολογικών δεδομένων για περισσότερες από μια ώρες μπροστά πραγματοποιήθηκε με κλειστού βρόγχου μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομικά ΤΝΔ. Αυτά υλοποιούνται ως απλά narNN με ανατροφοδότηση (recurrent networks). Παίρνουμε το ίδιο το narNN και του προσθέτουμε το κλειστό βρόγχο απλά τροφοδοτώντας την είσοδο με την έξοδο. Έτσι το δίκτυο για να βγάλει έξοδο για 6 ώρες μπροστά θα πρέπει να κάνει χρήση τιμών μελλοντικών ωρών οι οποίες έχουν βγει από (ως εκτίμηση) από το ίδιο το ΤΝΔ και τροφοδοτούνται πίσω, δηλαδή γίνεται χρήση της εκτίμησης για μελλοντική εκτίμηση και για αυτό όσο πιο μακροπρόθεσμο μέλλον προσπαθούμε να προβλέψουμε τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα. Στην εικόνα 6.6 βλέπουμε ένα τέτοιο δίκτυο με ένα κρυφό επίπεδο 6

νευρώνων, 6 προηγούμενες τιμές της χρονοσειρά στόχου, σιγμοειδή συνάρτηση ενεργοποίησης στο κρυφό επίπεδο και γραμμική στο εξόδου.



Εικόνα 6.6 Εικόνα μη-γραμμικό κλειστού βρόγχου αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ

Επειδή όμως (όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω) αυτά τα ΤΝΔ μας δίνουν αρκετά μεγάλο σφάλμα στην εκτίμηση τα επεκτείνουμε λίγο και κάνουμε χρήση μη-γραμμικών αυτοπαλινδρομικών ΤΝΔ με εξωτερική είσοδο (narNN/non linear autoregressive NN with external input). Αυτά δεν είναι τίποτα παραπάνω από τα προηγούμενα με την απλή προσθήκη μιας ακόμα (ή περισσότερων) χρονοσειρά εισόδου. Συνήθως αυτή η χρονοσειρά είναι η ημερήσια ώρα αλλά θα τα δούμε αναλυτικά για κάθε μετρολογική πρόβλεψη. Στην εικόνα 6.7 βλέπουμε ένα τέτοιο δίκτυο με 1 κρυφό επίπεδο 6 νευρώνων, 6 προηγούμενες τιμές της χρονοσειρά στόχου, σιγμοειδή συνάρτηση ενεργοποίησης στο κρυφό επίπεδο και γραμμική στο εξόδου.



Εικόνα 6.7 Εικόνα μη-γραμμικό κλειστού βρόγχου αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ με εξωτερική είσοδο

Τέλος επειδή θέλουμε να κάνουμε πρόβλεψη σε 24αρο, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα να φτιάξουμε εικοσιτέσσερα ΤΝΔ κλειστού βρόγχου. Το κάθε ένα κάνει πρόβλεψη για μια ώρα μπροστά σε σχέση με το άλλο. Όλα ξεκινάμε από το ίδιο μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ και με χρήση ανατροφοδότησης και ανάλογα με το πόσες τιμές ανατροφοδοτούμε γίνεται και η αντίστοιχες ώρες μπροστά πρόβλεψη, όπως δείξαμε και στην εικόνα 6.4.

6.2.1 Τελική πρόβλεψη του μοντέλου

Κλείνοντας με την περιγραφή του συνολικού μοντέλου θα πρέπει να ξεκαθαρίσουμε τι τελικά προβλέπει το μοντέλο και γιατί γίνεται έτσι η πρόβλεψη. Πρόβλεψη πραγματοποιήθηκε αρχικά για την επόμενη ώρα αλλά αυτό για το κέντρο ελέγχου ενέργειας του δικτύου δεν είναι επαρκές. Το κέντρο ελέγχου ενέργειας (ΚΕΕ) δικτύου για ένα σύστημα όπως της Κρήτης θέλει να γνωρίζει σε ορίζοντα 24 ωρών, πόση παραγωγή αναμένει από τις ανανεώσιμες πηγές του δικτύου, για την έγκαιρη εκκίνηση μονάδων

ατμοστροβίλων ή συνδυασμένου κύκλου. Σε συστήματα τα οποία αποτελούνται από μονάδες ντίζελ και αεριοστροβίλων γνώση σε ορίζοντα 6 ωρών μπροστά είναι επαρκές. Με βάση αυτές τις προβλέψεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων εκτελείται το πρόγραμμα βελτιστοποίησης του κόστους παραγωγής ενέργειας για την ένταξης μονάδων και τα σημεία λειτουργίας των μονάδων. Στη συνέχεια αν το ΚΕΕ λάβει ανανεωμένη πρόβλεψη παραγωγής τροποποιεί το πρόγραμμα ένταξης μονάδων αν κρίνεται αναγκαίο. Έτσι λοιπόν καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι είναι σημαντικό να έχουμε όσο το δυνατό καλύτερη πρόβλεψη παραγωγής από τα Φ/Β 24 και 6 ώρες μπροστά με ανανέωση της εκτίμησης κάθε μια ώρα.^{lxiv}

Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι ότι για κάθε «παρούσα» ώρα του έτους (με εξαίρεση τις 24 πρώτες ώρες διότι δεν έχουμε παρελθοντικές τους τιμές) γίνεται πρόβλεψη για τις τιμές της παραγωγής για όλο το επόμενο 24ωρο της, για να μπορούμε ανά πάσα παρούσα ώρα να δώσουμε και το 6ωρο και το 24ωρο παράθυρο πρόβλεψης. Δηλαδή γίνεται πρόβλεψη 24ωρων και συνεχόμενων ωρών κάτι που απλά σημαίνει ότι η πρόβλεψη για την παραγωγή κάθε ώρας του έτους γίνεται 24 φορές, κάτι που το χρειαζόμαστε γιατί πρέπει να ανανεώσουμε το παράθυρο πρόβλεψης κάθε μια ώρα. Βέβαια κάθε φορά η ώρα από την οποία προήρθε η πρόβλεψη είναι κοντινότερη στην ώρα πρόβλεψης άρα και η πρόβλεψη βελτιώνεται. Αυτό θα φανεί και παρακάτω όταν θα δείξουμε τα 6ωρα και 24ωρα παράθυρα πρόβλεψης.

6.3 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

6.3.1 Επιλογή των εισόδων και των νευρώνων

Η πρόβλεψη της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε με χρήση ΤΝΔ υλοποιημένα σε matlab. Όπως περιγράψαμε και παραπάνω αρχικά προσπαθήσαμε να κάνουμε πρόβλεψη με ένα μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ. Ως χρονοσειρά στόχου βάλαμε τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας. Εκπαιδεύσαμε με 1 έως 24 προηγούμενες τιμές της χρονοσειράς πρόβλεψης και με 6 έως 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Στα αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε δεν παίρνουμε το καλύτερο ΤΝΔ, γιατί αυτό θα ήταν σφάλμα της γενικότητας. Για κάθε περίπτωση εκπαιδεύσαμε 5 ΤΝΔ και πήραμε το μέσο όρο των μέσων απόλυτων σφαλμάτων και των γραμμικών παλινδρομήσεων. Παίρνουμε το μέσο ΤΝΔ από την καλύτερη περίπτωση.

Η καλύτερη περίπτωση βρέθηκε για 12 προηγούμενες τιμές και 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Σε αυτή το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $23,11 \text{ W/m}^2$, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,981. Αυτό το σφάλμα είναι αρκετά μεγάλο και σε συνδυασμό με το ότι η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η κατ' εξοχήν παράμετρος που επηρεάζει την παραγωγή δεν μας αφήνει και πολύ ικανοποιημένους.

Τα χειρότερα δεν τα παρουσιάσαμε ακόμα. Κλείνοντας το βρόχο στο νευρωνικό και μετατρέποντας το σε κλειστού βρόγχου μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ για να δούμε το σφάλμα 6 και 24 ωρών έχουμε τα εξής απογοητευτικά αποτελέσματα. Για το ίδιο ΤΝΔ (ίδιο αριθμό προηγούμενων τιμών και διαστάσεις κρυφού επιπέδου) όπως για την πρόβλεψη επόμενης ώρας στην πρόβλεψη 6ώρου ορίζοντα έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $39,94 \text{ W/m}^2$, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,938. Στην 24ωρη πρόβλεψη έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $56,57 \text{ W/m}^2$, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,873. Τα τόσο απογοητευτικά αποτελέσματα δεν πείθουν ότι αξίζει να μελετηθεί περισσότερο αυτό το νευρωνικό για βελτίωση οπότε πρέπει να βρούμε μια καινούργια ιδέα.

Η διαφορά έγινε με τη χρήση των προαναφερθέντων μη-γραμμικών αυτοπαλινδρομικών ΤΝΔ με εξωτερική είσοδο. Η εξωτερική είσοδος σαν μια πρώτη ιδέα είναι η ημερήσια ώρα, δηλαδή μια χρονοσειρά από 1 έως το 24 επαναλαμβανόμενα. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ίδιες. Αυτό θα βοηθήσει το νευρωνικό να δημιουργήσει πιο σωστά την καμπύλη σε σχέση με το προηγούμενο και θα κάνει πιο σωστή πρόβλεψη ιδικά για τις πρώτες πρωινές ώρες και εν συνέπεια για όλες τις ώρες στην μακροπρόθεσμη πρόβλεψη. Η καλύτερη περίπτωση βρέθηκε για 22 προηγούμενες τιμές και 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Σε αυτή το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $22,92 \text{ W/m}^2$, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,983. Αυτό το σφάλμα είναι βελτιωμένο σε σχέση με πριν, αλλά και πάλι αρκετά μεγάλο, δεδομένου της σημασίας της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραγωγή.

Αρκετά βελτιωμένη σε σχέση με πριν είναι η πρόβλεψη δώρου και 24ωρου ορίζοντα. Κλείνοντας το βρόγχο στο νευρωνικό και μετατρέποντας το σε κλειστού βρόγχου μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ για το ίδιο ΤΝΔ (ίδιο αριθμό προηγούμενων τιμών και διαστάσεις κρυφού επιπέδου) όπως για την πρόβλεψη επόμενης ώρας στην πρόβλεψη δώρου ορίζοντα έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $37,34 \text{ W/m}^2$, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,958. Στην πρόβλεψη 24ώρου ορίζοντα έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $44,57 \text{ W/m}^2$, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,932. Η άσχημη απόδοση αλλά και η σημαντική βελτίωση μας πείθει ότι αξίζει να μελετηθεί περισσότερο αυτό το νευρωνικό δοκιμάζοντας διαφορετική εξωτερική είσοδο.

Αυτή τη φορά η ενίσχυση έρχεται από το λογισμικό βελτιστοποίησης παραγωγής-κόστους HOMER. Μια από τις δυνατότητες του HOMER είναι να εξάγει χρονοσειρές από τιμές ηλιακής ακτινοβολίας αρκεί να του δώσουμε μέση ημερήσια τιμή ακτινοβολίας, είτε το μέσο δείκτη διαύγειας του ουρανού σε συνδυασμό με το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής όπως ακριβώς περιγράψαμε στην ενότητα 6.2. Έτσι θέτουμε γεωγραφικό πλάτος 35.5280° και γεωγραφικό μήκος 24.0701° (τιμές που αντιστοιχούν στο Πολυτεχνείο Κρήτης) και τον δείκτη διαύγειας ουρανού, $k_T=1$, (δηλαδή πλήρης καθαρός ουρανός) και το HOMER μας δίνει μια χρονοσειρά από 8760 τιμές που αντιστοιχούν στις ώρες ενός έτους.

Έτσι λοιπόν σαν εξωτερική είσοδο στο μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ με εξωτερική είσοδο θα χρησιμοποιήσουμε τη χρονοσειρά που πήραμε από το HOMER καθώς και την προηγούμενη με τις τιμές της ημερήσιας ώρας, με τις υπόλοιπες παραμέτρους ίδιες. Το νευρωνικό αυτή τη φορά θα έχει σαν μια επιπλέον είσοδο την τιμή που θα είχε η ακτινοβολία για κάθε ώρα αν ο ουρανός ήταν πλήρως διαυγής. Οπότε υποθέτουμε ότι αυτό θα βελτιώσει πολύ την απόδοση του ΤΝΔ κάτι που αποδείχτηκε στην πράξη. Για μια 1 μπροστά πρόβλεψη η καλύτερη περίπτωση βρέθηκε για 18 προηγούμενες τιμές και 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Σε αυτή το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $33,14 \text{ W/m}^2$, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,969. Αυτό το σφάλμα είναι αρκετά μεγάλο και μάλιστα μεγαλύτερο από του προηγούμενου ΤΝΔ δεν μας αφήνει και πολύ ικανοποιημένους. Όμως στην πρόβλεψη δώρου ορίζοντα έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $35,54 \text{ W/m}^2$, η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,958 (για 20 προηγούμενες τιμές και 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο). Στην πρόβλεψη 24ώρου ορίζοντα έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με $38,09 \text{ W/m}^2$, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,947 (για 22 προηγούμενες τιμές και 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο). Παρατηρούμε δηλαδή ότι το νευρωνικό μας τώρα κάνει καλύτερη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη αλλά χειρότερη βραχυπρόθεσμη. Σχηματίζει πιο καλά την καμπύλη για ώρες μπροστά αλλά απ ότι φαίνεται επειδή η τιμή της ακτινοβολίας χωρίς καθόλου σύννεφα είναι πολύ μεγαλύτερη από την κανονική, ειδικά στην περίπτωση του χειμώνα στην πρόβλεψη επόμενης ώρας, η επιρροή από αυτή την είσοδο είναι μεγάλη οπότε και χειρότερο το αποτέλεσμα.

Μια ακόμα ιδέα είναι να βρούμε μια χρονοσειρά από τιμές ακτινοβολίας που να είναι πιο κοντά στις πραγματικές μιας και η χρήση των τιμών υπό καθαρό ουρανό βοήθησε αρκετά, πιο κοντινές τιμές θα βελτιώσουν και άλλο την απόδοση του ΤΝΔ.

Από την TOTEE_{xii} βρίσκουμε δεδομένα για τη τιμή της μέσης μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή των Χανίων και ακολουθούμε ακριβώς την διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω στην ενότητα 6.2. Από την μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία υπολογίσουμε την μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία και την εισάγουμε στο λογισμικού βελτιστοποίησης παραγωγής-κόστους HOMER Energy. Αυτή τη χρονοσειρά την επεξεργαζόμαστε με ένα απλό matlab script ώστε η καμπύλη ηλιακής ακτινοβολίας να είναι ίδια για κάθε μέρα ίδιου μήνα, όπως είναι στο profile view του HOMER. Δηλαδή τιμές ακτινοβολίας που κατά μέσο όρο περιμένουμε να μετρήσουμε για τις αντίστοιχες 8760 ώρες του έτους!

TNA	1 ώρα μετά	6 ώρες μετά	24ωρες μετά
NAR	23,11	39,94	56,57
NARX (με ώρα ημέρας)	22,92	37,34	44,57
NARX (με ώρα ημέρας και υπόθεση $kT=1$)	33,14	35,54	38,09
NARX (με ώρα ημέρας + K_T βασισμένο στην TOTEE)	17,01	29,53	34,52

Πινάκας 6.1 Συγκεντρωτικός με ΜΑΕ σε W/m^2 , των βέλτιστων περιπτώσεων για κάθε τύπου TNA που δοκιμάστηκε

6.3.2 Πρόβλεψη Έντασης Ηλιακής Ακτινοβολίας επόμενης ώρας

Χρησιμοποιώντας λοιπόν μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομικά (auto-regressive) με εξωτερική είσοδο την ημερήσια ώρα και την χρονοσειρά που πήραμε από το HOMER (εισάγοντας το μέσο συντελεστή αιθριότητας από την TOTEE _{xii}), όπως μόλις τα περιγράψαμε κάνουμε δοκιμές να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο. Δοκιμάζουμε από 2 μέχρι 24 προηγούμενες τιμές με βήμα 2 και από 6 μέχρι 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο με βήμα 6.

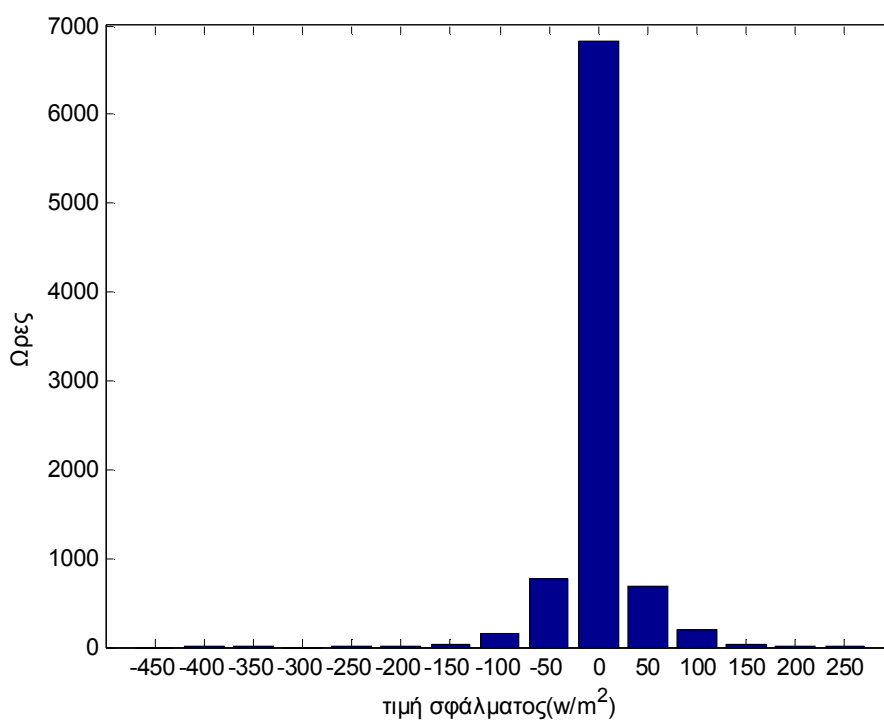
	6	12	18	24
2	19,53	18,91	18,76	17,67
4	19,98	18,89	18,56	17,01
6	18,13	18,11	18,24	18,79
8	19,75	19,84	19,94	20,51
10	27,69	27,37	22,68	27,21
12	25,11	18,66	30,15	31,85
14	24,19	19,79	18,01	28,40
16	19,75	18,23	18,28	21,01
18	19,42	18,13	19,03	19,59
20	18,80	24,67	17,97	18,27
22	18,42	18,39	18,05	18,27
24	18,31	18,17	19,37	18,47

Πινάκας 6.2 Μέσο απόλυτο σφάλμα (W/m^2) για αριθμό προηγούμενων τιμών (γραμμές) και αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου (στήλες)

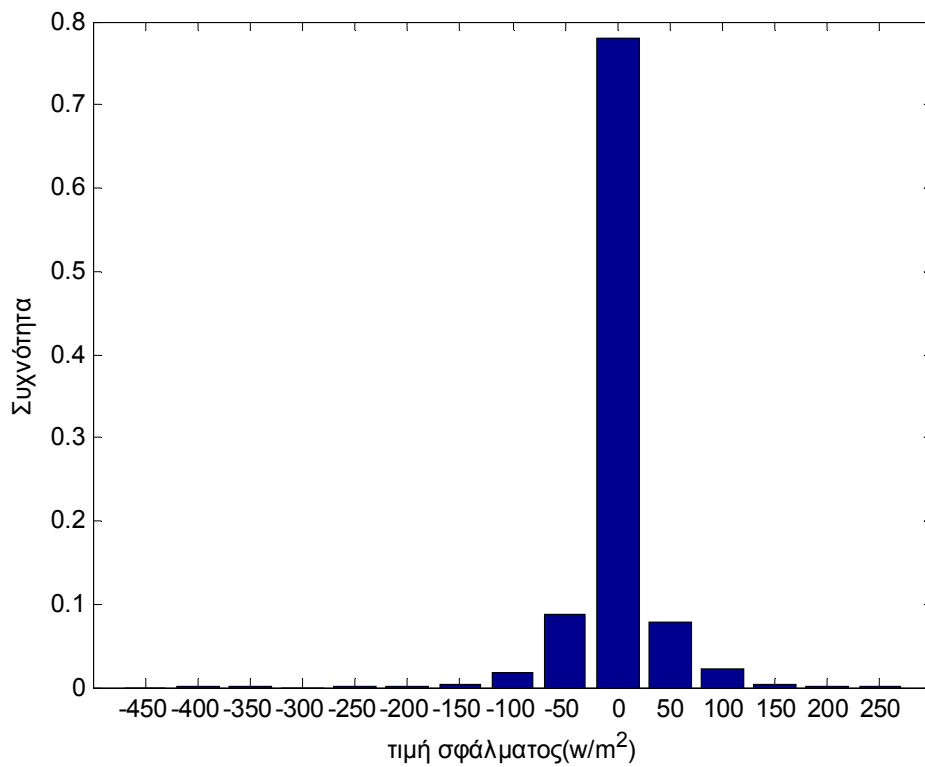
	6	12	18	24
2	0,989	0,990	0,990	0,990
4	0,989	0,990	0,990	0,991
6	0,990	0,991	0,990	0,990
8	0,989	0,989	0,989	0,989
10	0,978	0,980	0,986	0,980
12	0,981	0,990	0,975	0,972
14	0,982	0,989	0,991	0,981
16	0,989	0,990	0,990	0,987
18	0,989	0,991	0,990	0,989
20	0,990	0,982	0,991	0,990
22	0,990	0,990	0,991	0,991
24	0,991	0,991	0,990	0,990

Πίνακας 6.3 Γραμμική παλινδρόμηση για αριθμό προηγούμενων τιμών (γραμμές) και αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου (στήλες)

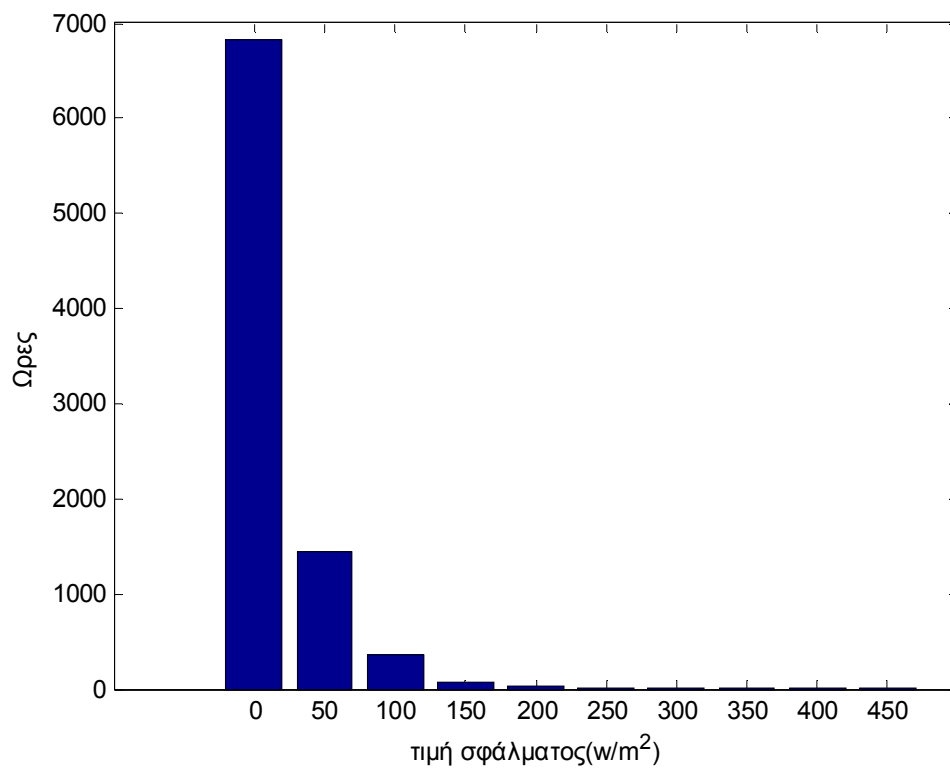
Το δίκτυο με την καλύτερη απόδοση φαίνεται να είναι αυτό με 4 προηγούμενες τιμές της χρονοσειράς στόχου και 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Μέσο απόλυτο σφάλμα $17,01\text{W/m}^2$ και γραμμική παλινδρόμηση 0,991 για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



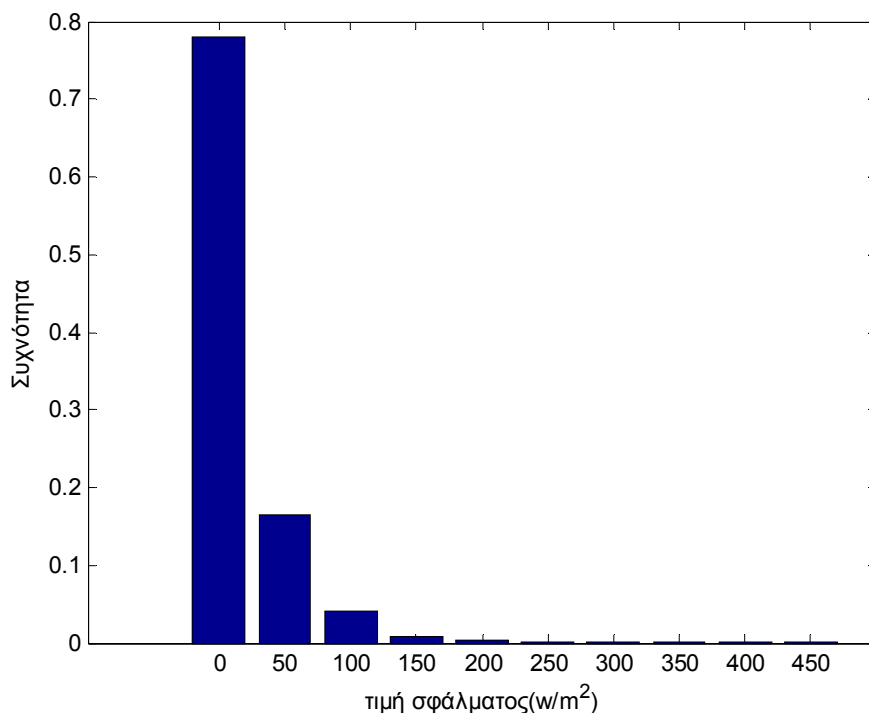
Εικόνα 6.8 Ιστογράμμο σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας επόμενης ώρας



Εικόνα 6.9 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας επόμενης ώρας



Εικόν
α 6.10 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας επόμενης ώρας



Εικόνα 6.11

Ιστογράμμο συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας επόμενης ώρας

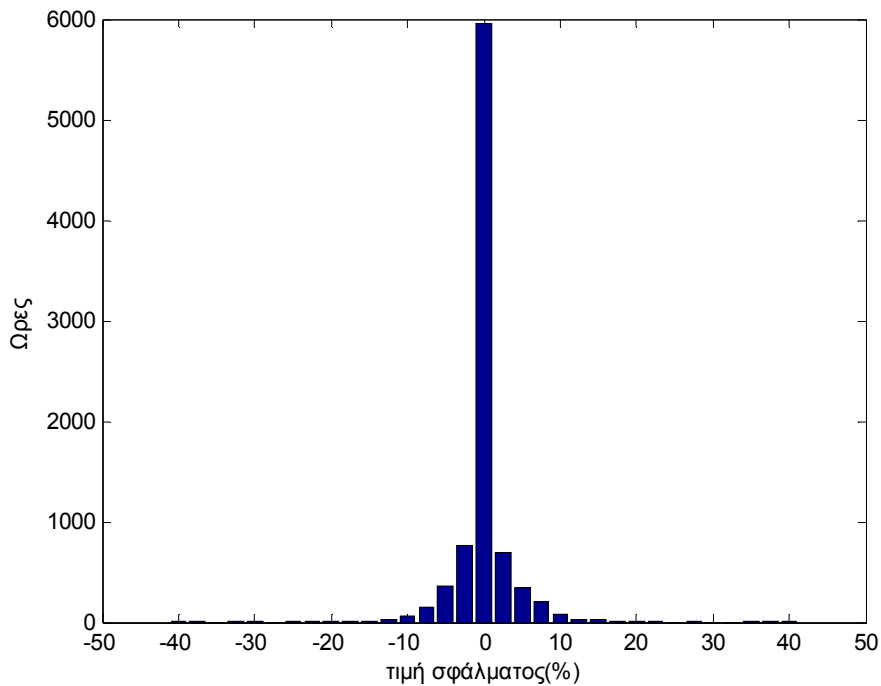
Να επισημάνουμε ότι, για λόγους ρεαλισμού, σφάλματα πρόβλεψης ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία οδηγούν σε Φ/B παραγωγή μικρότερη του $1.125W(0.5\%)$ κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του $0 W/m^2$ κάτι που συμβαίνει 5016 φορές δηλαδή στο 57.3% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 1929 φορές (22%) υποεκτιμούμε την τιμή της έντασης της ακτινοβολίας ενώ 1815 φορές (20,7%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ -53 και $57W/m^2$. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -408 και $-53 W/m^2$ και μεταξύ των 57 και $428W/m^2$.

Αν θέλουμε να το δούμε χωριστά σε μια τυχαία καλοκαιρινή μέρα(πχ 1^η Ιουλίου), όπου το καλοκαίρι δεν έχουμε απότομες εμφανίσεις νεφώσεων, το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι $4,72 W/m^2$ (συνήθως υποεκτιμούμε), ενώ σε μια τυχαία χειμωνιάτικη μέρα με απότομες άλλες των σύννεφων(πχ 15^η Ιανουαρίου) το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι $19,01 W/m^2$ (συνήθως υπερεκτιμούμε). Στην διάρκεια των καλοκαιρινών ημερών στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -25 και $12W/m^2$, ενώ στην διάρκεια των χειμερινών ημερών στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -58 και $70W/m^2$. Άρα όπως ήταν αναμενόμενο το νευρωνικό είναι πολύ καλό, σχεδόν αλάνθαστο σε μέρες με σταθερό καιρό αλλά σε μέρες με μεγάλη αστάθεια είναι χειρότερο από τη μέση περίπτωση. Ακόμα όμως και για τις ασταθείς μέρες το αποτέλεσμα είναι πολύ ικανοποιητικό.

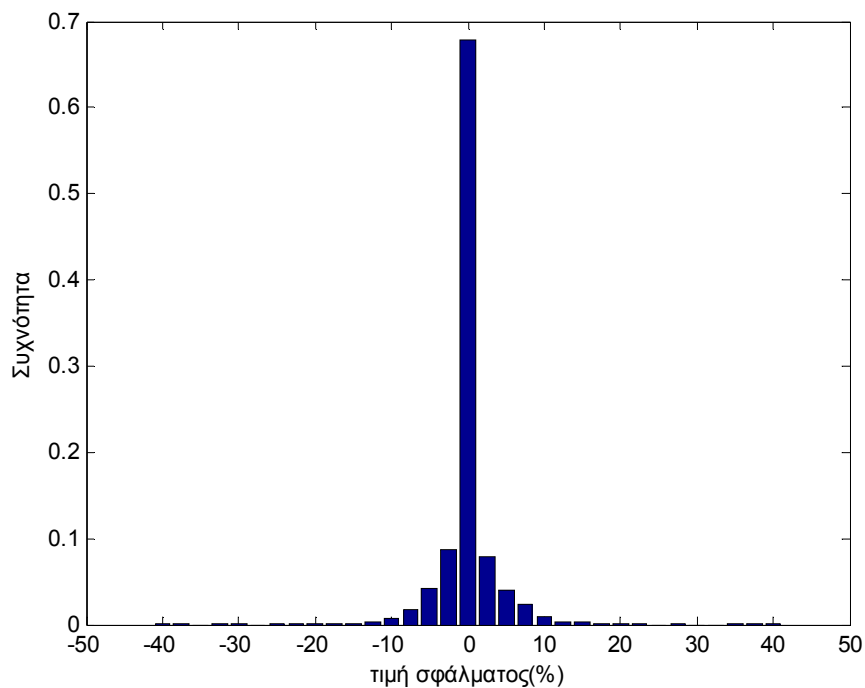
6.3.2.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στην πρόβλεψη επόμενης ώρας έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

Όμως στην εργασία αυτή δεν μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της τιμής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας άμεσα. Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/B οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της έντασης της ηλιακής

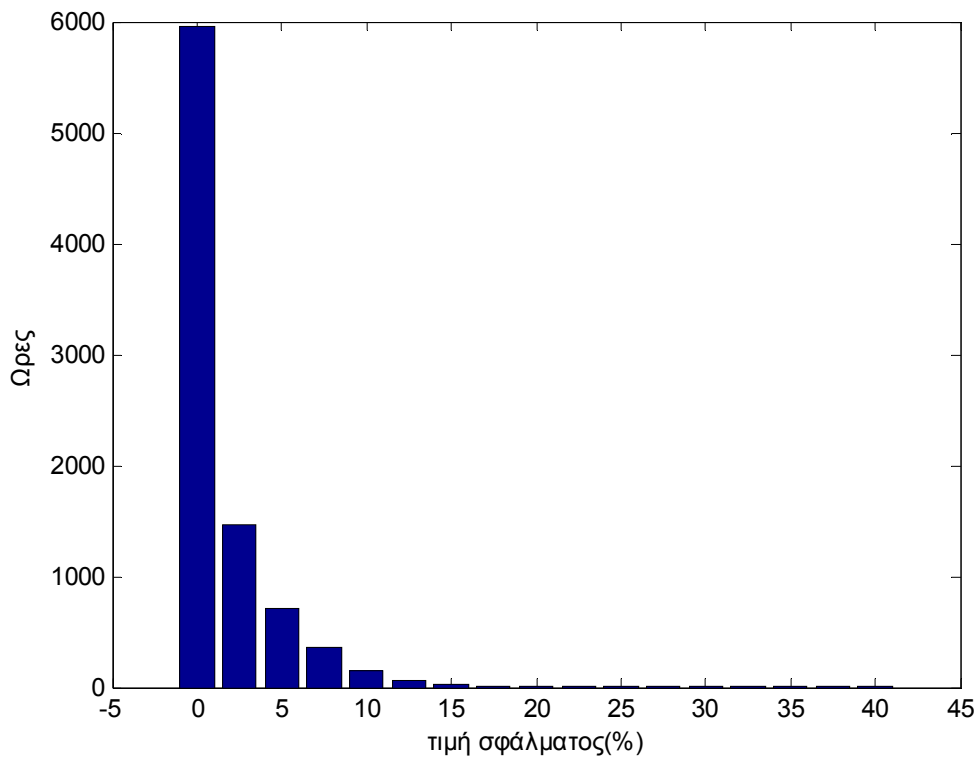
ακτινοβολίας επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/Β. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ταχύτητα του ανέμου και την θερμοκρασία σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/Β είναι 3,56W, δηλαδή το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα είναι 1,5%, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



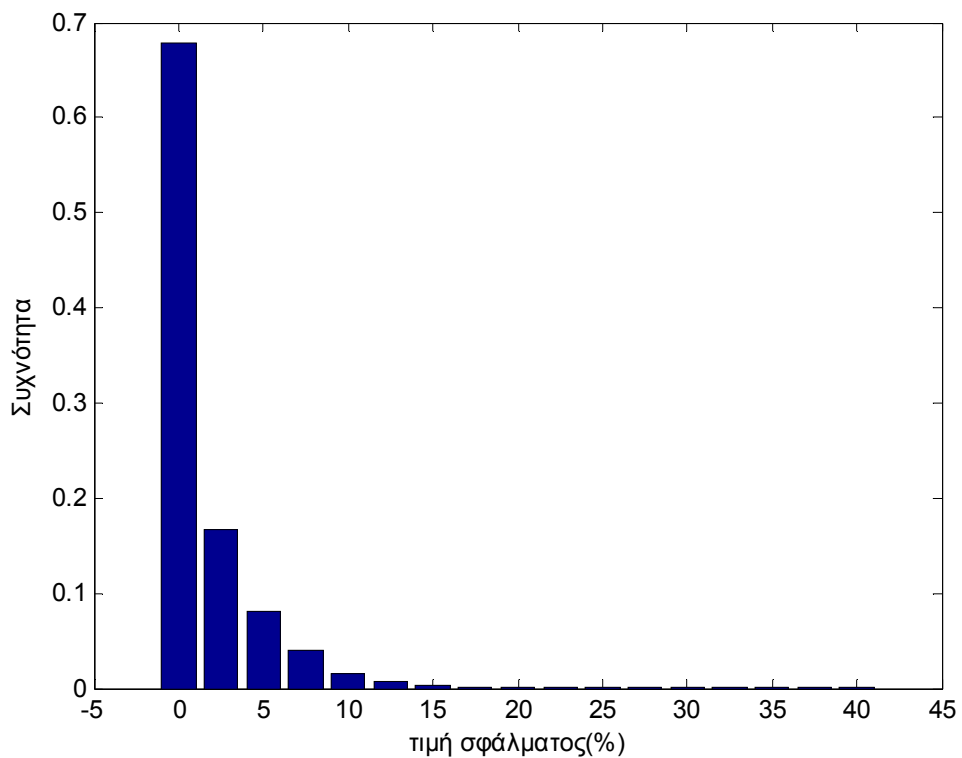
Εικόνα 6.12 Ιστογράμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας επόμενης ώρας



Εικόνα 6.13 Ιστογράμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας επόμενης ώρα



Εικόν
α 6.14 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας επόμενης



ώρας
Εικόνα 6.15 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας επόμενης ώρας

Στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ των -11,3(-5%) και 12,4(5.5%) W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -87.9 και -11.3 W και μεταξύ των 12.3 και 88.8 W.

Αν θέλουμε να το δούμε χωριστά και την παραγωγή. Για την ίδια καλοκαιρινή μέρα(1^η Ιουλίου), το μέσο απόλυτο σφάλμα παραγωγής είναι 1,02 W(0,5%), ενώ για την ίδια χειμωνιάτικη μέρα με απότομες άλλες των σύννεφων(15^η Ιανουαρίου) το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι 4,03 W(1,8%). Στην διάρκεια των καλοκαιρινών ημερών στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -3,6 και 1,7 W, ενώ στην διάρκεια των χειμερινών ημερών στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -8,3 και 10W.

6.3.3 Πρόβλεψη Έντασης Ηλιακής Ακτινοβολίας με 6ωρο Οριζόντα

Με χρήση ομοίων με τα προηγούμενα μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομικά ΤΝΔ με εξωτερική είσοδο την ημερήσια ώρα και την χρονοσειρά που πήραμε από το HOMER (εισάγοντας το μέσο συντελεστή αθριότητας από την TOTEE_{xii}) θα κάνουμε εκτίμηση της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και για περισσότερες από μια ώρες μπροστά. Όμως επειδή αυτά τα θέλουν σαν είσοδο την τιμή της έντασης τις ακτινοβολίας μια ώρα πριν την ώρα για την οποία γίνεται η εκτίμηση, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σαν είσοδο την εκτίμηση αυτής της τιμής που έχει προκύψει από την έξοδο του προηγούμενου ΤΝΔ. Έτσι αυτό που κάνουμε είναι να κλείσουμε το βρόχο και να ανατροφοδοτούμε την έξοδο στην είσοδο. Με αυτό τον τρόπο προβλέπουμε τιμές της έντασης της ακτινοβολίας μια ώρα πιο μελλοντικά μετά από κάθε ανατροφοδότηση. Κάνουμε πάλι καινούργιες δοκιμές για να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο αυτή τη φορά για την πρόβλεψη 6ώρου οριζόντα. Δοκιμάζουμε από 2 μέχρι 24 προηγούμενες τιμές με βήμα 2 και από 6 μέχρι 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο με βήμα 6.

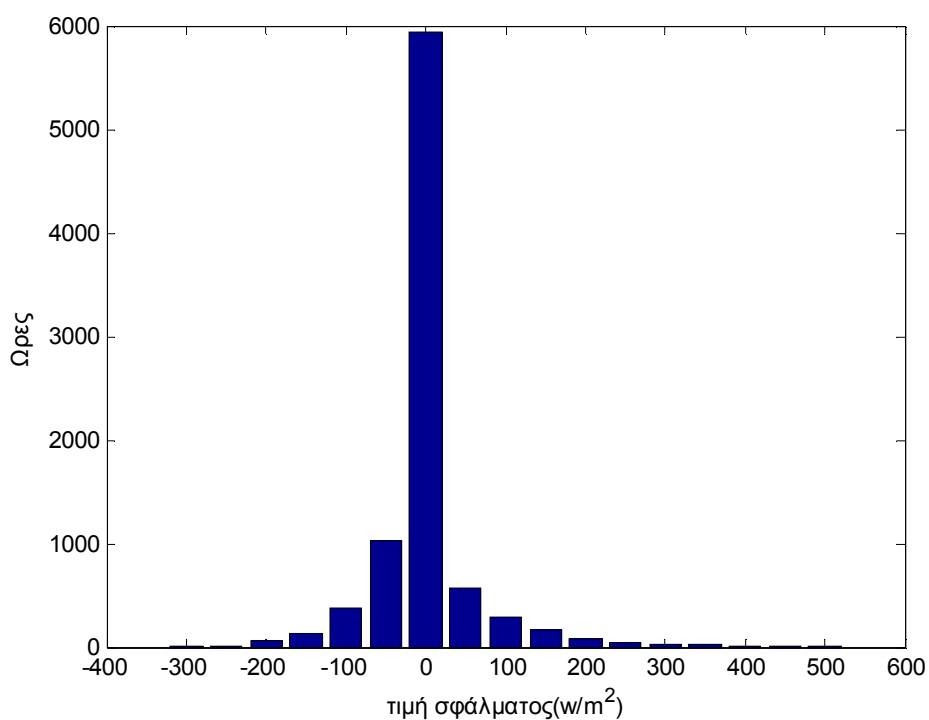
	6	12	18	24
2	36.64	37.22	35.43	35.60
4	39.28	36.57	35.21	34.76
6	37.25	34.09	36.37	33.25
8	39.50	38.85	34.29	34.36
10	33.39	38.01	33.69	33.86
12	37.16	33.51	31.98	35.39
14	35.92	35.34	32.57	32.98
16	40.90	33.58	30.27	30.37
18	35.15	31.05	29.53	31.14
20	31.66	30.96	32.28	30.33
22	31.09	30.52	30.64	30.80
24	30.77	30.74	31.09	30.02

Πίνακας 6.4 Μέσο απόλυτο σφάλμα(W/m²) για αριθμό προηγούμενων τιμών (γραμμές) και αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου (στήλες)

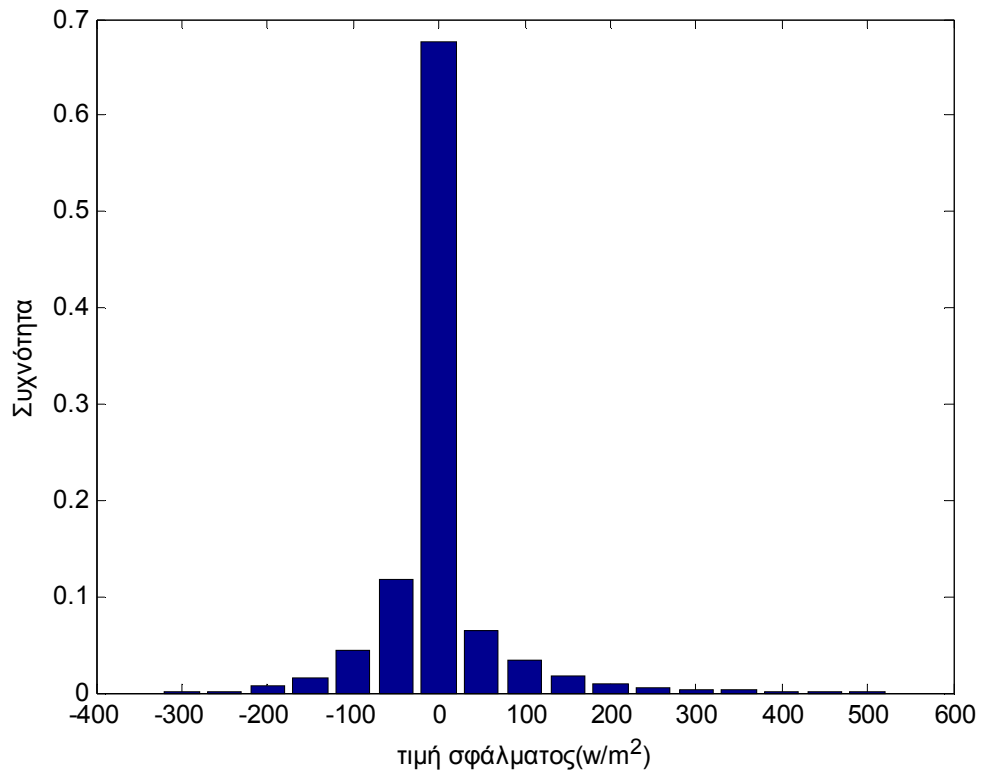
	6	12	18	24
2	0.951	0.9521	0.955	0.955
4	0.948	0.952	0.955	0.956
6	0.950	0.956	0.951	0.957
8	0.939	0.944	0.955	0.955
10	0.957	0.945	0.956	0.956
12	0.945	0.956	0.960	0.953
14	0.947	0.953	0.960	0.959
16	0.939	0.956	0.965	0.965
18	0.952	0.964	0.967	0.966
20	0.963	0.964	0.963	0.967
22	0.963	0.965	0.966	0.967
24	0.964	0.965	0.966	0.966

Πίνακας 6.5 Γραμμική παλινδρόμηση για αριθμό προηγούμενων τιμών (γραμμές) και αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου (στήλες)

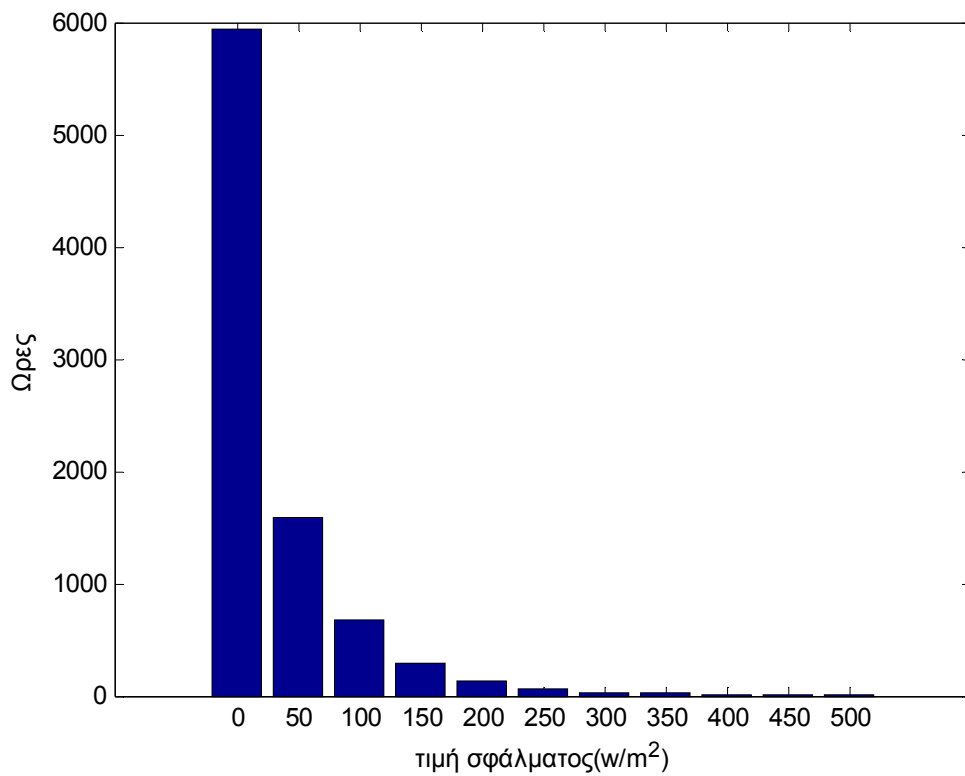
Το δίκτυο με την καλύτερη απόδοση φαίνεται να είναι αυτό με 18 προηγούμενες τιμές της χρονοσειράς στόχου και 18 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Μέσο απόλυτο σφάλμα 29,54 W/m² και γραμμική παλινδρόμηση 0,967 για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



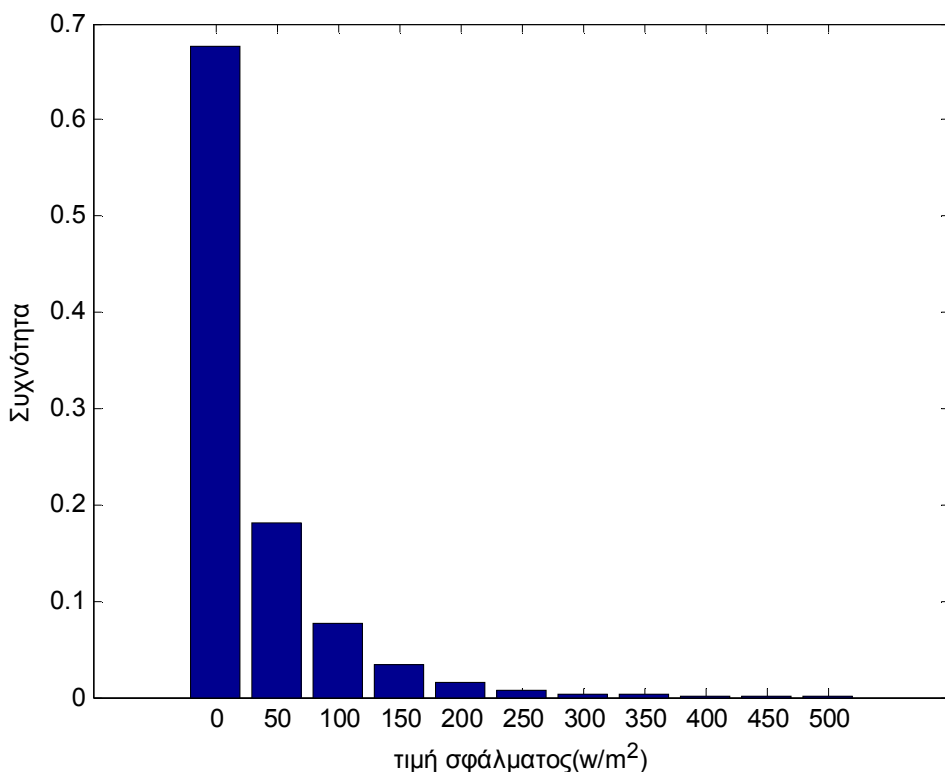
Εικόνα 6.16 Ιστόγραμμα σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας δώρου ορίζοντα



Εικόνα 6.17 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας δώρου οριζοντα



Εικόνα 6.18 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας δώρου οριζοντα



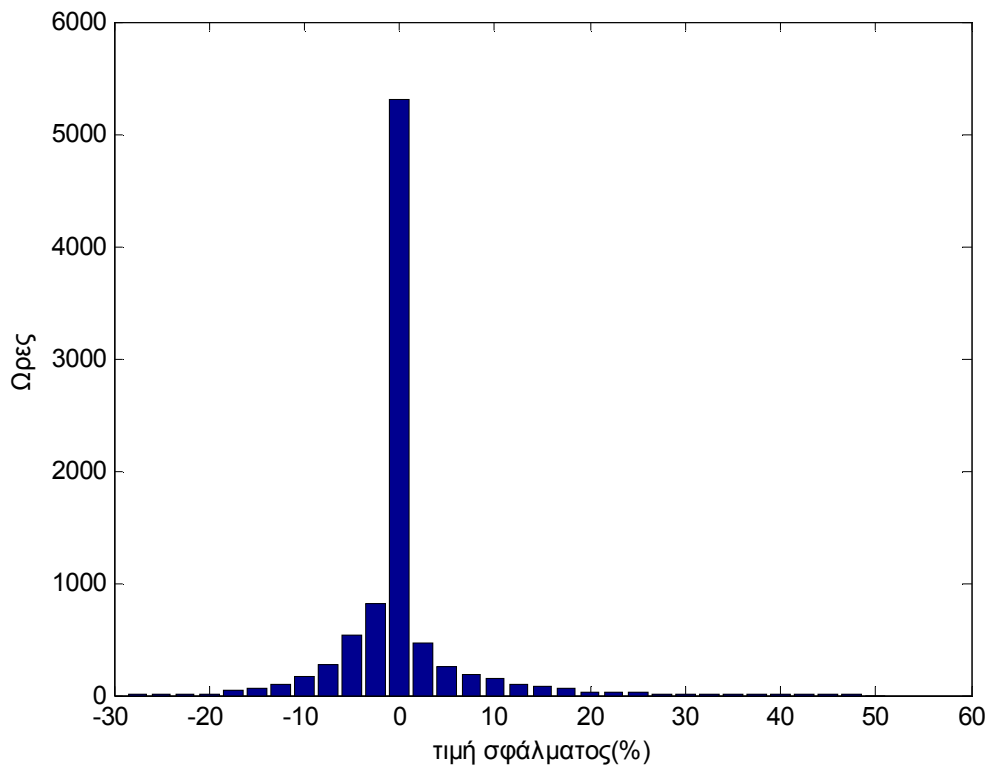
Εικό

να 6.19 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας βώρου ορίζοντα

Να θυμίσουμε ότι και πάλι, για λόγους ρεαλισμού, σφάλματα πρόβλεψης ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία οδηγούν σε Φ/B παραγωγή μικρότερη του $1.125W(0.5\%)$ κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του $0 W/m^2$ κάτι που συμβαίνει 4768 φορές δηλαδή στο 54,4% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 2373 (27,1%) υποεκτιμούμε την τιμή της έντασης της ακτινοβολίας ενώ 1619 (18,5%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ $-90,2$ και $105,3 W/m^2$. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-305,2$ και $-90,2 W/m^2$ και μεταξύ των $105,3$ και $499,3W/m^2$.

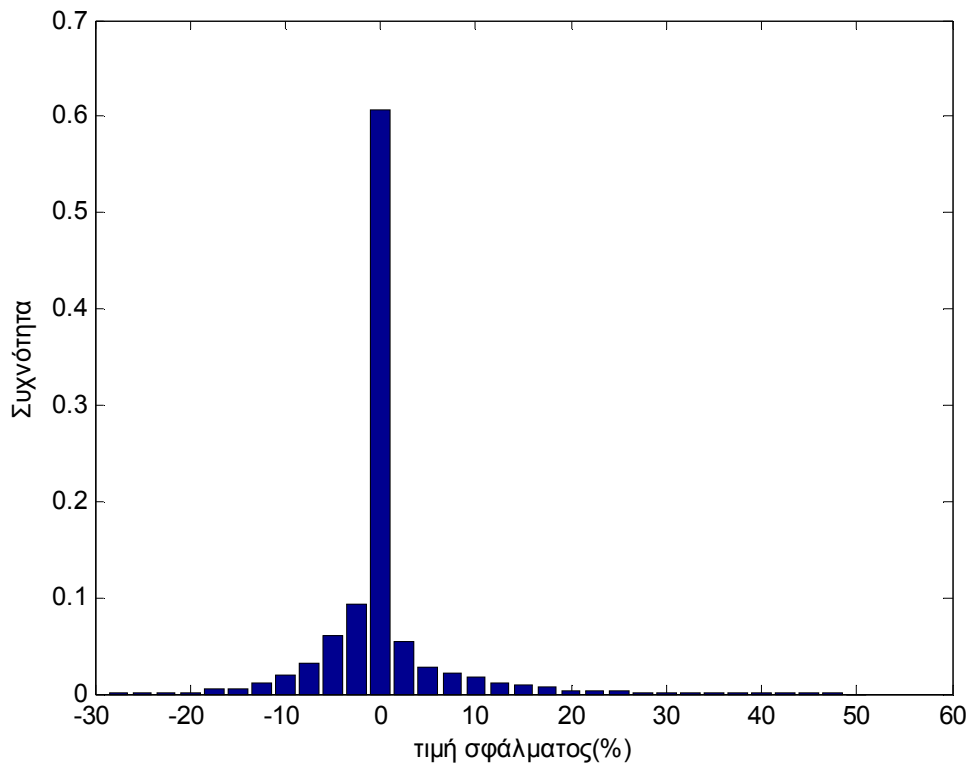
6.3.3.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στον βωρο ορίζοντα πρόβλεψης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

Όμως στην εργασία αυτή υπενθυμίζουμε δεν μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της τιμής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας άμεσα. Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/B οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/B . Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ταχύτητα του ανέμου και την θερμοκρασία σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/B είναι $6.24W$, δηλαδή το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα είναι 2,7%, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



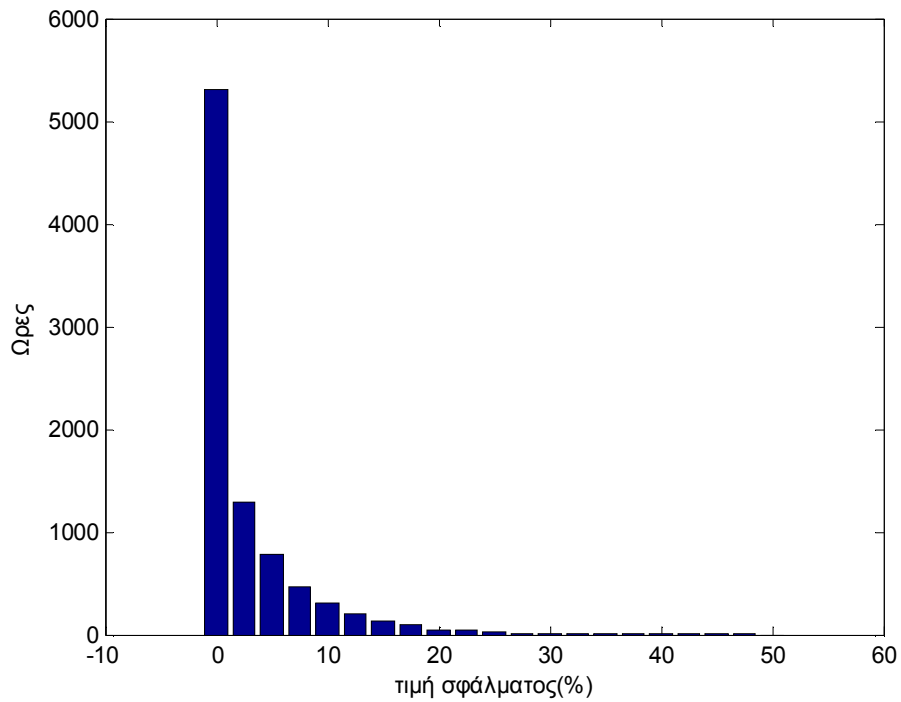
Εικό

να 6.20 Ιστογράμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας δώρου ορίζοντα

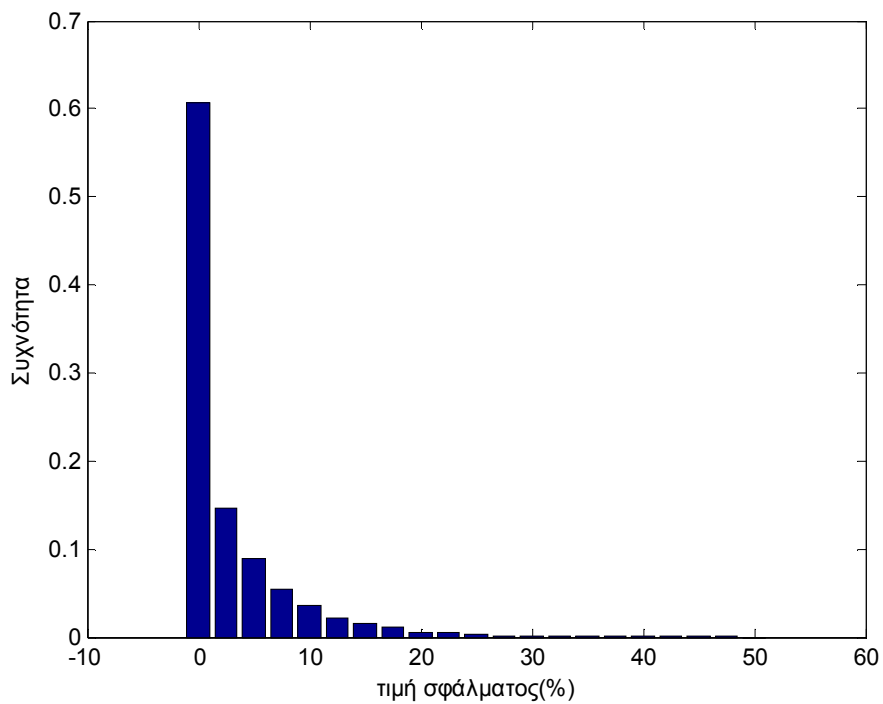


Εικό

να 6.21 Ιστογράμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας δώρου ορίζοντα



Εικόνα 6.22 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας δώρου ορίζοντα



Εικόνα 6.23 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας δώρου ορίζοντα

Στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -18,2(-8.1%) και 22,8(10.1%) W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -59,9 και -18.2 W και μεταξύ των 22.8 και 108.7 W.

6.3.4 Πρόβλεψη Έντασης Ηλιακής Ακτινοβολίας με 24ωρο Ορίζοντα

Ομοίως όπως δουλέψαμε και με την πρόβλεψη 6ωρου ορίζοντα με τιμές έντασης ακτινοβολίας δουλεύουμε μέχρι να προβλέψουμε 24ωρο ορίζοντα, κάνοντας πάλι καινούργιες δοκιμές για να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο.

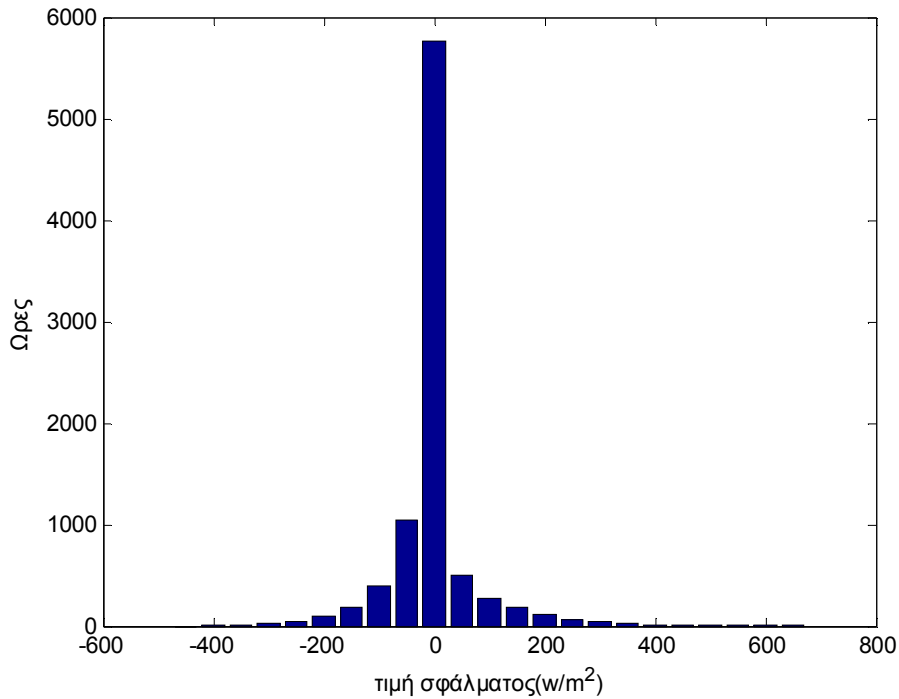
	6	12	18	24
2	38.02	37.93	36.32	35.42
4	37.24	36.71	35.32	35.25
6	37.57	35.50	35.43	35.08
8	36.96	35.88	35.58	36.12
10	36.13	35.84	35.34	35.58
12	35.79	36.01	36.49	34.52
14	36.01	35.80	36.04	35.82
16	38.50	36.47	36.22	36.98
18	36.64	36.55	38.38	37.12
20	35.87	35.60	40.43	34.86
22	36.21	36.49	37.23	35.00
24	36.59	37.74	36.39	37.40

Πίνακας 6.6 Μέσο απόλυτο σφάλμα(W/m²) για αριθμό προηγούμενων τιμών (γραμμές) και αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου (στήλες)

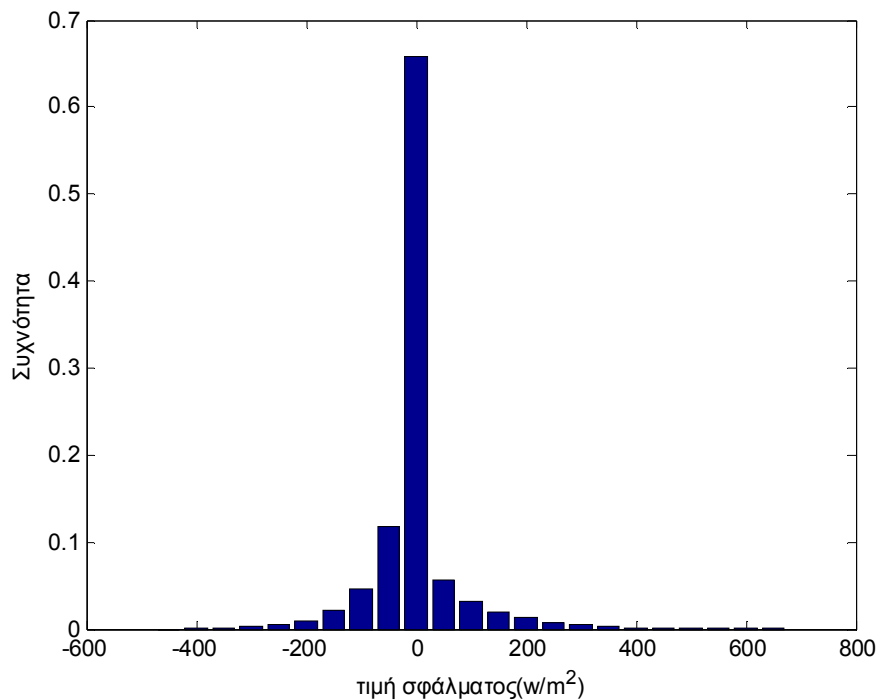
	6	12	18	24
2	0.9591	0.9601	0.9634	0.9644
4	0.9550	0.9623	0.9643	0.9644
6	0.9610	0.9645	0.9653	0.9654
8	0.9624	0.9636	0.9652	0.9654
10	0.9638	0.9638	0.9651	0.9655
12	0.9636	0.9641	0.9637	0.9674
14	0.9633	0.9644	0.9650	0.9650
16	0.9593	0.9634	0.9631	0.9625
18	0.9562	0.9644	0.9535	0.9644
20	0.9642	0.9654	0.9549	0.9673
22	0.9640	0.9650	0.9636	0.9691
24	0.9628	0.9639	0.9647	0.9621

Πίνακας 6.7 γραμμική παλινδρόμηση για αριθμό προηγούμενων τιμών (γραμμές) και αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου (στήλες)

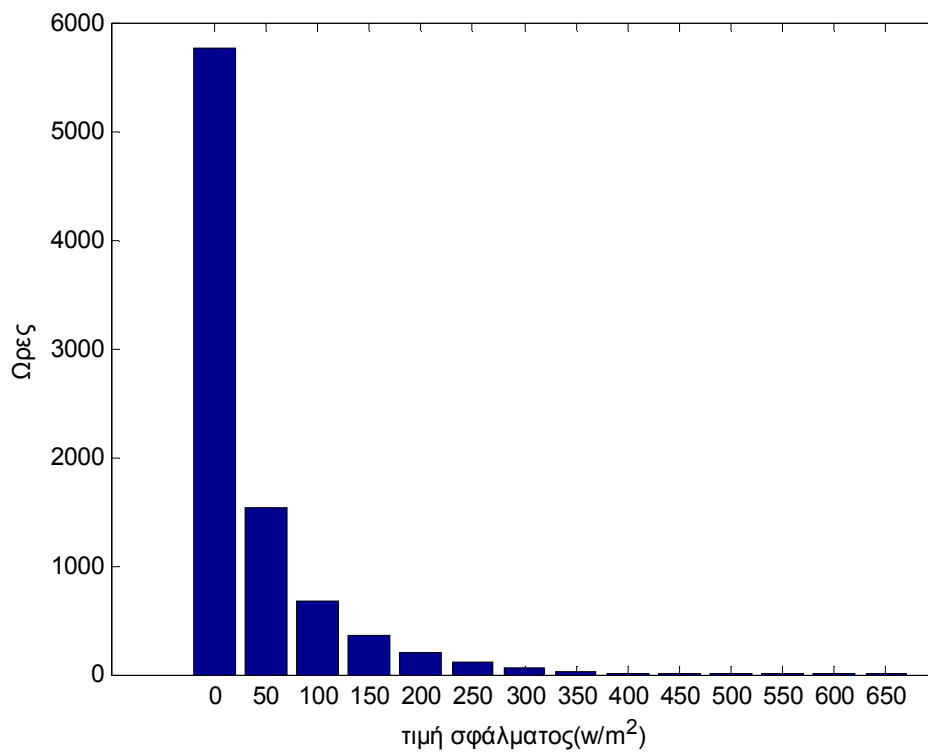
Το δίκτυο με την καλύτερη απόδοση φαίνεται να είναι αυτό με 12 προηγούμενες τιμές της χρονοσειράς στόχου και 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Μέσο απόλυτο σφάλμα $34,52 \text{ W/m}^2$ και γραμμική παλινδρόμηση $0,967$ για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



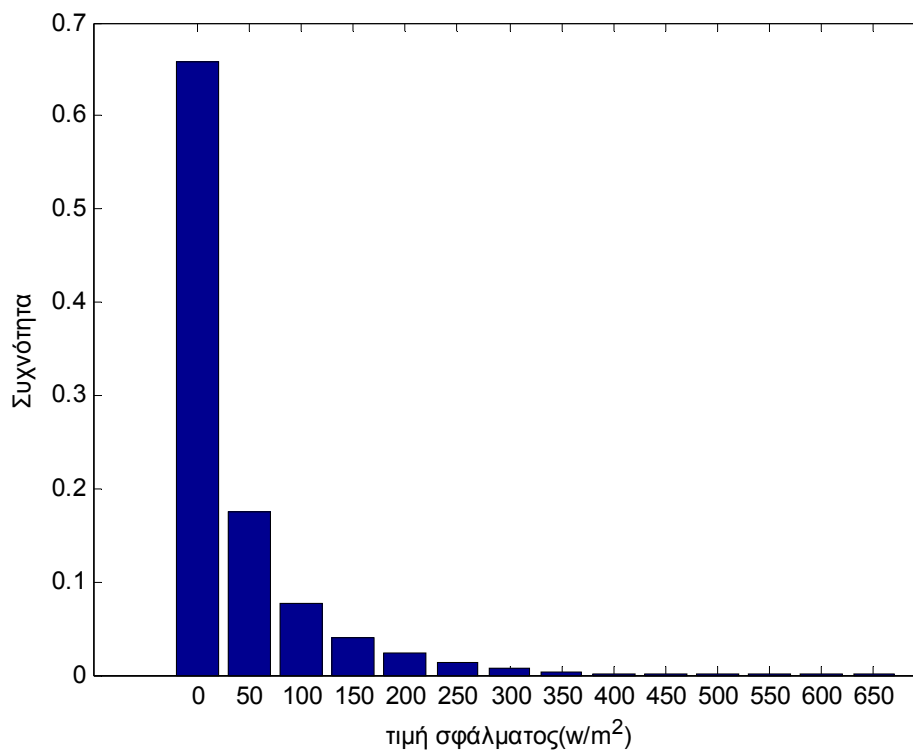
Εικόνα 6.24 Ιστόγραμμα σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας 24ώρου ορίζοντα



Εικόνα 6.25 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας 24ώρου ορίζοντα



Εικόνα 6.26 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας 24ώρου
οριζοντα

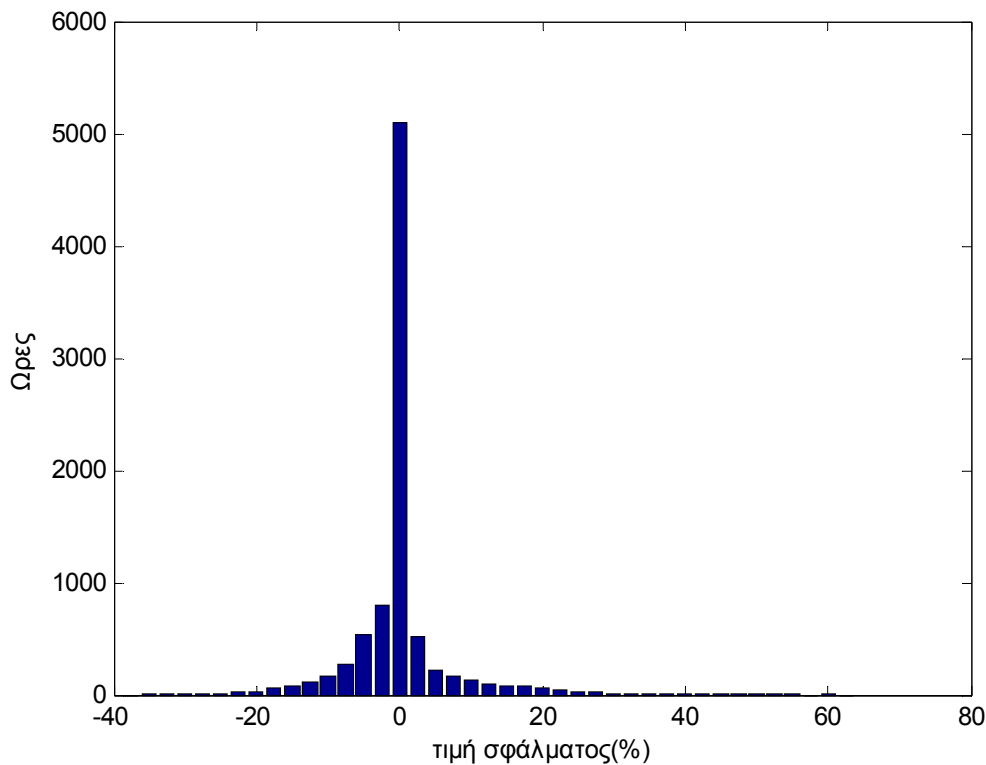


Εικόνα 6.27 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης έντασης
ακτινοβολίας 24ώρου οριζοντα

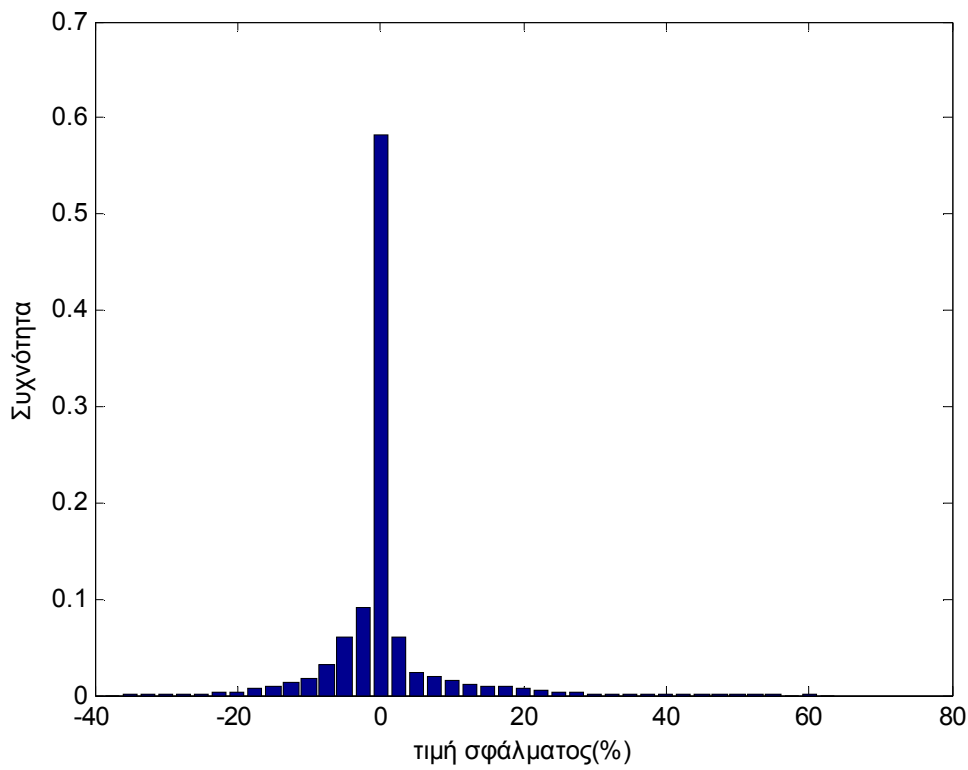
Να θυμίσουμε ότι και πάλι, για λόγους ρεαλισμού, σφάλματα πρόβλεψης ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία οδηγούν σε Φ/B παραγωγή μικρότερη του $1.125W(0.5\%)$ κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του $0 W/m^2$ κάτι που συμβαίνει 4628 φορές δηλαδή στο 52,8% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 2329 φορές (26,6%) υποεκτιμούμε την τιμή της έντασης της ακτινοβολίας ενώ 1802 (20,6%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ $-109,1$ και $126,2W/m^2$. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-403,6$ και $-109,1W/m^2$ και μεταξύ των $126,2$ και $641,9W/m^2$.

6.3.4.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

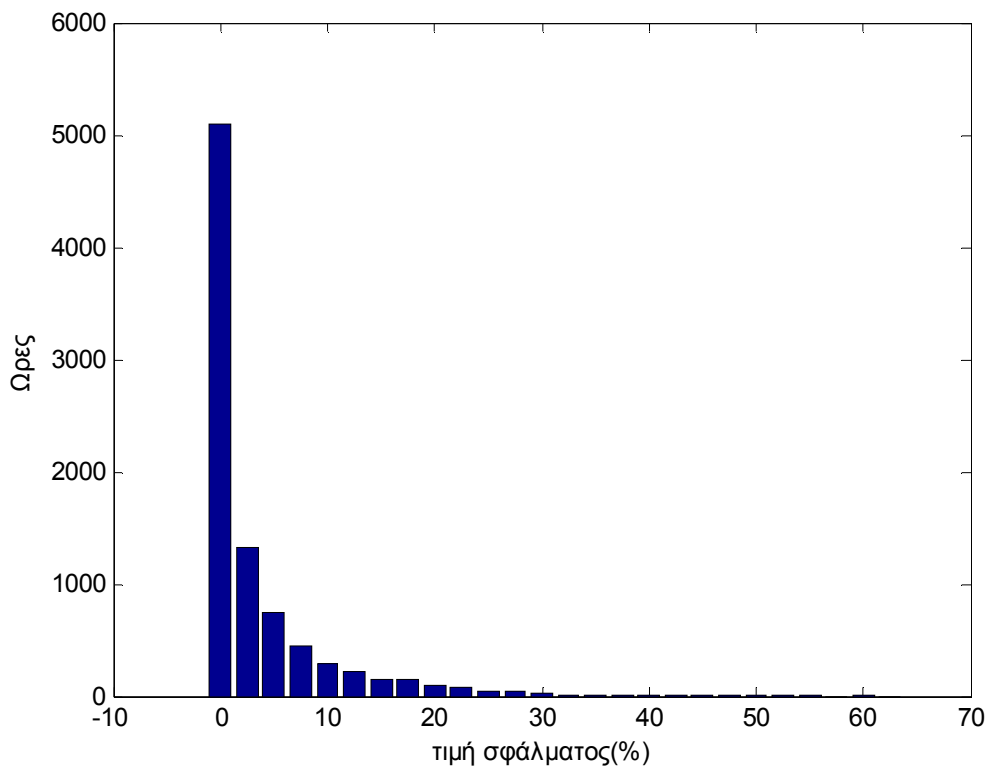
Όμως στην εργασία αυτή υπενθυμίζουμε δεν μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της τιμής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας άμεσα. Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/B οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/B . Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ταχύτητα του ανέμου και την θερμοκρασία σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/B είναι $7.52W$, δηλαδή το μέσο ποσοστιαίο σφάλμα είναι 3,3%, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



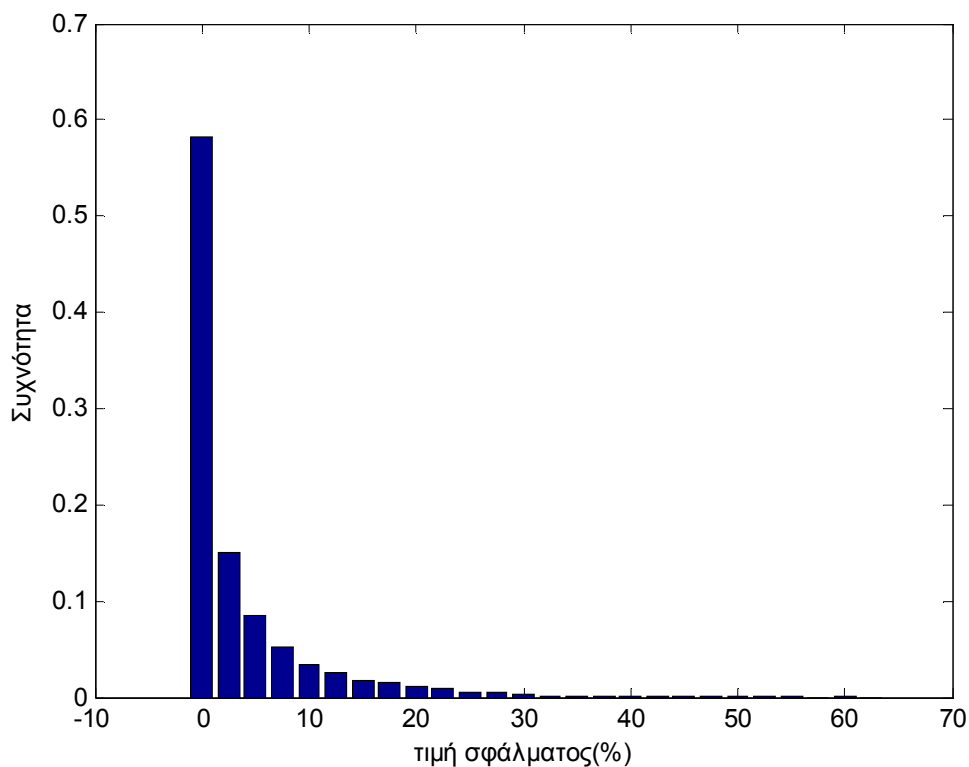
Εικόνα 6.28 Ιστογράμμο σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας 24ωρου ορίζοντα



Εικόνα 6.29 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας 24ωρου ορίζοντα



Εικόνα 6.30 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας 24ωρου ορίζοντα



Εικό

να 6.31 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας 24ωρου ορίζοντα

Στο 90% των περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -22,1(-9.8%) και 26,9 (11.9%) W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -80,3 και -22,1 W και μεταξύ των 26,9 και 137,7 W.

6.3.5 Γενικοί Συγκεντρωτικοί Πινάκες

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις σφαλμάτων εκτίμησης τιμής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζονται συγκεντρωμένες σε πινάκες.

	1 ώρα	6 ώρες	24 ώρες
MAE(W/m ²)	17	29.5	34.5
Μηδενικό σφάλμα(%)	57.3	54.4	52.8
Συχνότητα Υπερεκτίμησης(%)	20.7	18.5	20.6
Συχνότητα Υποεκτίμηση(%)	22	27.1	26.6
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (W/m ²)	[-53.1, 57.4]	[-90.2, 105.3]	[-109.1, 126.2]

Πίνακας 6.8 Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων εκτίμησης τιμής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

Επειδή μας ενδιαφέρει η πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β δίνουμε και τον πίνακα σφαλμάτων για την παραγωγή του Φ/Β, αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ταχύτητα του ανέμου και την θερμοκρασία σωστά.

	1 ώρα	6 ώρες	24 ώρες
MAPE (%)	1.5	2.7	3.3
Μηδενικό σφάλμα(<1.125W,%)	57.3	54.4	52.8
Συχνότητα Υπερεκτίμησης(%)	20.7	18.5	20.6
Συχνότητα Υποεκτίμηση(%)	22	27.1	26.6
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (W)	[-11.3, 12.4]	[-18.2, 22.8]	[-22.1, 26.9]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (%)	[-5, 5.5]	[-8, 10.1]	[-9.8, 11.9]

Πίνακας 6.9 Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων εκτίμησης παραγωγής που οφείλονται στην λανθασμένη εκτίμηση τιμής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

Όπως εύκολα διαπιστώνουμε η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η παραγωγή είναι σχεδόν ανάλογες τιμές. Όσο πιο καλή εκτίμηση στην τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας γίνει, τόσο πιο καλή αναλογικά πρόβλεψη στην παραγωγή έχουμε.

6.3.6 Υπολογισμοί σφαλμάτων μόνο στις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια οπότε και παραγωγή

Τα σφάλματα που αναλύαμε παραπάνω ήταν για όλες τις ώρες του έτους. Τώρα ας δούμε πως πάει το μοντέλο πρόβλεψης για τις ώρες που υπάρχει παραγωγή, που άλλωστε είναι και αυτές που μας ενδιαφέρουν.

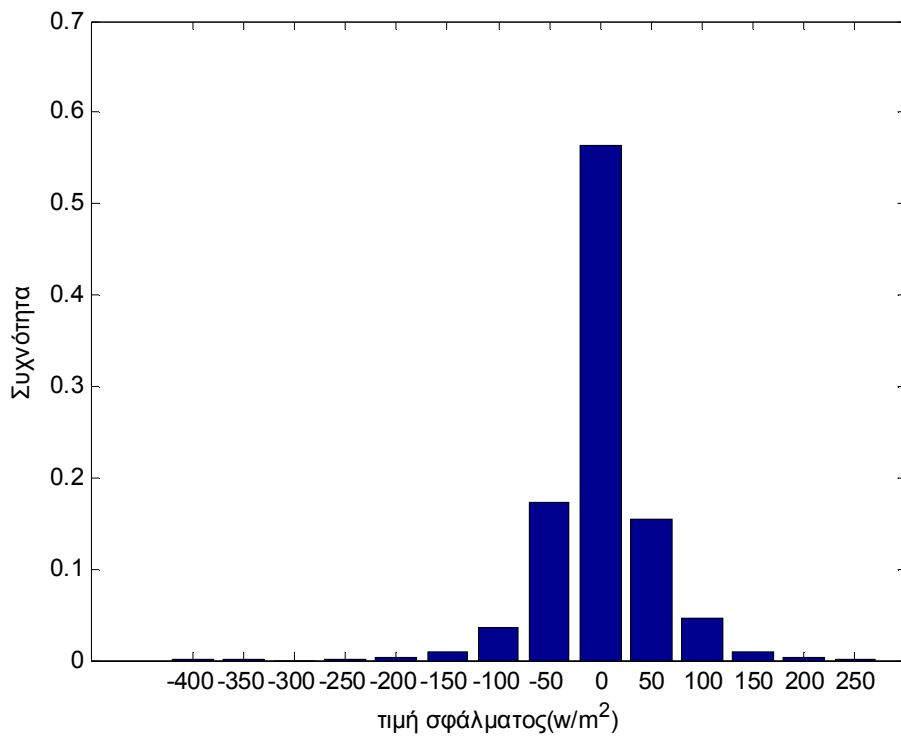
	1 ώρα	6 ώρες	24 ώρες
MAE(W/m ²)	33.1	59	71.4
Μηδενικό σφάλμα(%)	15.8	10.2	52.8
Συχνότητα Υπερεκτίμησης(%)	40.7	36.4	20.6
Συχνότητα Υποεκτίμηση(%)	43.5	53.4	26.6
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (W/m ²)	[-74.2, 80.8]	[-112.5, 160.8]	[-159.0, 191.5]

Πίνακας 6.10 Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων εκτίμησης τιμής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια

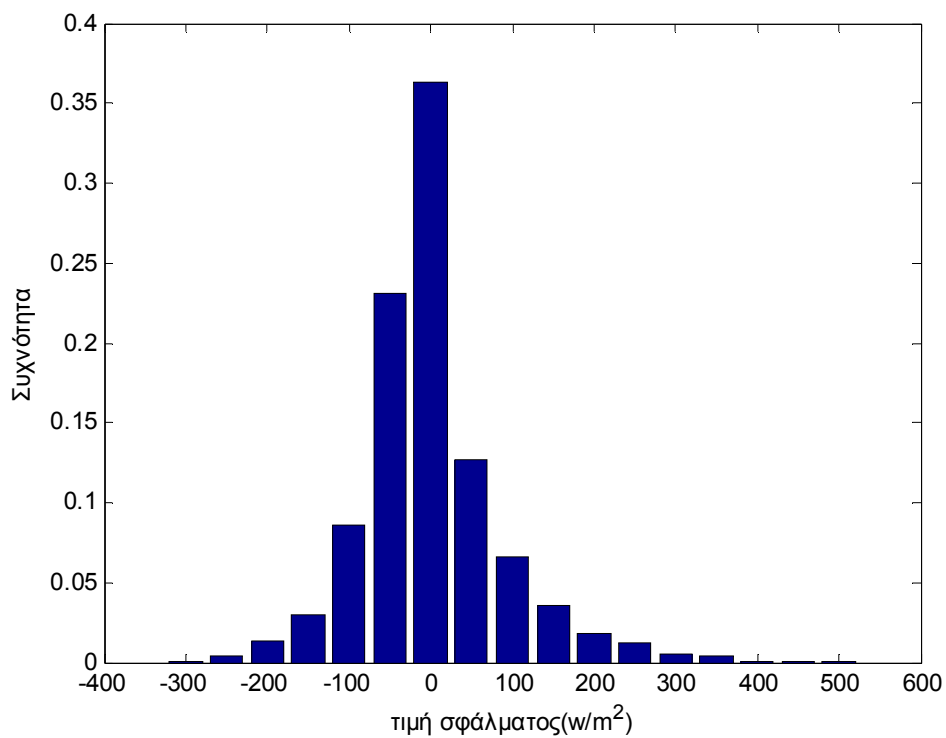
	1 ώρα	6 ώρες	24 ώρες
MAPE (%)	3.1	5.5	6.5
Μηδενικό σφάλμα(<1.125W,%)	15.8	10.2	7
Συχνότητα Υπερεκτίμησης(%)	40.7	36.4	40.5
Συχνότητα Υποεκτίμηση(%)	43.5	53.4	52.5
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (W)	[-15.8, 16.8]	[-25.2, 34.3]	[-32.7, 41.2]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (%)	[-7, 7.5]	[-11.2, 15.2]	[-14.5, 18.3]

Πίνακας 6.11 Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων εκτίμησης παραγωγής που οφείλονται στην λανθασμένη εκτίμηση τιμής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια

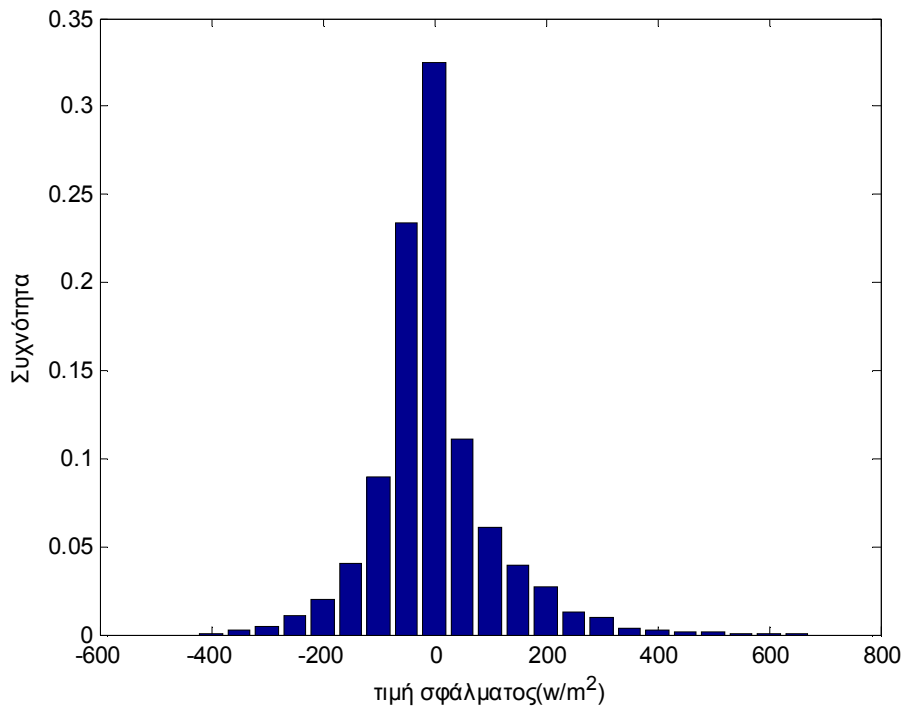
Ας δούμε και τα ιστογράμματα σφαλμάτων πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια:



Εικόνα 6.32 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας 1 ώρα μπροστά μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια

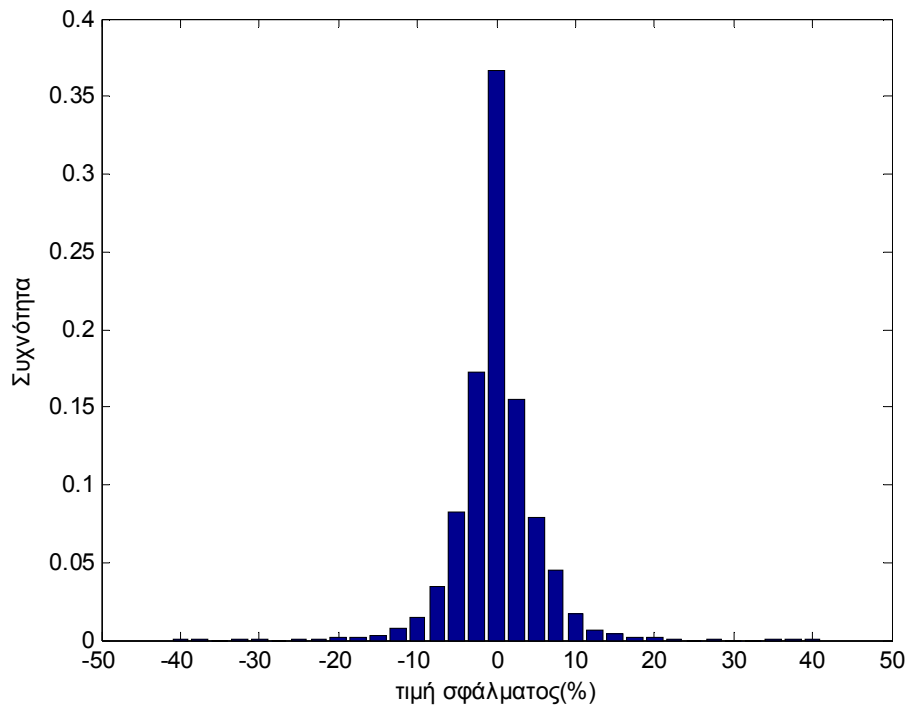


Εικόνα 6.33 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας 6ώρου ορίζοντα μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια

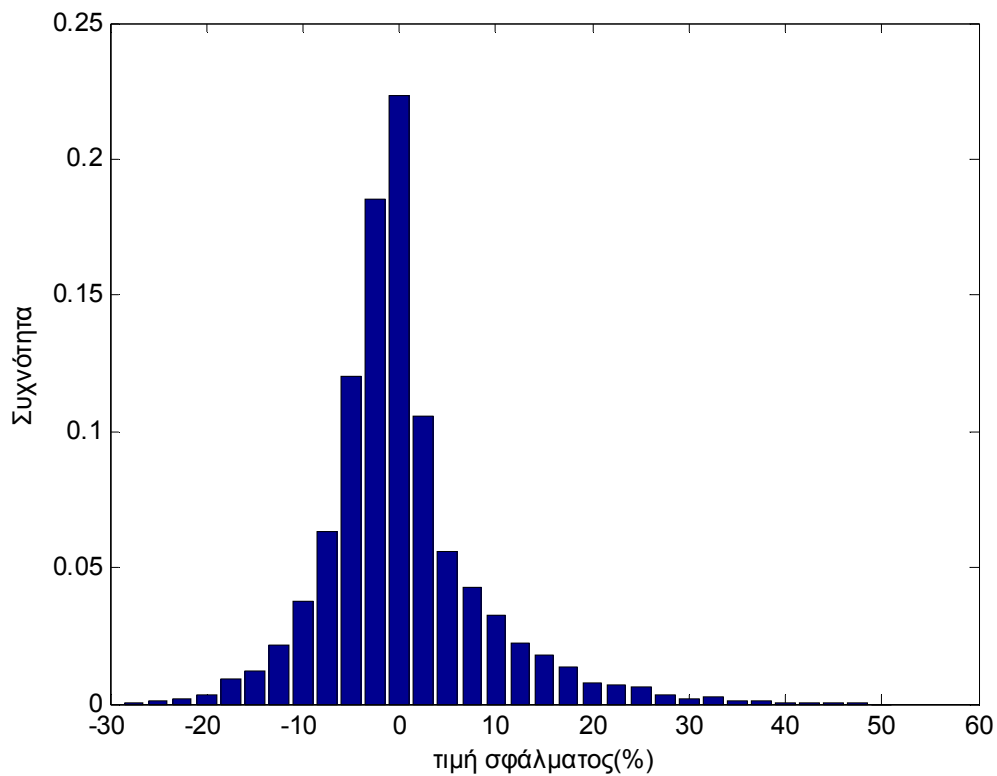


Εικόνα 6.34 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης έντασης ακτινοβολίας 24ώρου οριζόντα μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια

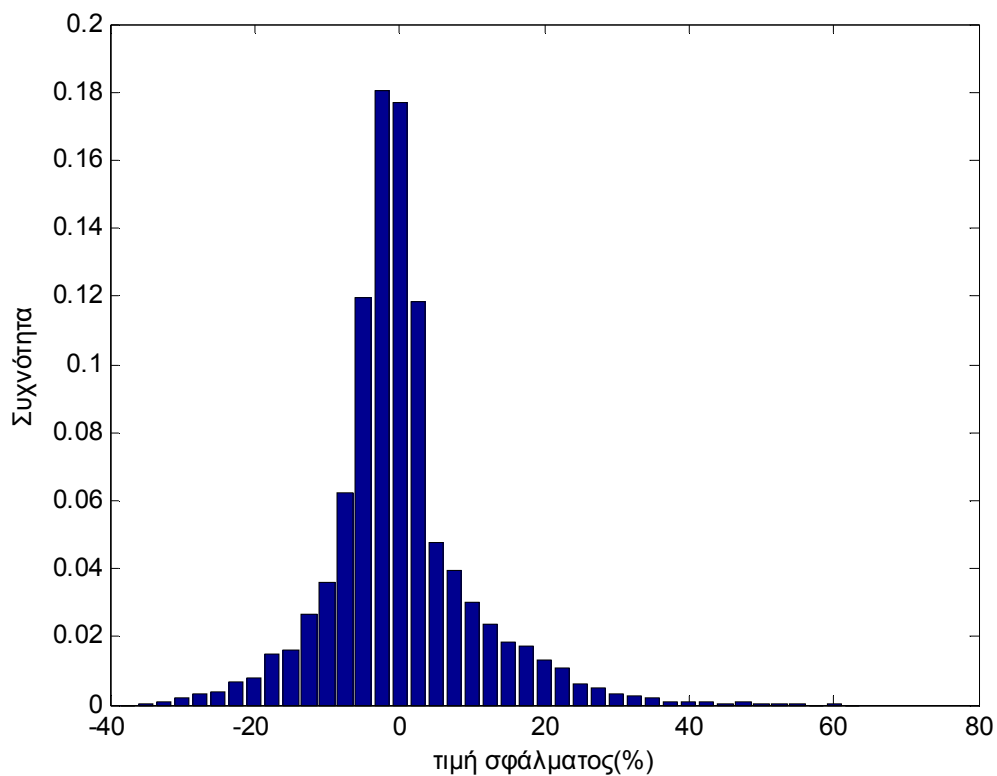
Ας δούμε και τα αντίστοιχα ιστογράμματα σφαλμάτων πρόβλεψης παραγωγής Φ/Β που οφείλονται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια:



Εικόνα 6.35 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας 1 ώρα μπροστά μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια



Εικόνα 6.36 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας 6ώρου ορίζοντα μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια

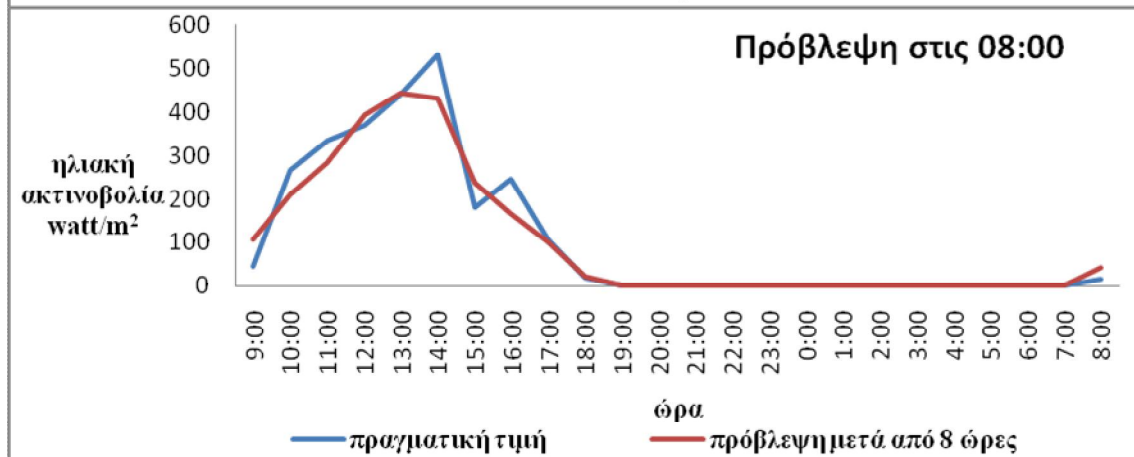
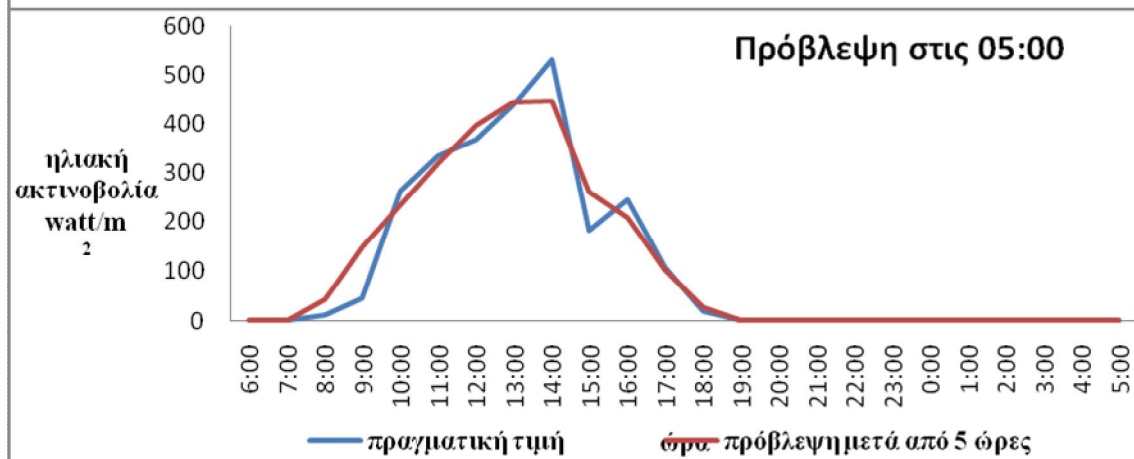
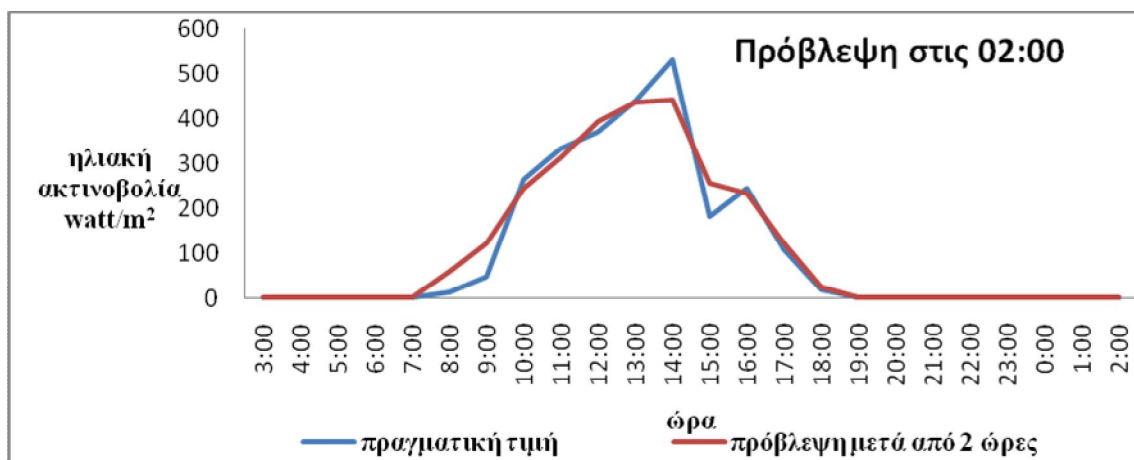
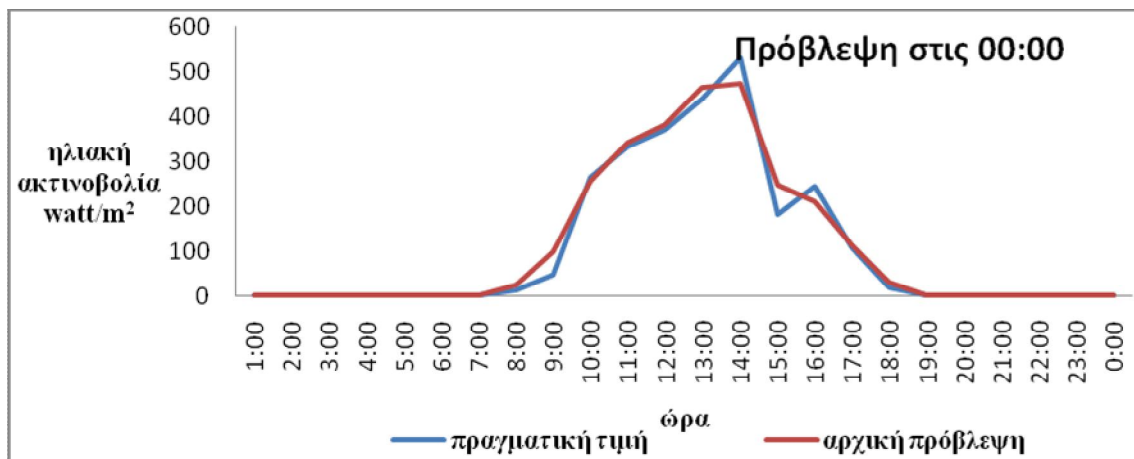


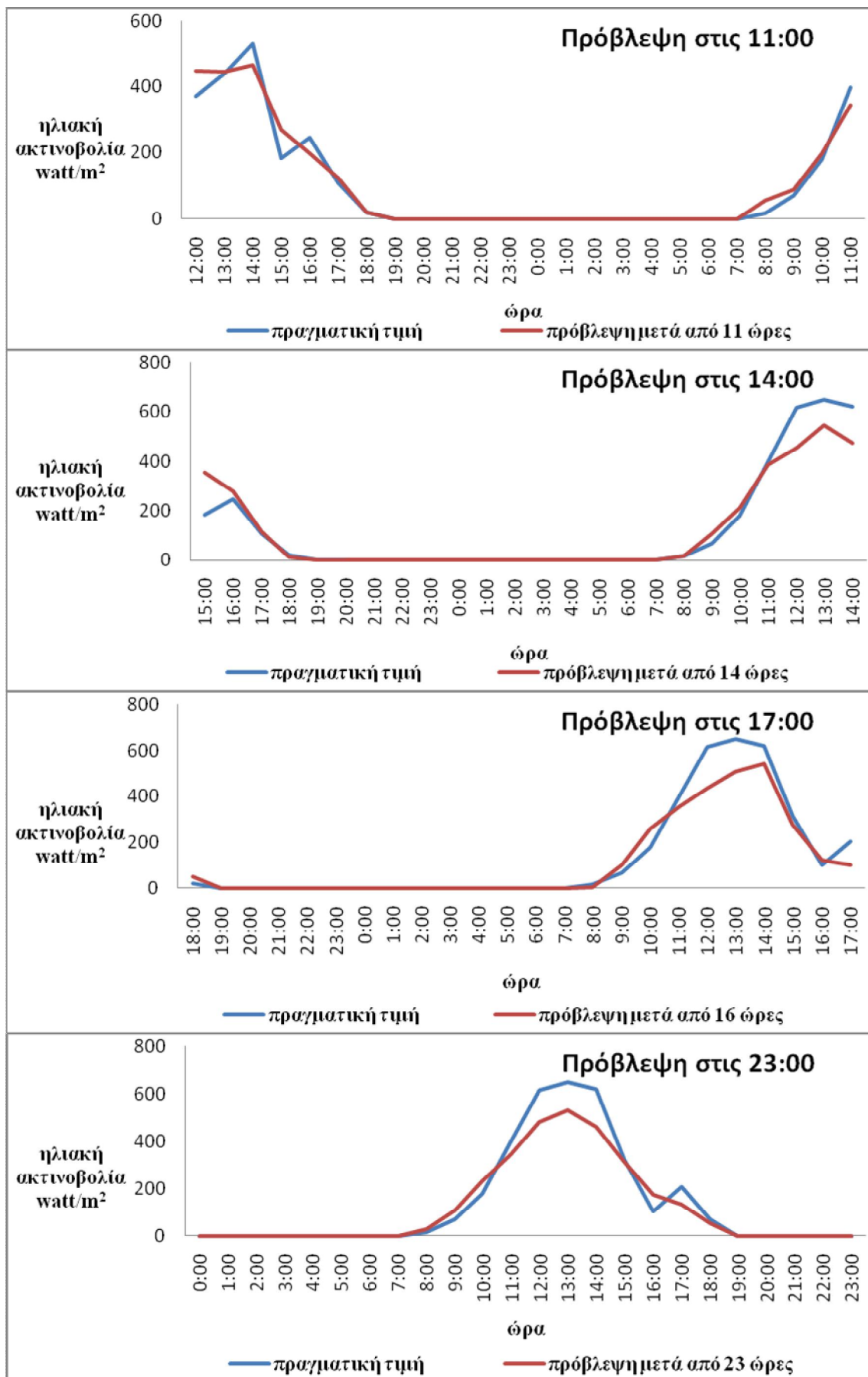
Εικόνα 6.37 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη έντασης ακτινοβολίας 24ώρου ορίζοντα μόνο για τις ώρες με ηλιοφάνεια

6.3.7 Παρουσίαση της πρόβλεψης ηλιακής ακτινοβολίας σε παράθυρα 24ωρου ορίζοντα με ανανέωση

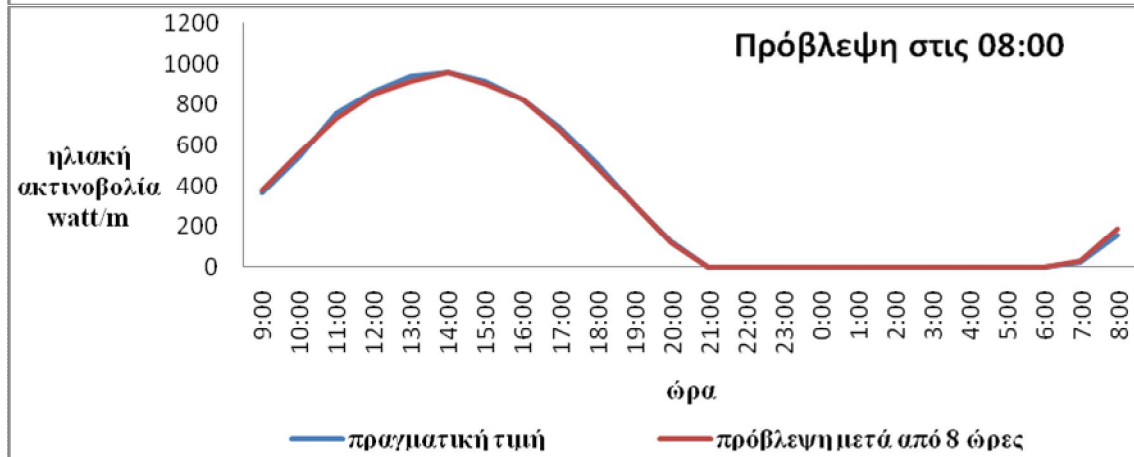
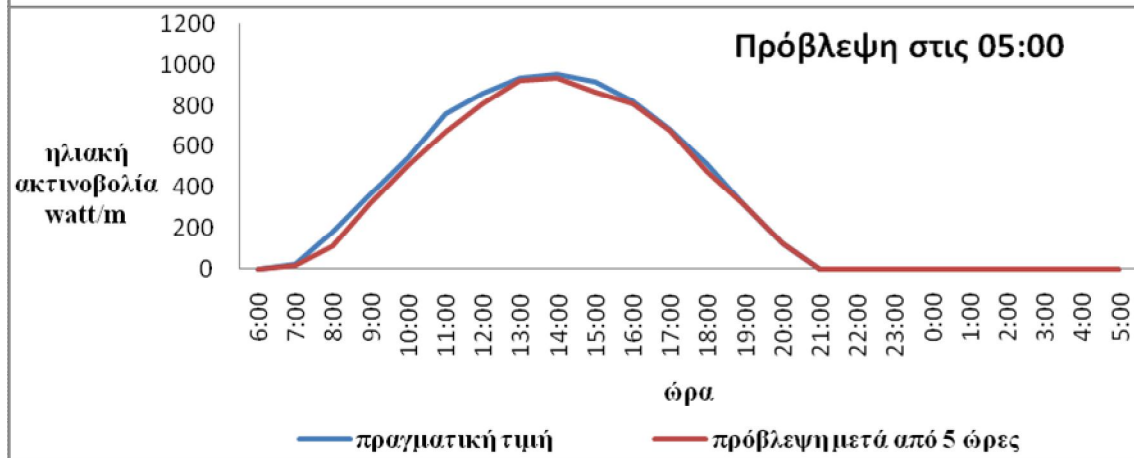
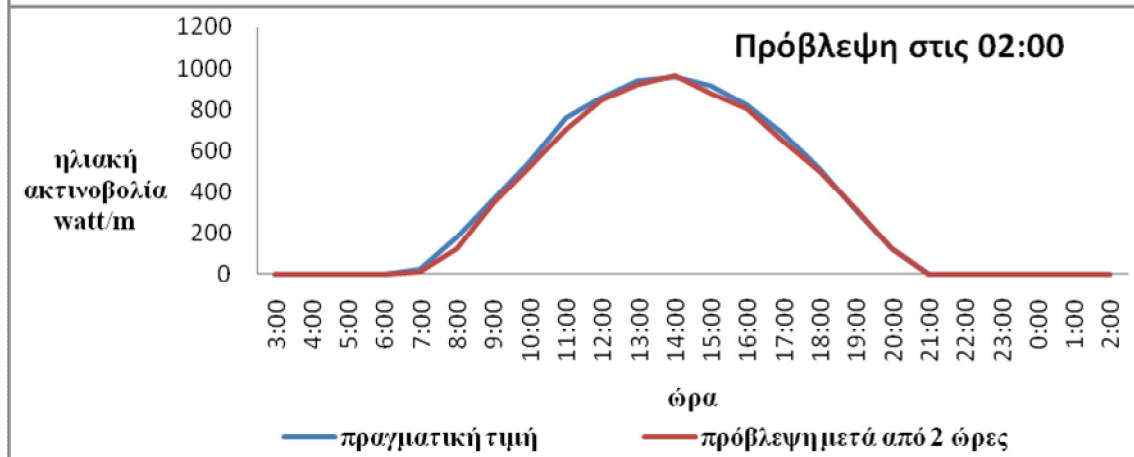
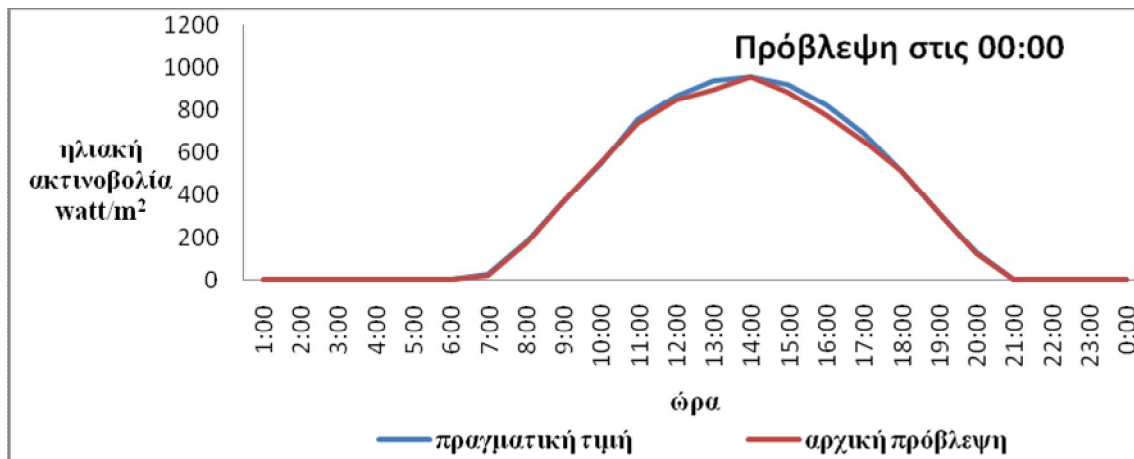
Αφού μελετήθηκε διεξοδικά το MAPE της πρόβλεψης ηλιακής ακτινοβολίας, το διάστημα εμπιστοσύνης της και τα ποσοστά υπό-εκτίμησης και υπέρ-εκτίμησης ας δούμε και πιο πρακτικά πως συμπεριφέρεται η πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζοντας δυο παραδείγματα πρόβλεψης ένα για χειμερινή και ένα για τη θερινή περίοδο. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούμε την πραγματική τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας σε σύγκριση με την προβλεπόμενη τιμή όπως αυτή ανανεώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

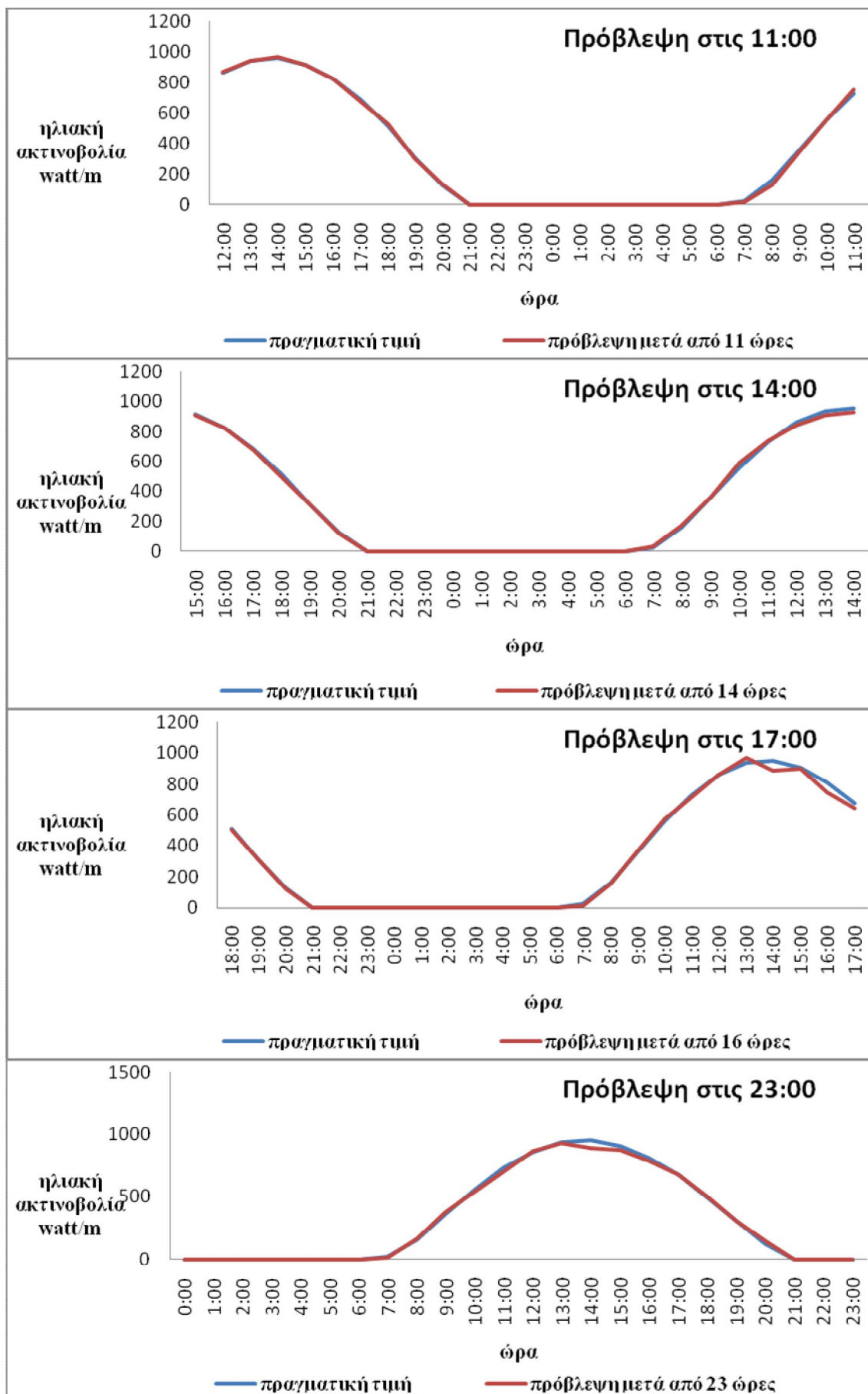
Αρχικά ένα παράδειγμα πρόβλεψης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 24ωρου ορίζοντα (εικόνα 6.38) σε μια ημέρα της χειμερινής περιόδου. Στις 3 Φεβρουαρίου στις 00:00 το μοντέλο μας κάνει την πρόβλεψη 24ωρου ορίζοντα, με ανανεώσεις μετά από 2,5,8,11,14,15 και 23 ώρες, Στη συνέχεια και ένα παράδειγμα πρόβλεψης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας 24ωρου ορίζοντα (εικόνα 6.38) σε μια ημέρα της θερινής περιόδου όπως είναι η 16^η Ιουνίου. Βλέπουμε και πάλι την πρόβλεψη του μοντέλου στις 00:00 και στις συνεχείς την ανανέωση της πρόβλεψης στις 02:00, στις 05:00, στις 08:00, στις 11:00, στις 14:00, στις 17:00 και στις 23:00.





Εικόνα 6.38 Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας 24ωρου ορίζοντα με ανανεώσεις τη 3^η Φεβρουαρίου





Εικόνα 6.39 Πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας 24ωρου ορίζοντα με ανανεώσεις τη 16^η Ιουλίου

Παρατηρώντας τις προβλέψεις αυτές δυο τυχαίων ημερών που ανήκουν σε διαφορετικές εποχές μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε πως η πρόβλεψη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας τη θερινή περίοδο γίνεται με πολύ μικρό σφάλμα ακόμα και πολλές ώρες πριν. Στην τυχαία χειμερινή ημέρα με τις αυξομειώσεις που παρατηρούνται είναι δύσκολο για τα ΤΝΔ να κάνουν εξίσου καλή πρόβλεψη, όμως τα καταφέρνουν ικανοποιητικά.

Επίσης φαίνεται ότι στις προβλέψεις και στις 3 Φεβρουαρίου και στις 16 Ιουνίου η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερη της πραγματικής τιμής με εξαίρεση τις ώρες που η ένταση ελαττώνεται απότομα μέσα στην μέρα.

6.4 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η πρόβλεψη της τιμής της θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε επίσης με χρήση νευρωνικών δικτύων υλοποιημένα σε matlab. Όπως περιγράψαμε και παραπάνω σαν πρώτο βήμα προσπαθήσαμε να κάνουμε πρόβλεψη με ένα μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ. Ως χρονοσειρά στόχου βάλαμε τις τιμές της θερμοκρασίας. Εκπαιδεύσαμε με 1 έως 24 προηγούμενες τιμές της χρονοσειρά πρόβλεψης και με 6 έως 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Στα αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε δεν παίρνουμε το καλύτερο ΤΝΔ, γιατί αυτό θα ήταν σφάλμα της γενικότητας. Για κάθε περίπτωση εκπαιδεύσαμε 5 ΤΝΔ και πήραμε το μέσο όρο των μέσων απόλυτων σφαλμάτων και των γραμμικών παλινδρομήσεων. Παίρνουμε το μέσο ΤΝΔ από την καλύτερη περίπτωση. Γενικά δεν έχουμε λόγο να επιμείνουμε τόσο πολύ στο να πετύχουμε τέλεια πρόβλεψη στην τιμή της θερμοκρασίας (όσο στην τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας), λόγω της μικρότερης επιρροής που έχει στην τελική απόδοση του Φ/Β.

Η καλύτερη περίπτωση βρέθηκε για 16 προηγούμενες τιμές και 12 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Σε αυτή το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 0,48 °C, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,986. Αυτό το σφάλμα είναι πολύ μικρό και λαμβάνοντας υπ όψιν ότι η τιμή της θερμοκρασίας δεν είναι τόσο σημαντική παράμετρος επιρροής της παραγωγή είμαστε ικανοποιημένοι. Ας δούμε τι αποτελέσματα σφαλμάτων θα πάρουμε αν κλείσουμε το βρόγχο για 6 και 24 ώρες. Κλείνοντας λοιπόν το βρόγχο στο νευρωνικό και μετατρέποντας το σε κλειστού βρόγχου μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ, για το ίδιο ΤΝΔ (ίδιο αριθμό προηγούμενων τιμών και διαστάσεις κρυφού επιπέδου) όπως για την πρόβλεψη επόμενης ώρας, στον 6ωρο ορίζοντα πρόβλεψης έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 1,12 °C, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,962. Στην πρόβλεψη με 24ώρο ορίζοντα έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 1,89 °C, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,928. Τα σφάλματα για 6ωρο και 24ωρο ορίζοντα είναι όπως αναμενόταν μεγαλύτερα από αυτή της μια ώρας μπροστά παρόλο που δεν είναι και τόσο τραγικά αποφασίσαμε να κάνουμε και μια δοκιμή με χρήση μη-γραμμικών αυτοπαλινδρομικών νευρωνικών δικτύων με εξωτική είσοδο.

Η εξωτερική είσοδος δεν είναι τίποτα άλλο από την ημερήσια ώρα, όπως έγινε αρχικά και με την πρόβλεψη της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ώρα της ημέρας θα βελτιώσει την πρόβλεψη του \dot{U} , διότι γενικά στις μεσημεριανές ώρες αναμένουμε μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με τις νυχτερινές. Στην καλύτερη περίπτωση το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 0,42 °C, η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,996. Αυτό το σφάλμα είναι πολύ μικρό και λαμβάνοντας υπ όψιν ότι η τιμή της θερμοκρασίας δεν είναι τόσο σημαντική παράμετρος επιρροής της παραγωγή είμαστε ικανοποιημένοι. Ας δούμε τι αποτελέσματα σφαλμάτων θα πάρουμε αν κλείσουμε το βρόγχο για 6 και 24 ώρες. Κλείνοντας λοιπόν το

βρόγχο στο νευρωνικό και μετατρέποντας το σε κλειστού βρόγχου μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ, για το ίδιο ΤΝΔ (ίδιο αριθμό προηγούμενων τιμών και διαστάσεις κρυφού επιπέδου) όπως για την πρόβλεψη επόμενης ώρας, στην έξι ώρες μπροστά πρόβλεψη έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 0,98 °C, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,952. Στην εικοσιτέσσερις ώρες μπροστά πρόβλεψη έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 1,44 °C, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,928. Τα σφάλματα τώρα βελτιώθηκαν σε σχέση με το απλό μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ.

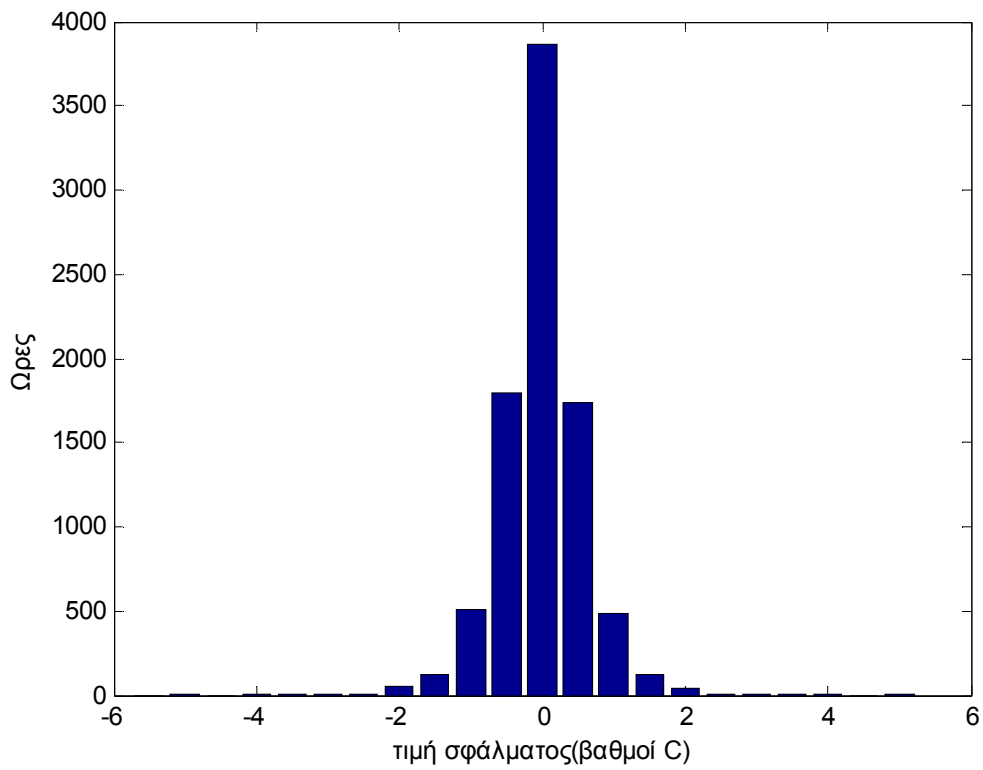
6.4.1 Πρόβλεψη θερμοκρασίας 1 Ώρα Μπροστά

Χρησιμοποιώντας λοιπόν μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομικά με εξωτερική είσοδο την ημερήσια ώρα, όπως μόλις τα περιγράψαμε κάνουμε δοκιμές να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο. Δοκιμάζουμε από 2 μέχρι 24 προηγούμενες τιμές με βήμα 2 και από 6 μέχρι 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο με βήμα 6.

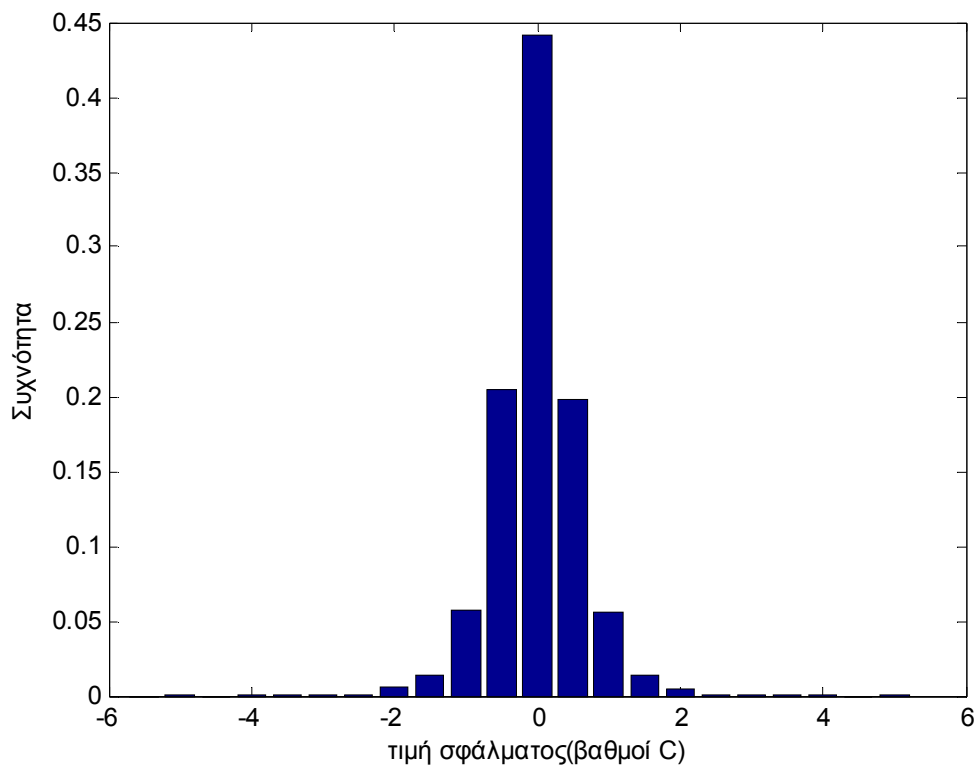
	6	12	18	24
2	0.4523	0.4390	0.4362	0.4317
4	0.4409	0.4336	0.4360	0.4347
6	0.4478	0.4344	0.4337	0.4266
8	0.4325	0.4294	0.4249	0.4323
10	0.5084	0.4275	0.4289	0.4222
12	0.4313	0.4307	0.4315	0.4272
14	0.4357	0.5251	0.4242	0.4220
16	0.4319	0.4348	0.4153	0.4273
18	0.6390	0.4215	0.4268	0.4187
20	0.4241	0.4977	0.4261	0.4249
22	0.4275	0.4193	0.5278	0.4246
24	0.4191	0.4173	0.4216	0.4196

Πίνακας 6.11 Μέσο απόλυτο σφάλμα(°C) για αριθμό προηγούμενων τιμών (γραμμές) και αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου (στήλες)

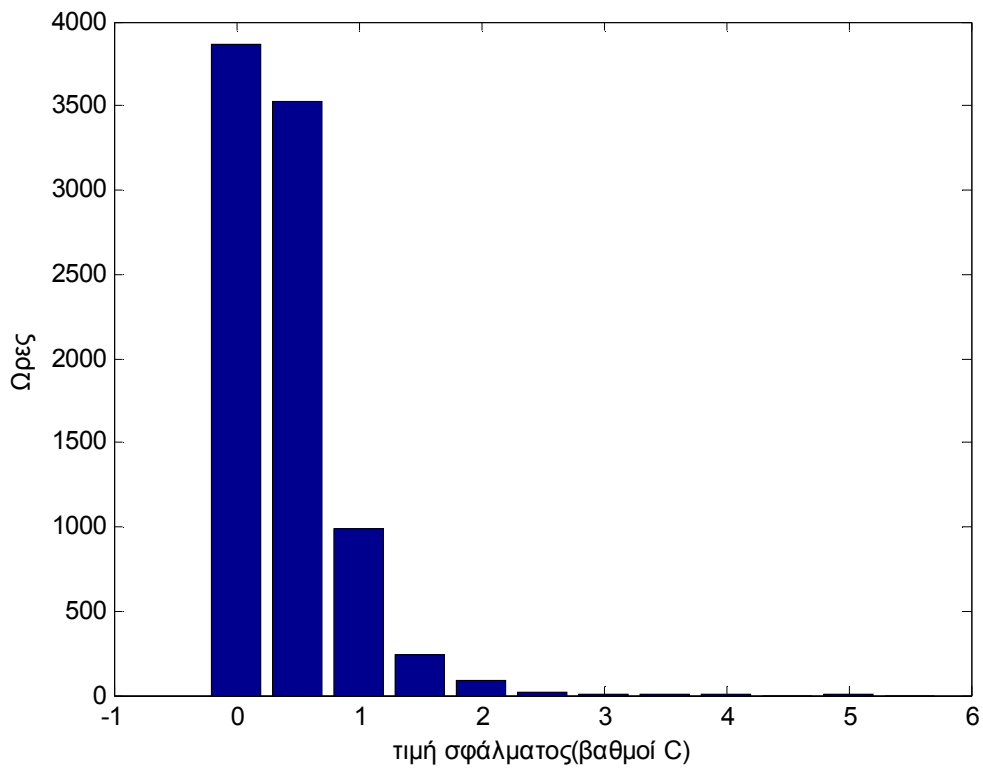
Το δίκτυο με την καλύτερη απόδοση φαίνεται να είναι αυτό με 16 προηγούμενες τιμές της χρονοσειρά στόχου και 18 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Μέσο απόλυτο σφάλμα 0,42 °C και γραμμική παλινδρόμηση 0,996 για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



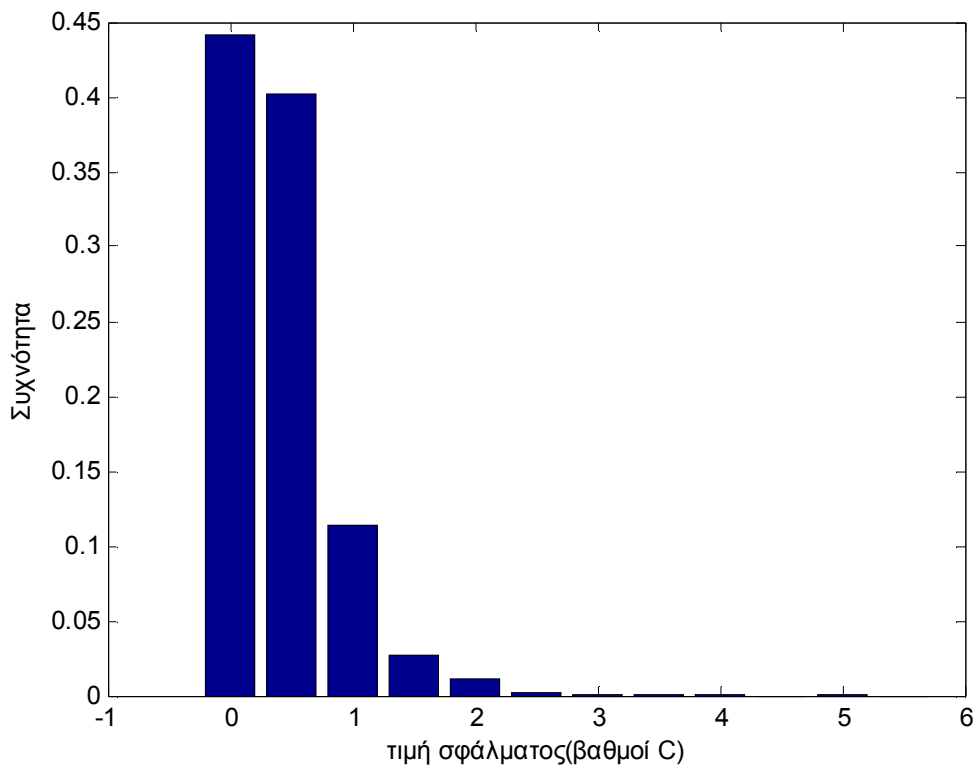
Εικόνα 6.38 Ιστόγραμμα σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας επόμενης ώρας



Εικόνα 6.39 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας επόμενης ώρας



Εικόνα 6.40 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας επόμενης ώρας

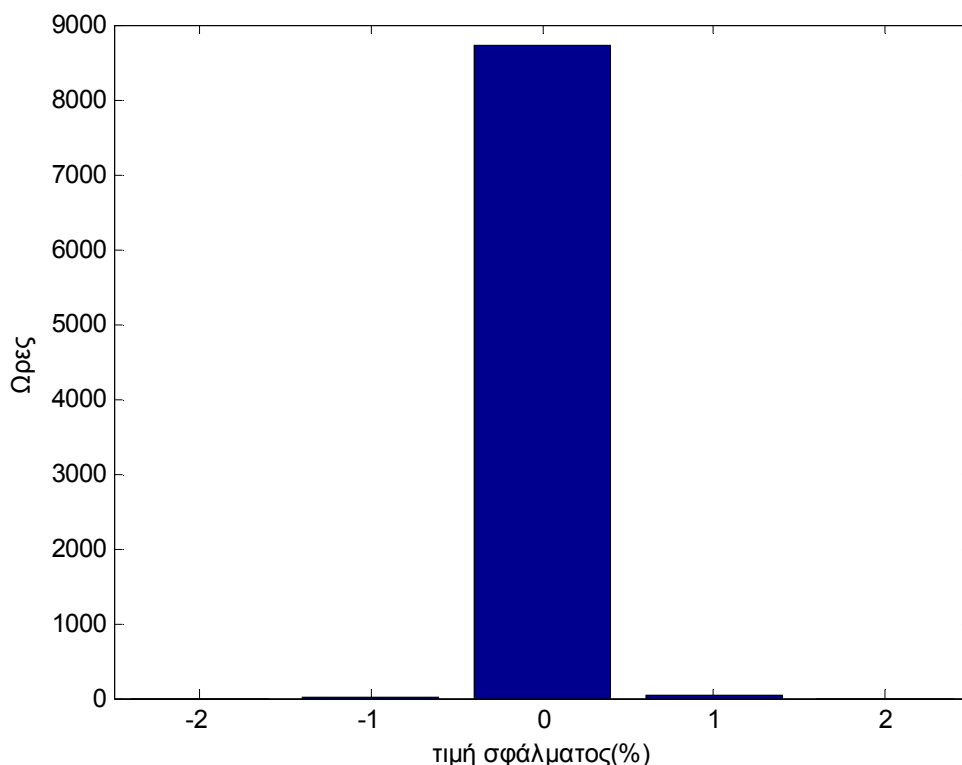


Εικόνα 6.41 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας επόμενης ώρας

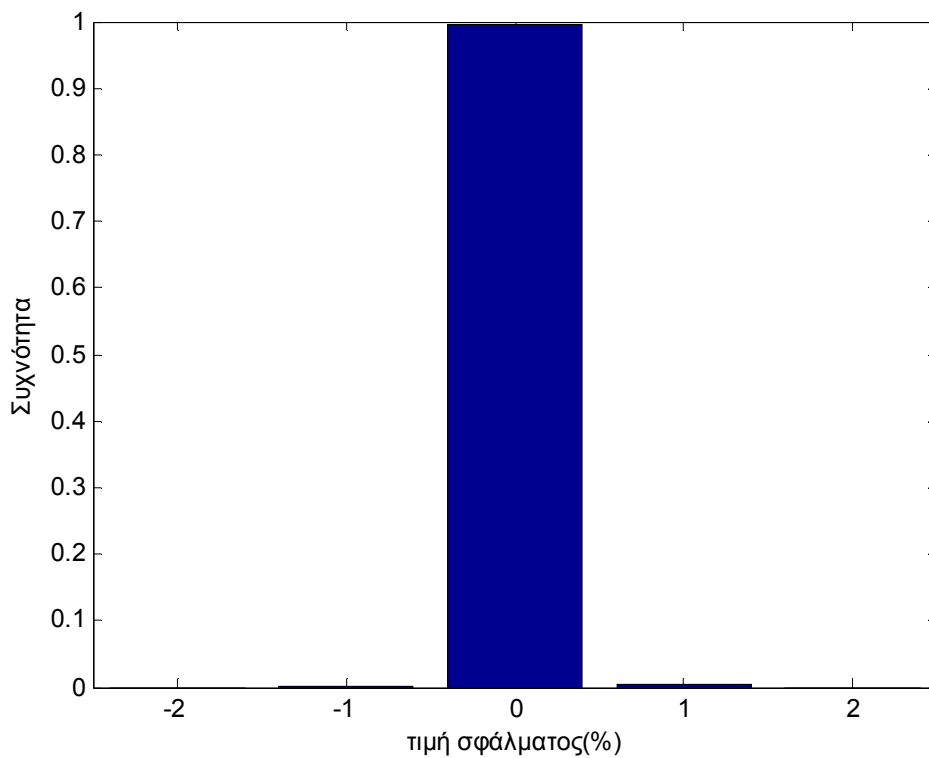
Να επισημάνουμε ότι σφάλματα μικρότερα του $0,25^{\circ}\text{C}$ κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του 0 κάτι που συμβαίνει 3863 φορές δηλαδή στο 44,2% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 2482 φορές(28,3%) υποεκτιμούμε την τιμή της θερμοκρασίας ενώ 2409 (27,5%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ $-0,92$ και $0,89^{\circ}\text{C}$. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-5,05$ και $-0,92^{\circ}\text{C}$ και μεταξύ των $0,89$ και $4,87^{\circ}\text{C}$.

6.4.1.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στην πρόβλεψη επόμενης ώρας θερμοκρασίας

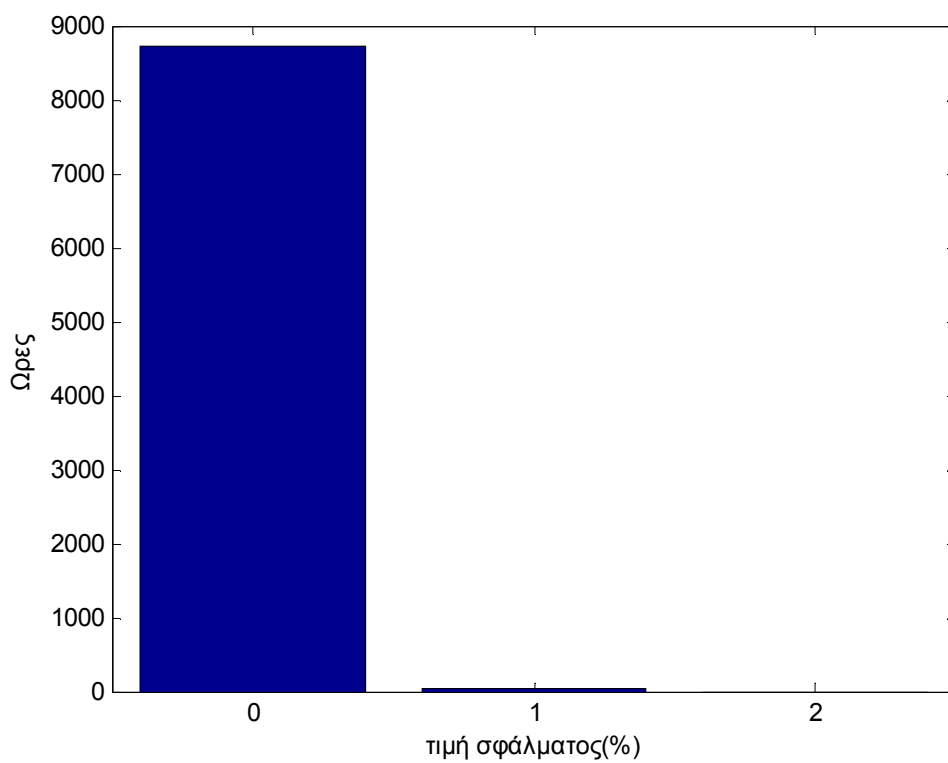
Όμως στην εργασία αυτή δεν μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της τιμής της θερμοκρασίας άμεσα. Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της θερμοκρασίας επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/Β. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ταχύτητα του ανέμου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της θερμοκρασίας θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/Β είναι $0,08\text{ W}$ (0.04%), δηλαδή πρακτικά 0, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



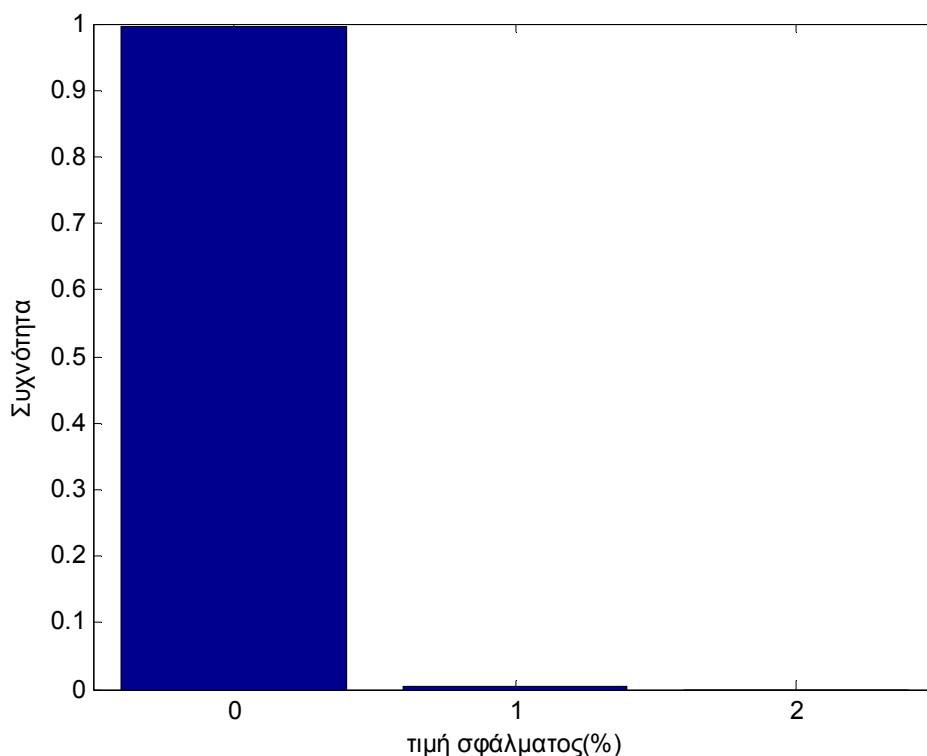
Εικόνα 6.42 Ιστόγραμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας επόμενης ώρας



Εικόνα 6.43 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας επόμενης ώρα



Εικόνα 6.44 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας επόμενης ώρας



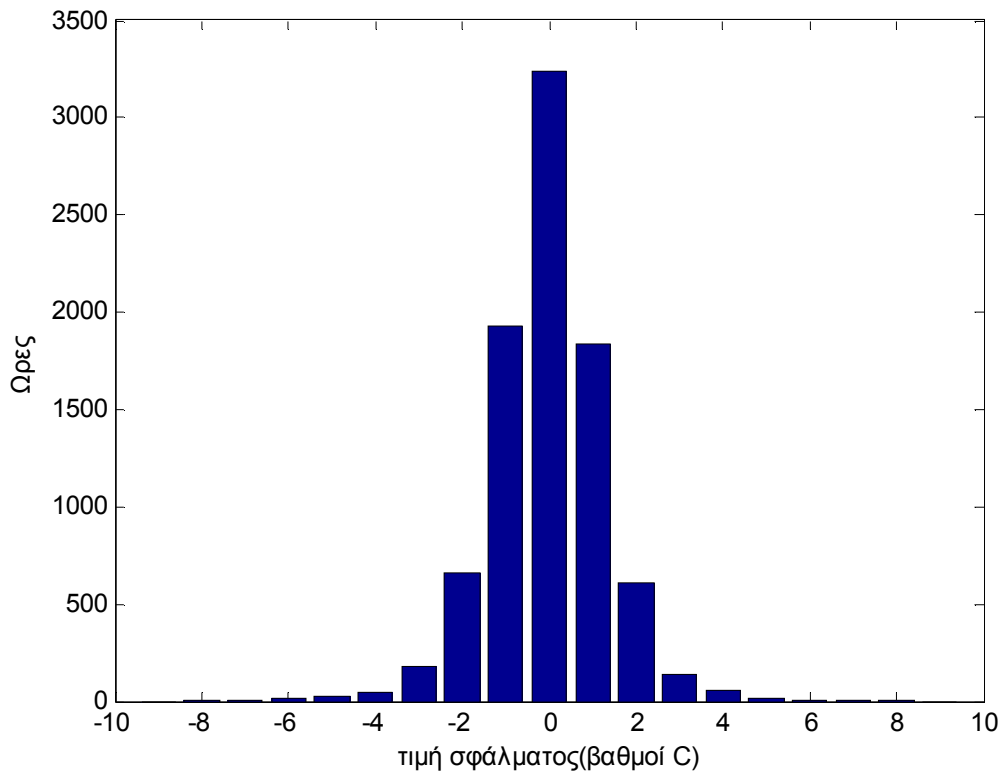
Εικόνα 6.45 Ιστογράμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας επόμενης ώρας

Στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ $-0,2(0.1\%)$ και $0,31(0,14\%)$ W, δηλαδή πρακτικά 0 W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-2,74(1,2\%)$ και $-0,2(1\%)$ W και μεταξύ των $0,31(0.14\%)$ και $2,52$ W(1,1%) Το απόλυτο σφάλμα είναι μικρότερο του $1,125(0.5\%)$ W σε 8718 ώρες του έτους (99,5%).

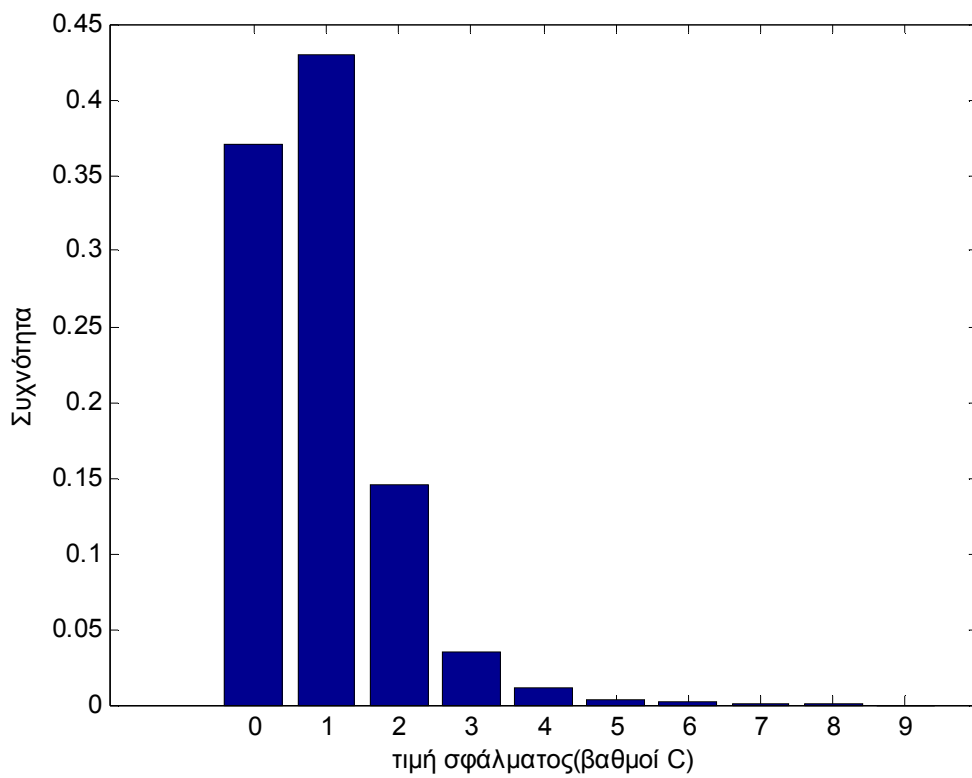
6.4.2 Πρόβλεψη Θερμοκρασίας με βωρο Οριζοντα

Με χρήση ομοίων με τα προηγούμενα μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομικά ΤΝΔ με εξωτερική είσοδο την ημερήσια ώρα θα κάνουμε εκτίμηση τιμής θερμοκρασίας και για περισσότερες από μια ώρες μπροστά. Όμως επειδή αυτά τα θέλουν σαν είσοδο την τιμή της θερμοκρασίας μια ώρα πριν την ώρα για την οποία γίνεται η εκτίμηση, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σαν είσοδο την εκτίμηση αυτής της τιμής που έχει προκύψει από την έξοδο του προηγούμενου ΤΝΔ. Έτσι αυτό που κάνουμε είναι να κλείσουμε το βρόχο και να ανατροφοδοτούμε την έξοδο στην είσοδο. Με αυτό τον τρόπο προβλέπουμε τιμές της θερμοκρασίας μια ώρα πιο μελλοντικά μετά από κάθε ανατροφοδότηση. Όμως επειδή όπως δείξαμε προηγουμένως η επιρροή που έχουν τα σφάλματα της εκτίμησης της θερμοκρασίας στην παραγωγή είναι πρακτικά σχεδόν 0 αποφασίσαμε να μην κάνουμε καινούργιες δοκιμές για να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο.

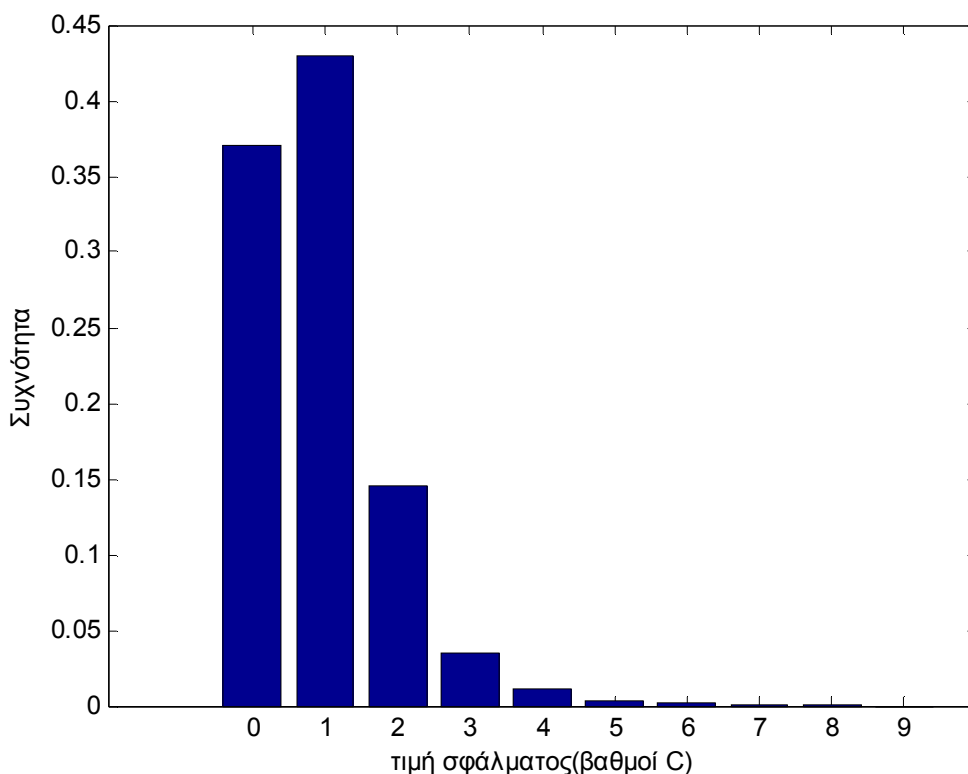
Στην βωρο οριζοντα πρόβλεψης βρήκαμε μέσο απόλυτο σφάλμα $0,96$ °C και γραμμική παλινδρόμηση $0,943$ για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



Εικόνα 6.46 Ιστόγραμμα σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας 6 ώρες μπροστά **Εικόνα 6.47** Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας 6 ώρες μπροστά



Εικόνα 6.48 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας 6 ώρες μπροστά

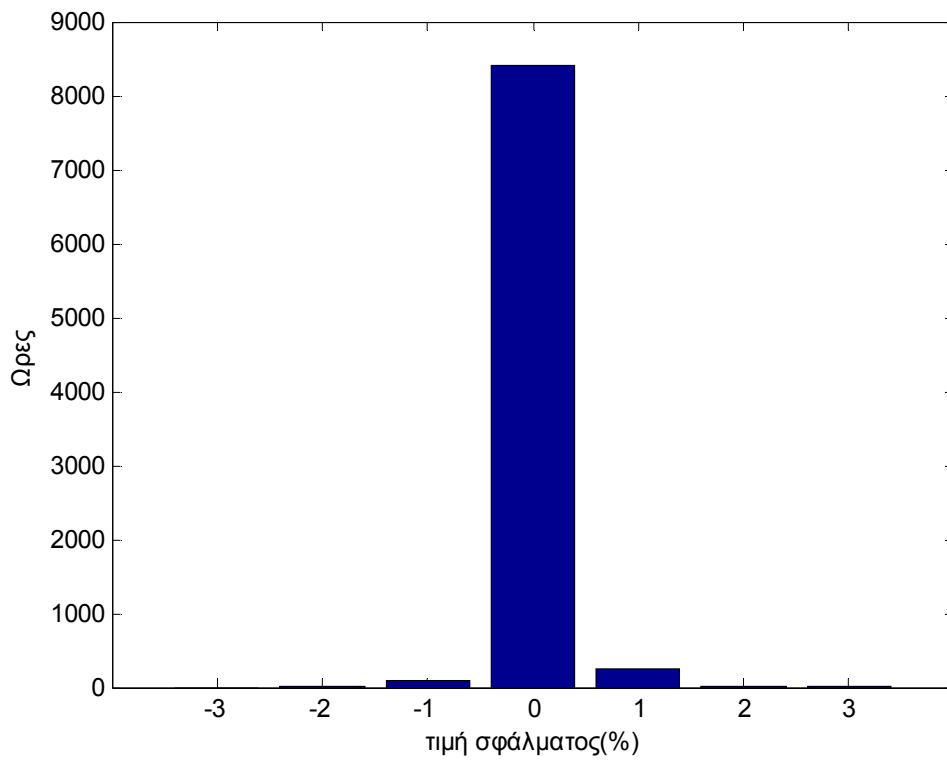


Εικόνα 6.49 Ιστογράμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας άνεμου 6 ώρες μπροστά

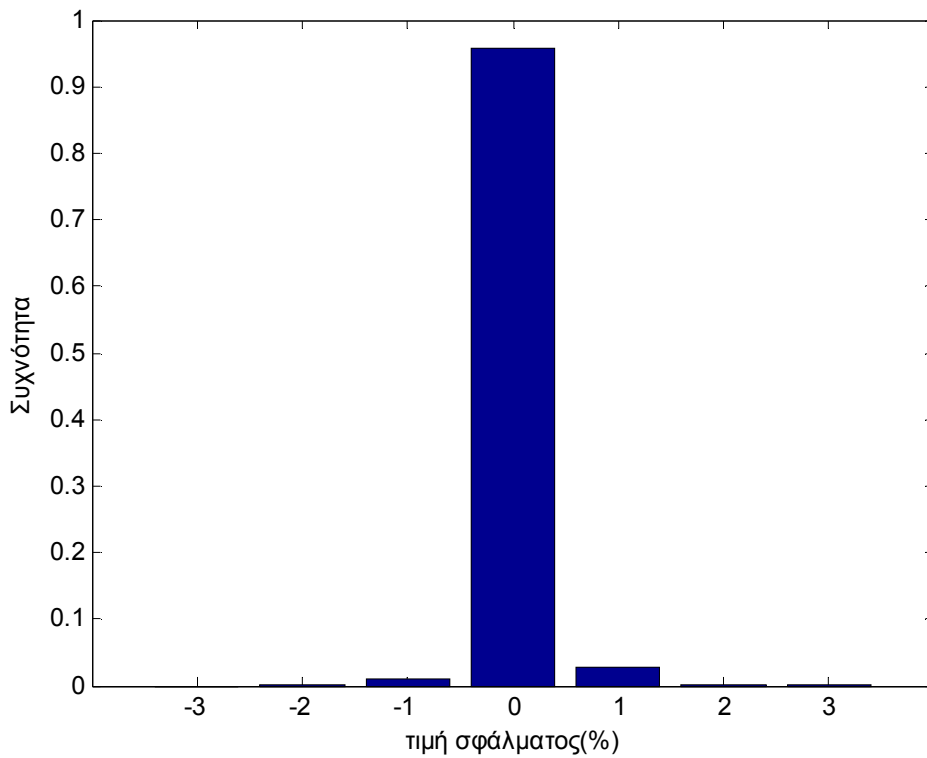
Να επισημάνουμε ότι σφάλματα μικρότερα του $\pm 0,25$ °C κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του 0 κάτι που συμβαίνει 1643 φορές δηλαδή στο 18,8% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 3596 (41%) υποεκτιμούμε την τιμή της θερμοκρασίας ενώ 3518 (40,2%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ $-2,12$ και 2 °C. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-8,29$ και $-2,11$ °C και μεταξύ των 2και $8,46$ °C.

6.4.2.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας δώρου ορίζοντα.

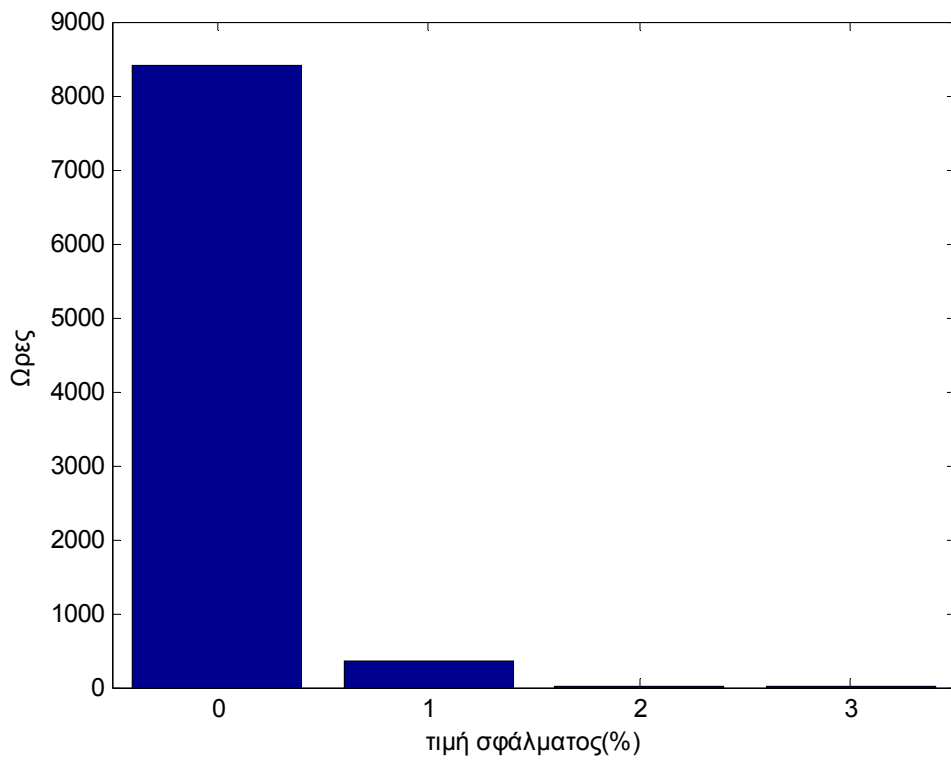
Όμως στην εργασία αυτή δεν μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της τιμής της θερμοκρασίας άμεσα. Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της θερμοκρασίας επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/Β. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ταχύτητα του ανέμου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της θερμοκρασίας θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/Β είναι 0,19 W (0.08%), δηλαδή πρακτικά 0, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



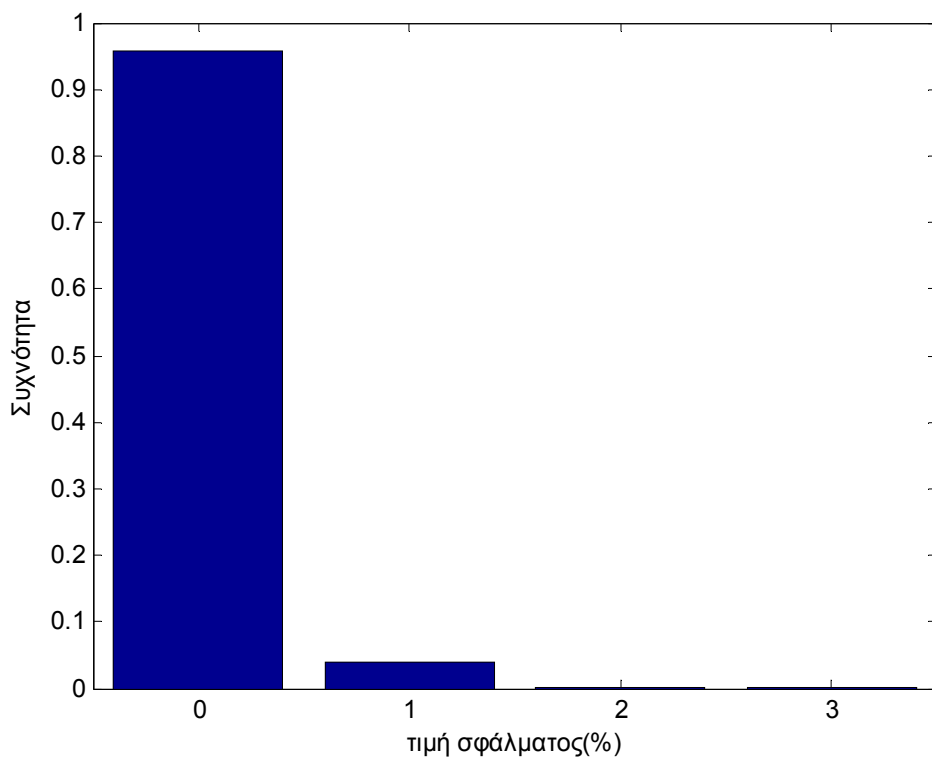
Εικόνα 6.50 Ιστόγραμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας 6 ώρες μπροστά



Εικόνα 6.51 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας 6 ώρες μπροστά



Εικόνα 6.52 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας 6 ώρες μπροστά

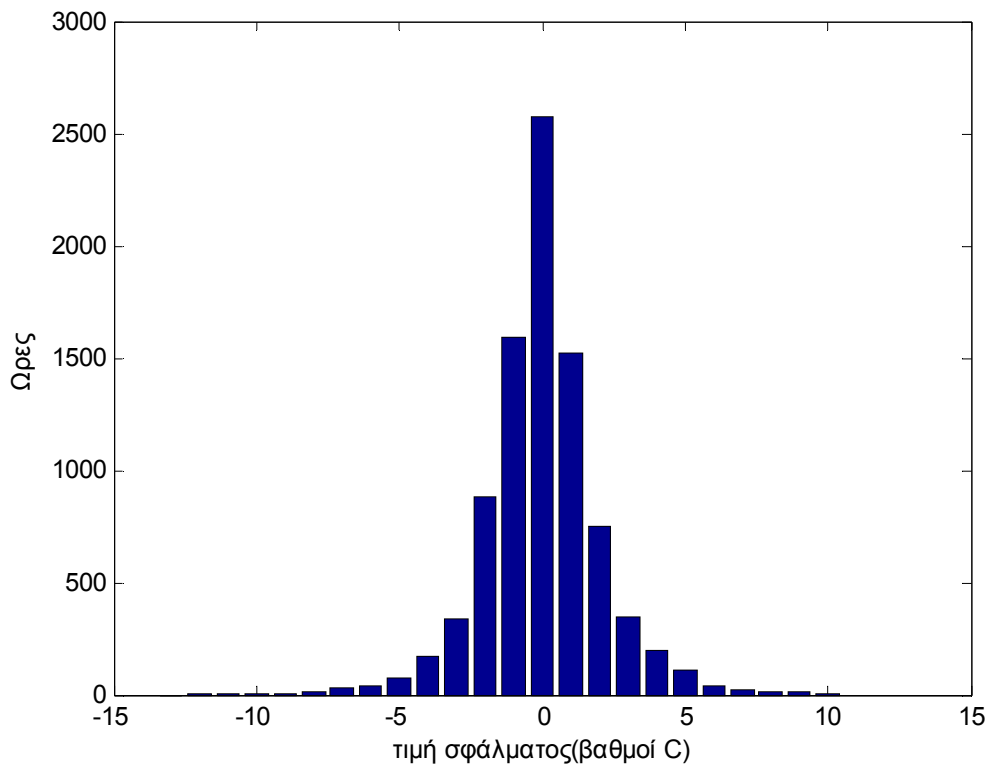


Εικόνα 6.53 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη θερμοκρασίας 6 ώρες μπροστά

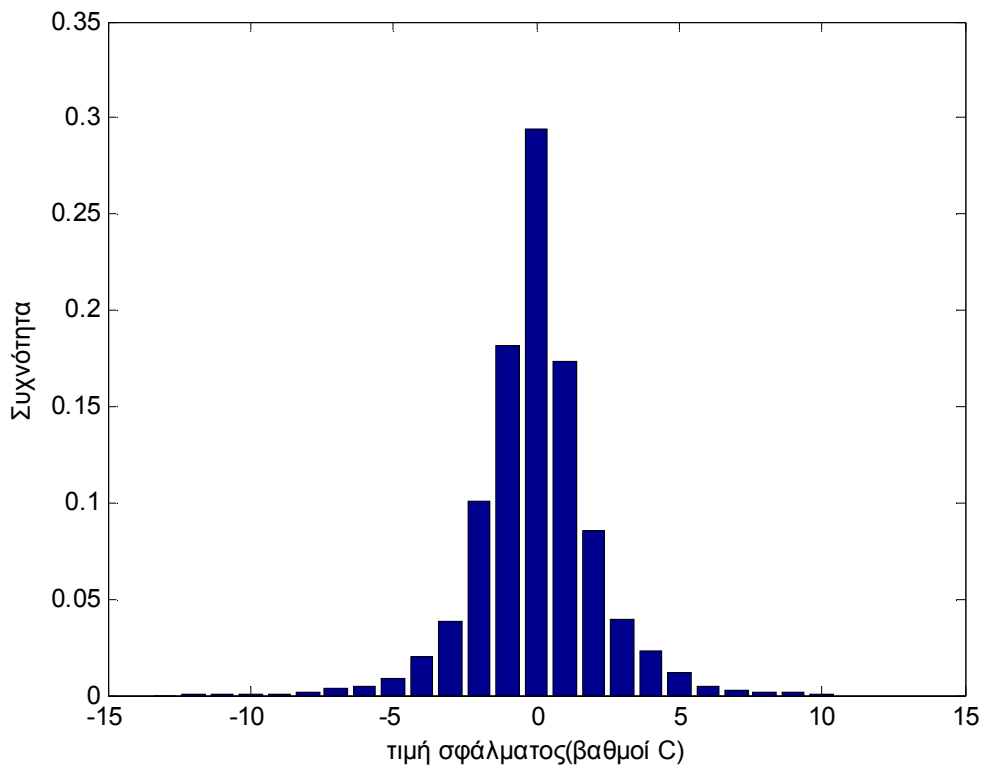
Στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ των $-0,42(0.2\%)$ και $0.81(0,4\%)$ W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-4,88$ και $-0,42$ W και μεταξύ των $0,81$ και $6,09$ W. Το απόλυτο σφάλμα είναι μικρότερο του $1,125(0.5\%)$ W σε 8400 ώρες του έτους(95,9%).

6.4.3 Πρόβλεψη Θερμοκρασίας με 24ωρο Ορίζοντα

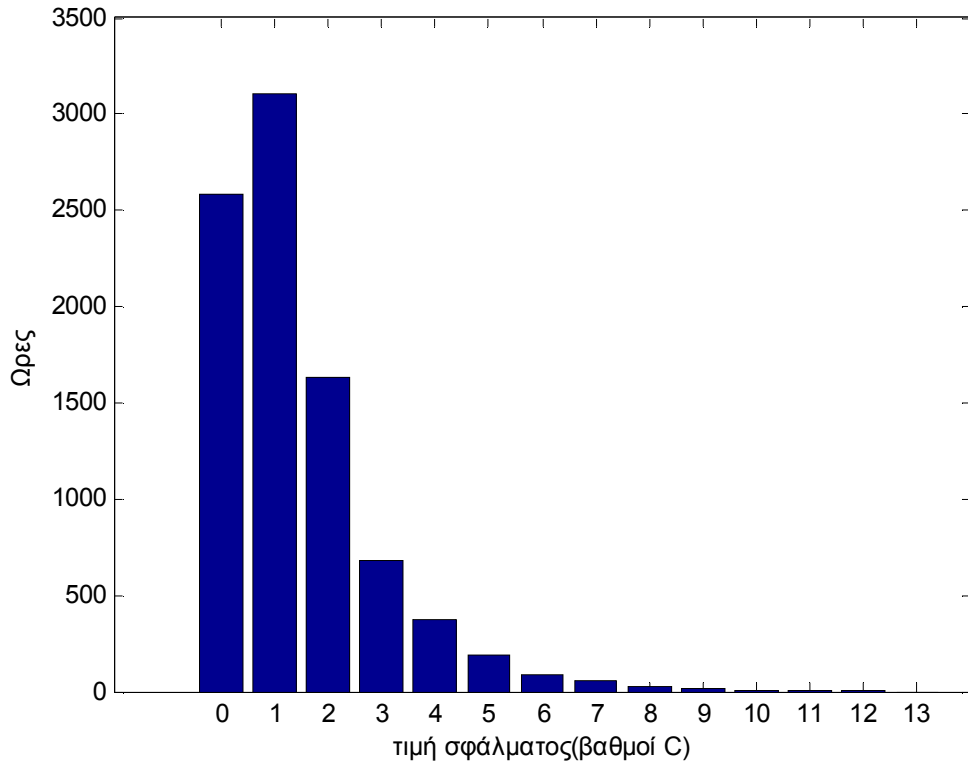
Ομοίως με την 6 ώρες μπροστά εκτίμηση θερμοκρασίας έτσι και στην 24ωρες αποφασίσαμε να μην κάνουμε καινούργιες δοκιμές για να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο. Στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης βρήκαμε μέσο απόλυτο σφάλμα $1,42$ °C και γραμμική παλινδρόμηση $0,891$ για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



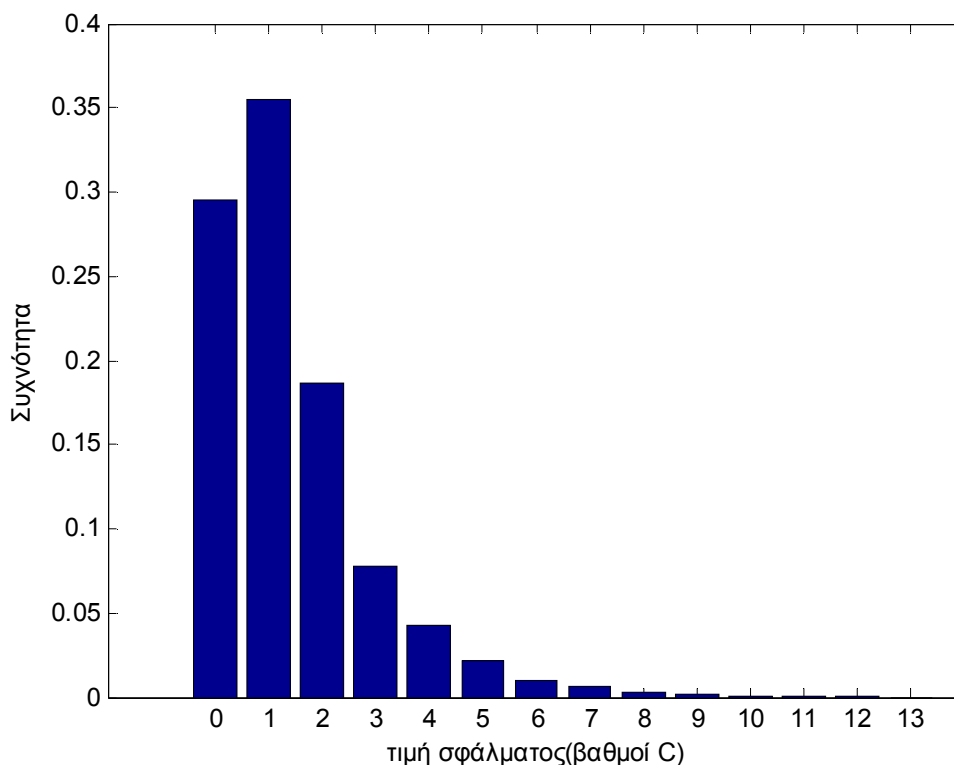
Εικόνα 6.54 Ιστόγραμμα σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας 24ωρου ορίζοντα



Εικόνα 6.55 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας 24ωρου ορίζοντα



Εικόνα 6.56 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας 24ώρου ορίζοντα

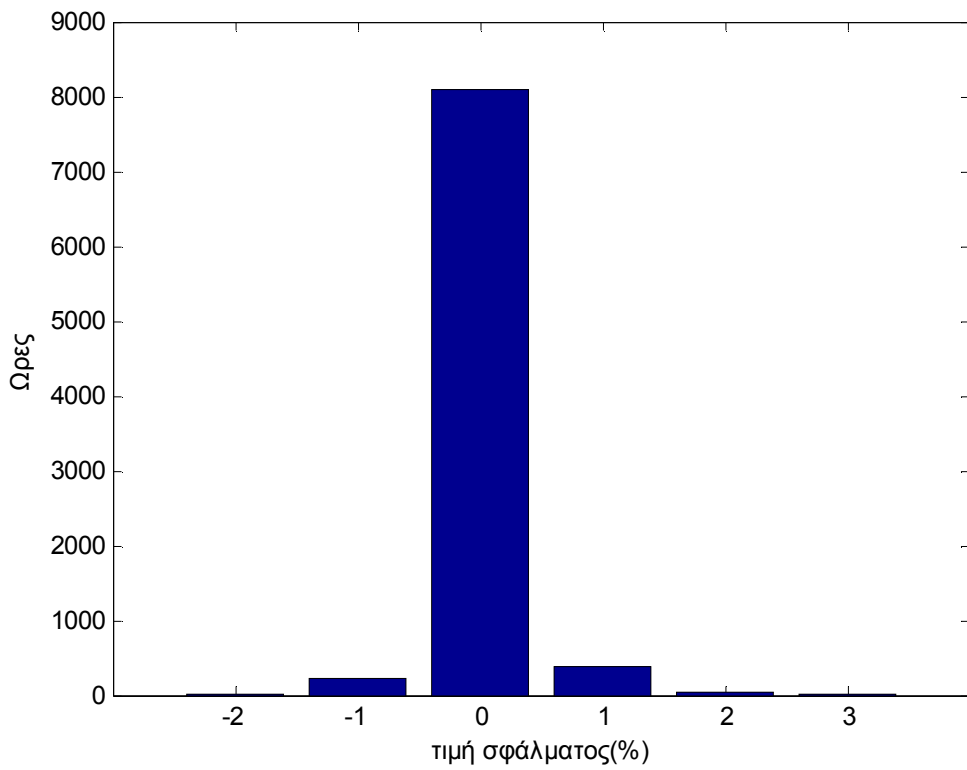


Εικόνα 6.57 Ιστογράμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης θερμοκρασίας 24ωρου ορίζοντα

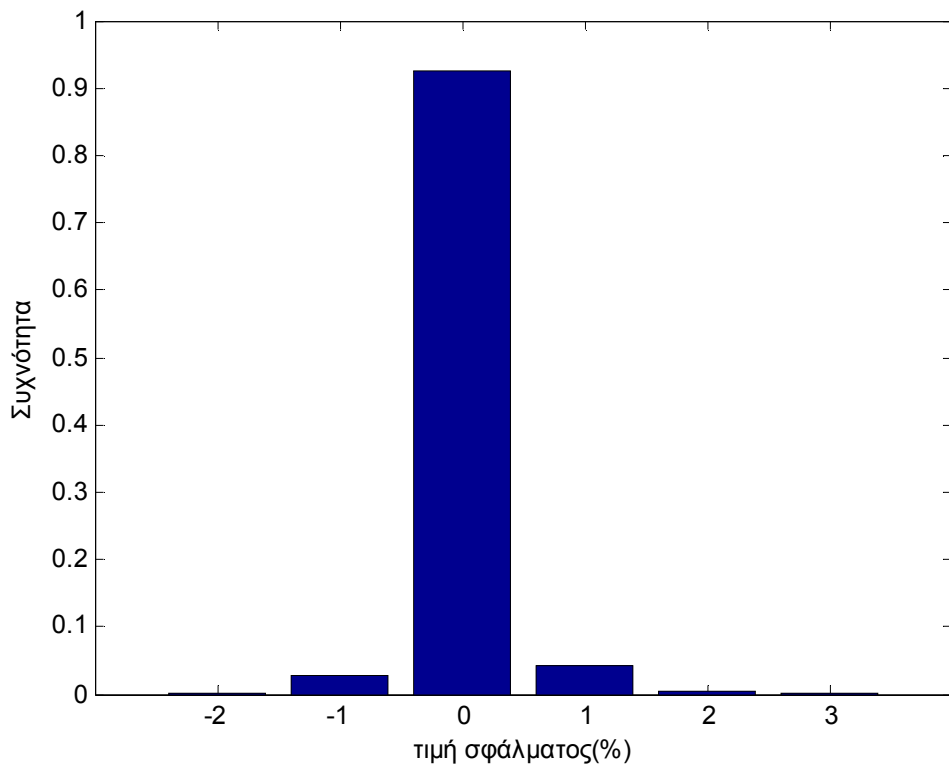
Να επισημάνουμε ότι τα σφάλματα μικρότερα του $\pm 0,25$ °C κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του 0 κάτι που συμβαίνει 1399 φορές δηλαδή στο 16% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 3801 (43,4%) υποεκτιμούμε την τιμή της θερμοκρασίας, ενώ 3553 (40,6%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ $-3,17$ και $3,29$ °C. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-12,47$ και $-3,17$ °C και μεταξύ των $3,29$ και $9,06$ °C.

6.4.3.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης θερμοκρασίας

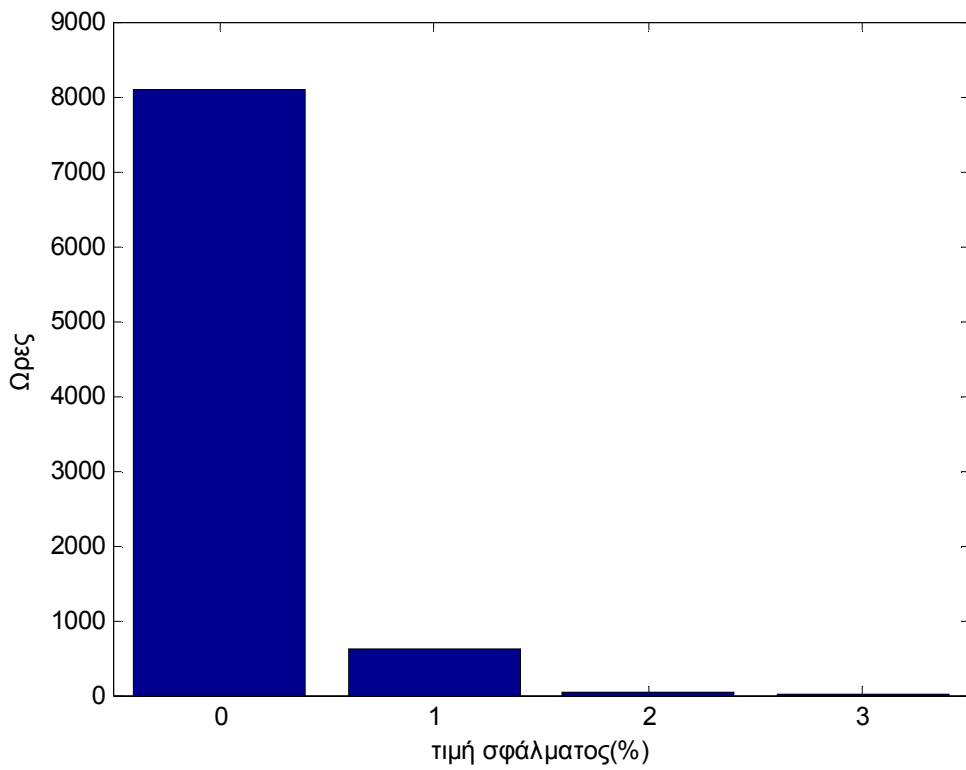
Όμως στην εργασία αυτή δεν μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της τιμής της θερμοκρασίας άμεσα. Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της θερμοκρασίας επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/Β. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ταχύτητα του ανέμου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της θερμοκρασίας θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/Β είναι $0,27$ W (0.12%), δηλαδή πρακτικά 0, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



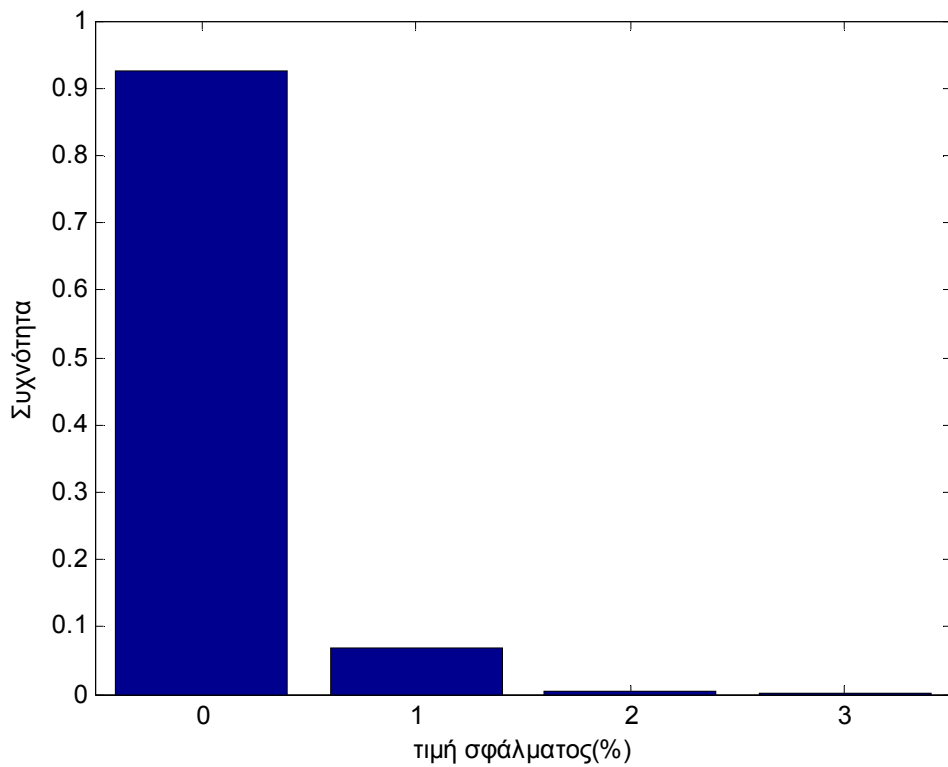
Εικόνα 6.58 Ιστόγραμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης θερμοκρασίας



Εικόνα 6.59 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης θερμοκρασίας



Εικόνα 6.60 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης θερμοκρασίας



Εικόνα 6.61 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης θερμοκρασίας

Στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ των -0,69(0,3%) και 1,09(0,5%) W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -4,18 και -0,69 W και μεταξύ των 1,09 και 6,28 W. Το απόλυτο σφάλμα είναι μικρότερο του 1,125(0.5%) W σε 8101 ώρες του έτους(92.5%).

6.4.4 Γενικοί Συγκεντρωτικοί Πινάκες

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις σφαλμάτων εκτίμησης τιμής θερμοκρασίας συγκεντρωμένες σε πινάκες.

	1 ώρα	6 ώρες	24 ώρες
MAE(°C)	0.42	0.96	1.42
Μηδενικό σφάλμα(<0.25°C,%)	44.2	18.8	16
Συχνότητα Υπερεκτίμησης(%)	27.5	40.2	40.6
Συχνότητα Υποεκτίμηση(%)	28.3	41	43.4
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (°C)	[-0.92, 0.89]	[-2.1, 2.2]	[-3.17, 3.29]

Πίνακας 6.12 Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων εκτίμησης τιμής θερμοκρασίας

Επειδή μας ενδιαφέρει η πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β δίνουμε και τον πίνακα σφαλμάτων για την παραγωγή του Φ/Β, αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ταχύτητα του ανέμου και την ένταση της ακτινοβολίας σωστά.

	1 ώρα	6 ώρες	24 ώρες
MAPE (%)	0.04	0.08	0.12
Μηδενικό σφάλμα(<1.125W, %)	99.5	95.9	92.5
Συχνότητα Υπερεκτίμησης(%)	0.3	1.1	4.8
Συχνότητα Υποεκτίμηση(%)	0.2	3	2.7
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (W)	[-0.2, 0.31]	[-0.42, 0.81]	[-0.69, 1.09]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (%)	[-0.1, 0.14]	[-0.2, 0.4]	[-0.3, 0.5]

Πίνακας 6.13 Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων εκτίμησης παραγωγής που οφείλονται στην λανθασμένη εκτίμηση τιμής θερμοκρασίας

Από τους δυο παραπάνω πίνακες μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για εκτίμηση παραγωγής Φ/Β πλαισίων δεν έχουμε ιδιαίτερο πρόβλημα από την πρόβλεψη της θερμοκρασίας με μεγάλη ακρίβεια. Δηλαδή και μεγαλύτερη ακρίβεια να είχαμε στην εκτίμηση της τιμής της θερμοκρασίας, μικρή βελτίωση θα είχαμε στην εκτίμηση της παραγωγής.

6.5 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ

Η πρόβλεψη της τιμής της ταχύτητας του ανέμου πραγματοποιήθηκε επίσης με χρήση νευρωνικών δικτύων υλοποιημένα σε matlab. Όπως περιγράψαμε και παραπάνω σαν πρώτο βήμα προσπαθήσαμε να κάνουμε πρόβλεψη με ένα μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ. Ως χρονοσειρά στόχου βάλουμε τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Εκπαιδεύσαμε με 1 έως 24 προηγούμενες τιμές και με 6 έως 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Στα αποτελέσματα που θα παρουσιάσουμε δεν παίρνουμε το καλύτερο ΤΝΔ, γιατί αυτό θα ήταν σφάλμα της γενικότητας. Για κάθε περίπτωση εκπαιδεύσαμε 5 ΤΝΔ και πήραμε το μέσο όρο των μέσων απόλυτων σφαλμάτων και των γραμμικών παλινδρομήσεων. Παίρνουμε το μέσο ΤΝΔ από την καλύτερη περίπτωση. Γενικά δεν έχουμε λόγο να επιμείνουμε πολύ στο να πετύχουμε τέλεια πρόβλεψη στην τιμή της ταχύτητας του ανέμου, λόγω της μικρής επιρροής που έχει στην τελική απόδοση του Φ/Β.

Η καλύτερη περίπτωση βρέθηκε για 4 προηγούμενες τιμές και 12 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Σε αυτή το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 0,57 m/sec, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,918. Αυτό το σφάλμα είναι μεγάλο αλλά λόγω ότι η τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι σχεδόν αμελητέα παράμετρος επιρροές της παραγωγή δεν μας ανησυχεί και πολύ. Όμως, κλείνοντας το βρόγχο στο νευρωνικό και μετατρέποντας το σε κλειστού βρόγχου μη-γραμμικό αυτοπαλινδρομικό ΤΝΔ για να δούμε το σφάλμα 6 και 24 ωρών μπροστά τα αποτελέσματα χειροτερεύουν. Για το ίδιο ΤΝΔ (ίδιο αριθμό προηγούμενων τιμών και διαστάσεις κρυφού επιπέδου) όπως για την μια 1 μπροστά πρόβλεψη στον 6ωρο ορίζοντα πρόβλεψης έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 1,12 m/sec,, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,697. Στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης έχουμε μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 1,36 m/sec,, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,491. Τα τόσο απογοητευτικά αποτελέσματα συνεχίζουν να μην ανησυχούν. Αποφασίσαμε να κάνουμε όμως και μια δοκιμή με χρήση μη-γραμμικών αυτοπαλινδρομικών ΤΝΔ με εξωτική είσοδο.

Η εξωτερική είσοδος και πάλι προήρθε από το HOMER βάζοντας του γεωγραφικό πλάτος 35.5280° και γεωγραφικό μήκος 24.0701° (τιμές που αντιστοιχούν στο πολυτεχνείο Κρήτης) καθώς και τη μέση τιμή της ταχύτητας του κάθε μηνά σύμφωνα με την TOTEXii. Είναι μια χρονοσειρά από 8760 τιμές που αντιστοιχούν στις ώρες ενός έτους. Η καλύτερη περίπτωση βρέθηκε για την πρόβλεψη επόμενης ώρας για 8 προηγούμενες τιμές και 6 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Σε αυτή το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 0,65 m/sec, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,911. Στον 6ωρο, όπως και 24ωρο, ορίζοντα πρόβλεψης, η καλύτερη περίπτωση βρέθηκε για 22 προηγούμενες τιμές και 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Στον 6ωρο ορίζοντα πρόβλεψης το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 1,19 m/sec, και η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,686, ενώ στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ίσο με 1,37 m/sec, και η γραμμική παλινδρόμηση ίση με 0,491. Όπως βλέπουμε τα αποτελέσματα είναι χειρότερα από πριν οπότε αυτή η ιδέα εγκαταλείπεται. Αυτό συμβαίνει διότι ο άνεμος είναι πιο τυχαίος από μέρα σε μέρα δεν είναι σαν την ακτινοβολία η οποία είναι γνωστή για κάθε ημερολογιακή ημέρα και ώρα σε κάθε γεωγραφικό πλάτος και μήκος και μπορεί μόνο να μειωθεί λόγω νέφωσης.

6.5.1 Πρόβλεψη Ταχύτητας Ανέμου επόμενης Ώρας

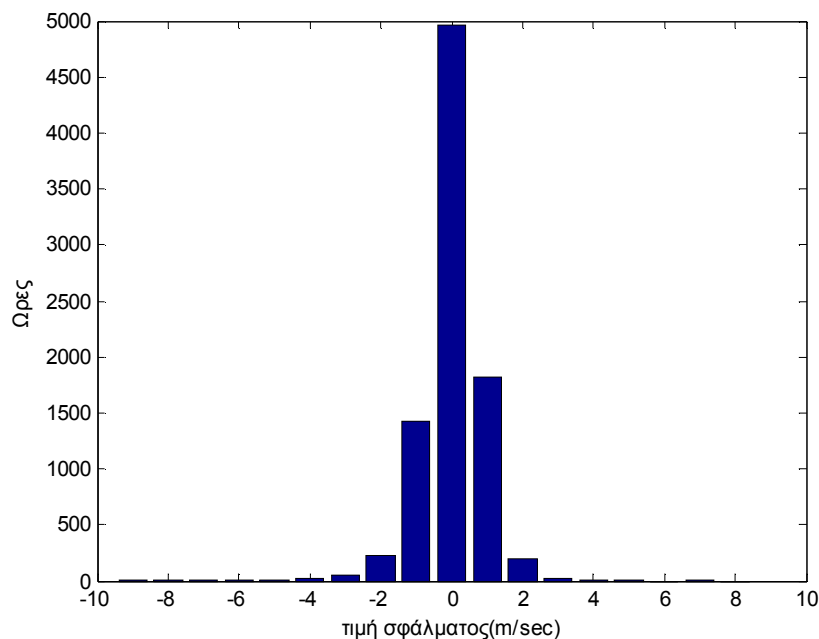
Χρησιμοποιώντας λοιπόν μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομικά ΤΝΔ, όπως μόλις τα περιγράψαμε κάνουμε δοκιμές να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της

χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο. Δοκιμάζουμε από 2 μέχρι 24 προηγούμενες τιμές με βήμα 2 και από 6 μέχρι 24 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο με βήμα 6.

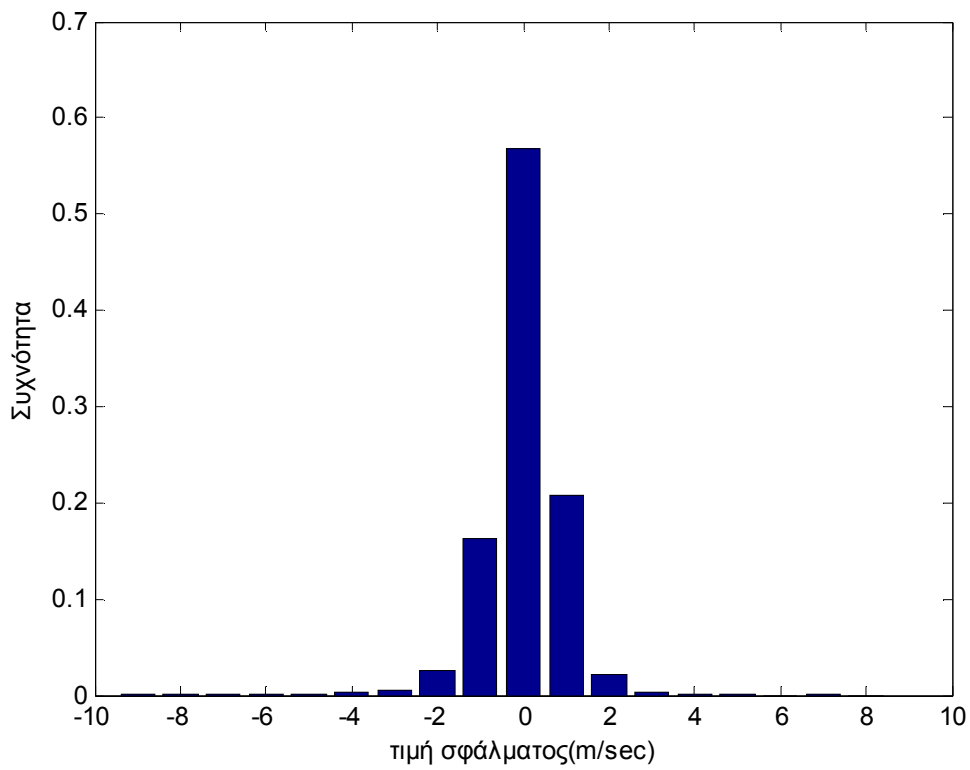
	6	12	18	24
2	0.6110	0.5846	0.5811	0.5792
4	0.6130	0.5819	0.5979	0.5804
6	0.5811	0.5842	0.5823	0.5815
8	0.5848	0.5870	0.5804	0.5810
10	0.5705	0.5920	0.6084	0.5817
12	0.5836	0.5864	0.5798	0.5806
14	0.5868	0.5867	0.5842	0.5879
16	0.6017	0.5822	0.5860	0.5853
18	0.5802	0.5979	0.5835	0.5864
20	0.5838	0.5822	0.6015	0.5972
22	0.5833	0.5846	0.5857	0.5872
24	0.5794	0.5803	0.5936	0.5905

Πίνακας 6.14 Μέσο απόλυτο σφάλμα(m/sec) για αριθμό προηγούμενων τιμών (γραμμές) και αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου (στήλες)

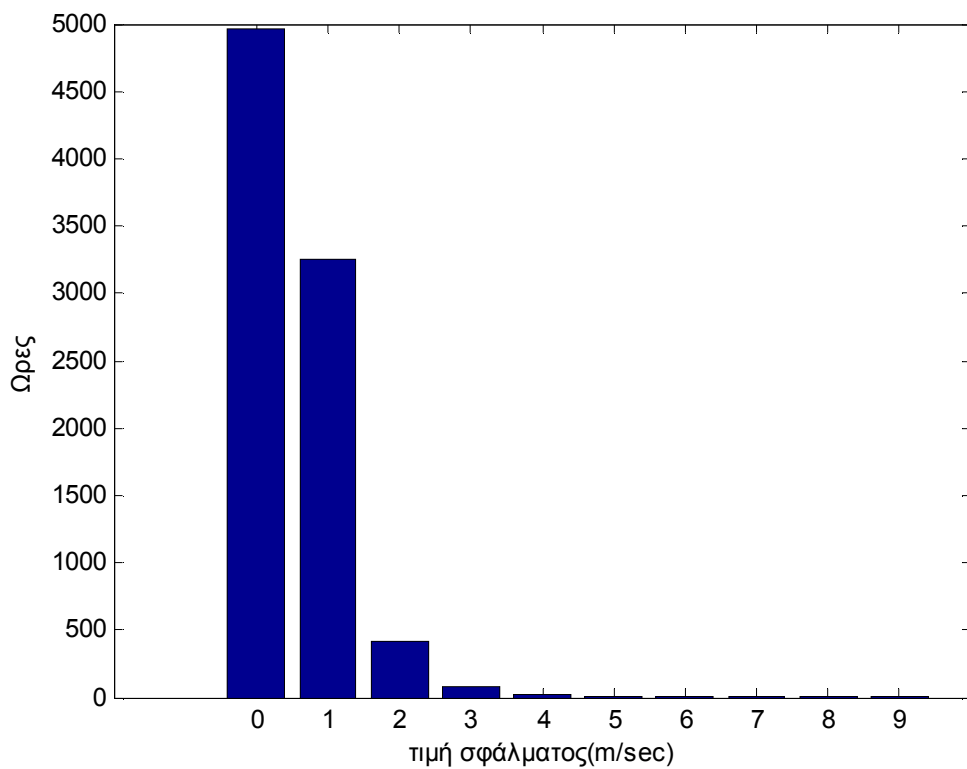
Το δίκτυο με την καλύτερη απόδοση φαίνεται να είναι αυτό με 10 προηγούμενες τιμές της χρονοσειρά στόχου και 6 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο. Μέσο απόλυτο σφάλμα 0,5705 m/sec και γραμμική παλινδρόμηση 0,9181 για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



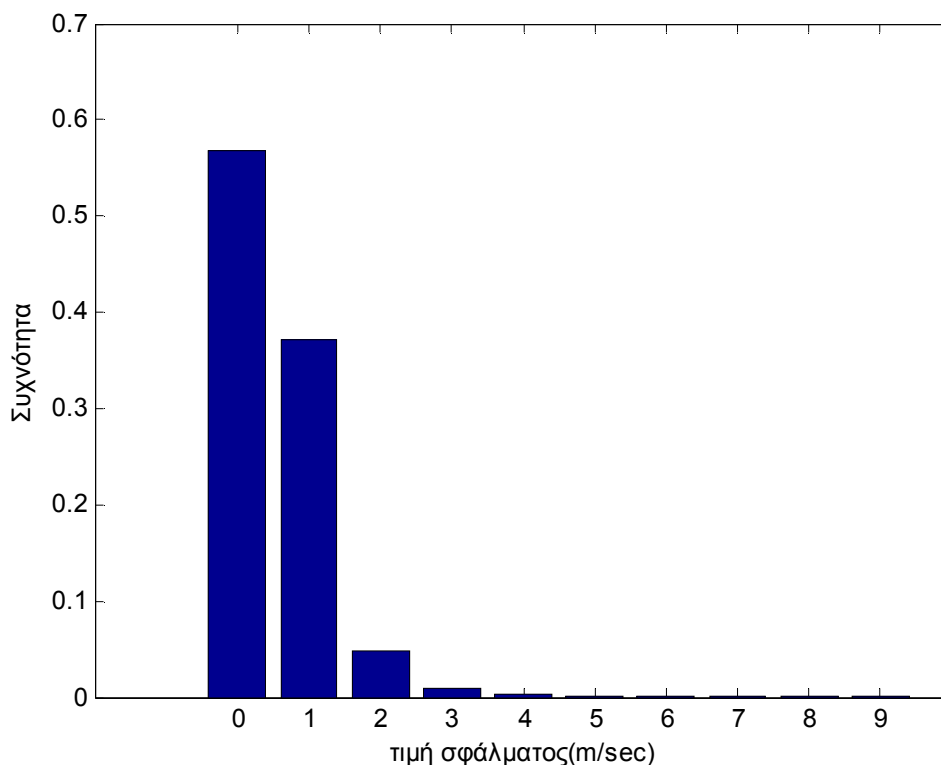
Εικόνα 6.62 Ιστόγραμμα σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου επόμενης ώρας



Εικόνα 6.63 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου επόμενης ώρας



Εικόνα 6.64 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου επόμενης ώρας

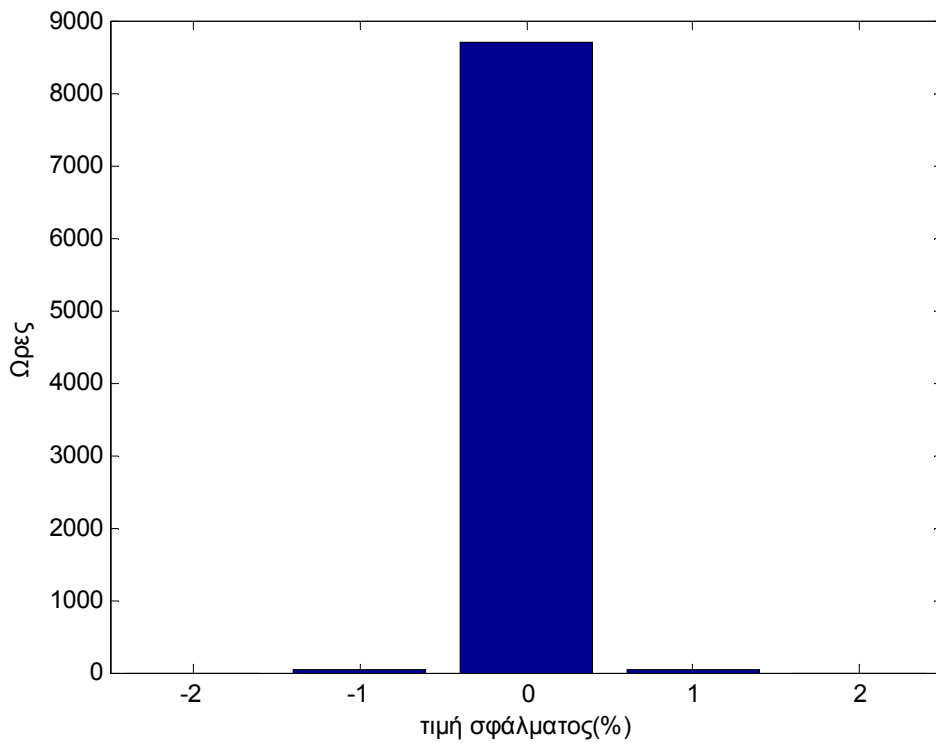


Εικόνα 6.651 Ιστογράμμα απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου επόμενης ώρας

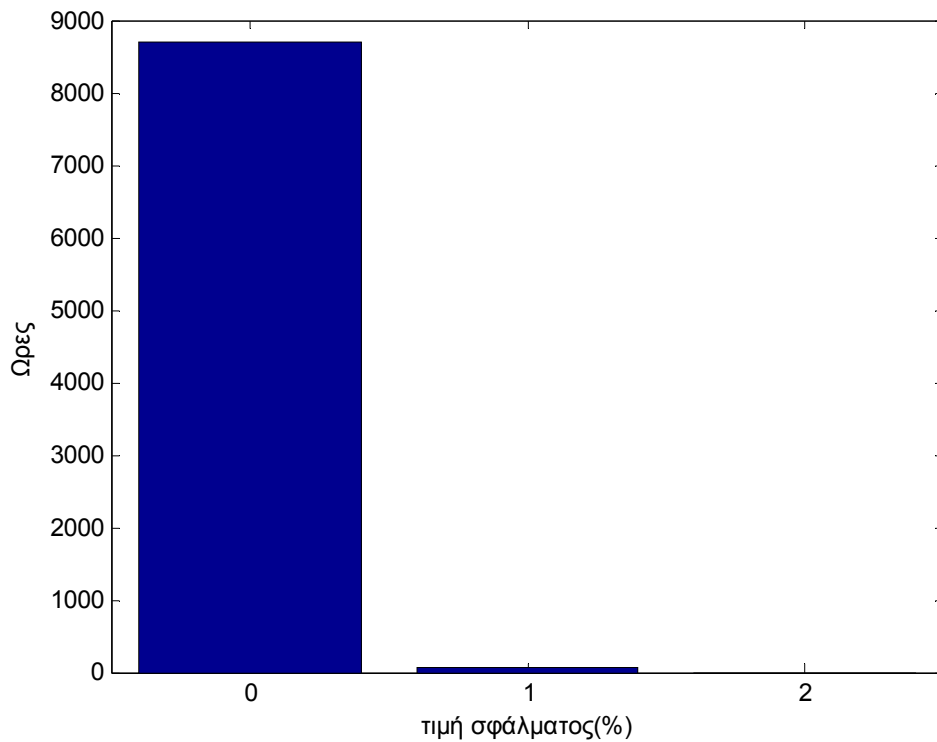
Να επισημάνουμε ότι τα σφάλματα μικρότερα του $\pm 0,25$ m/sec κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του 0 κάτι που συμβαίνει 2777 φορές δηλαδή στο 31,7% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 2682(30,6%) υποεκτιμούμε την τιμή της ταχύτητας του ανέμου ενώ 3300(37,7%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ -1,3 και 1,2 m/sec. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -8,9 και -1,3 m/sec και μεταξύ των 1,2 και 7,1 m/sec.

6.5.1.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στην πρόβλεψη επόμενης ώρας ταχύτητας ανέμου

Όμως στην εργασία αυτή δεν μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της τιμής της ταχύτητας ανέμου άμεσα. Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της ταχύτητας ανέμου επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/Β. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της ταχύτητας ανέμου θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/Β είναι 0,08W(0.04%), δηλαδή πρακτικά 0, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



Εικόνα 6.66 Ιστόγραμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου επόμενης ώρας **Εικόνα 6.67** Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου επόμενης ώρα



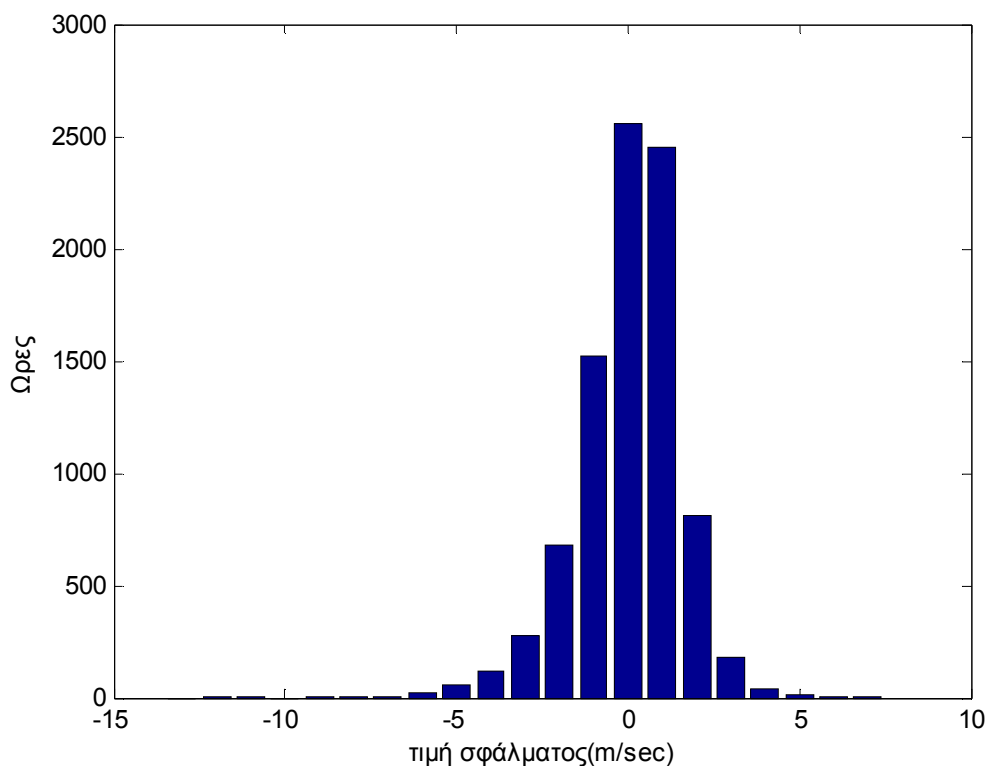
Εικόνα 6.68 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου επόμενης ώρας **Εικόνα 6.69** Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου επόμενης ώρας

Στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ $-0,27(0.1\%)$ και $0,27(0.1\%)$ W, δηλαδή πρακτικά 0 W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-3,4$ και $-0,27$ W και μεταξύ των $0,27$ και $2,5$ W. Το απόλυτο σφάλμα είναι μικρότερο του $1.125(0.5\%)$ W σε 8686 ώρες του έτους (99,2%).

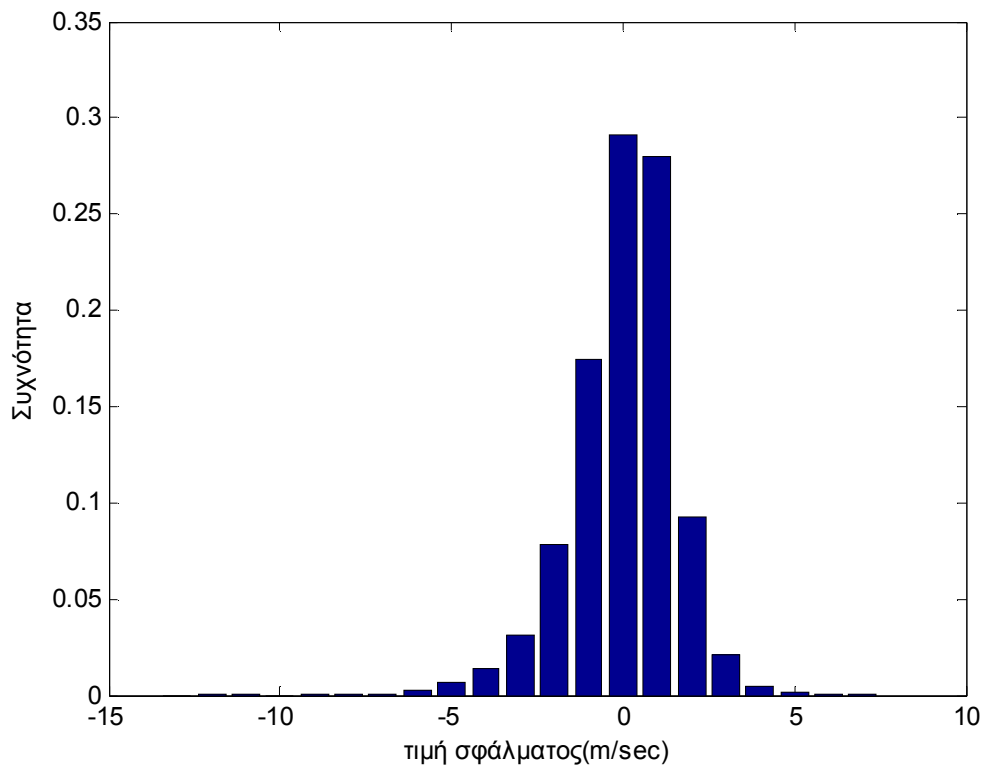
6.5.2 Πρόβλεψη Ταχύτητας Ανέμου με 6ωρο Ορίζοντα

Με χρήση ομοίων με τα προηγούμενα μη-γραμμικά αυτοπαλινδρομικά ΤΝΔ χωρίς εξωτερική είσοδο θα κάνουμε εκτίμηση της τιμής της ταχύτητας του ανέμου και για περισσότερες από μια ώρες μπροστά. Όμως επειδή αυτά τα θέλουν σαν είσοδο την τιμή της ταχύτητας του ανέμου μια ώρα πριν από την ώρα για την οποία γίνεται η εκτίμηση, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σαν είσοδο την εκτίμηση αυτής της τιμής που έχει προκύψει από την έξοδο του προηγούμενου ΤΝΔ. Έτσι αυτό που κάνουμε είναι να κλείσουμε το βρόγχο και να ανατροφοδοτούμε την έξοδο στην είσοδο. Με αυτό τον τρόπο προβλέπουμε τιμές της έντασης της ακτινοβολίας μια ώρα πιο μελλοντικά μετά από κάθε ανατροφοδότηση. Όμως επειδή όπως δείξαμε προηγουμένως η επιρροή που έχουν τα σφάλματα της εκτίμησης της ταχύτητα του ανέμου στην παραγωγή είναι πρακτικά σχεδόν 0 αποφασίσαμε να μην κάνουμε καινούργιες δοκιμές για να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο.

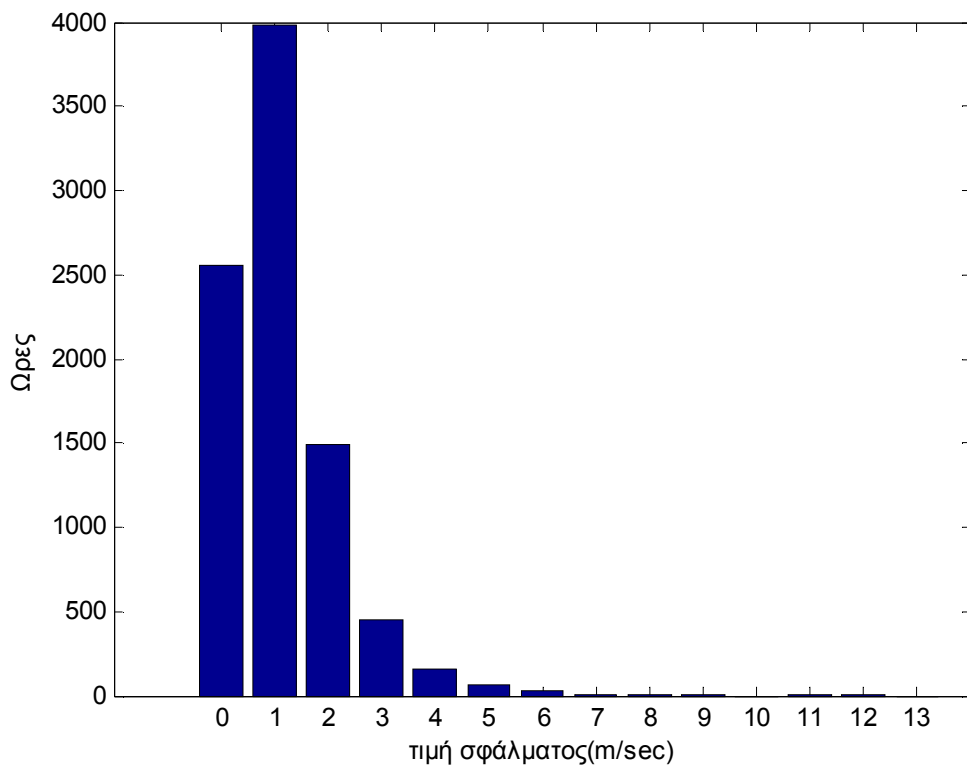
Στον 6ωρο ορίζοντα πρόβλεψης βρήκαμε μέσο απόλυτο σφάλμα $1,12$ m/sec και γραμμική παλινδρόμηση $0,731$ για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



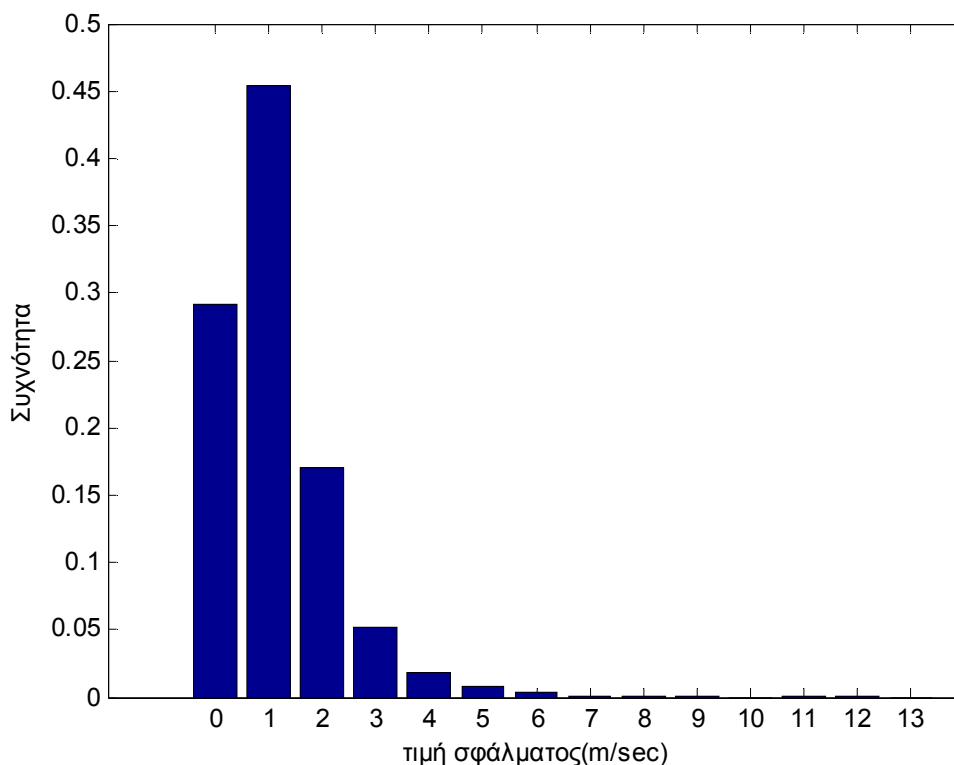
Εικόνα 6.70 Ιστόγραμμα σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου 6 ώρες μπροστά



Εικόνα 6.71 Ιστογράμμο συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας άνεμου 6 ώρες μπροστά



Εικόνα 6.72 Ιστογράμμο απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας άνεμου 6 ώρες μπροστά

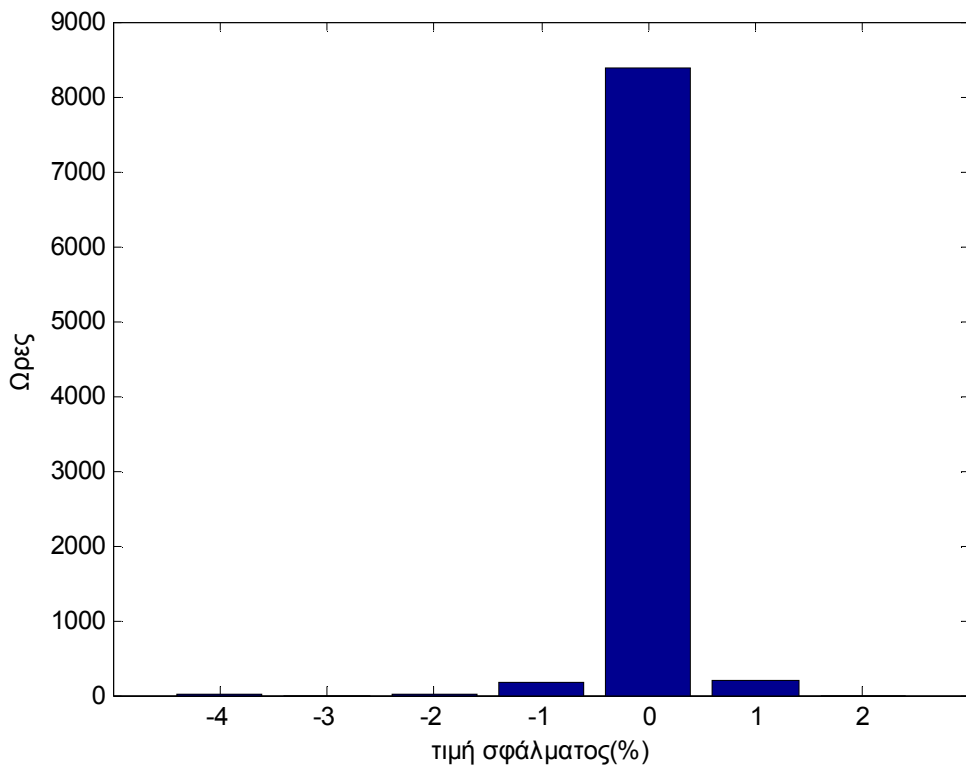


Εικόνα 6.73 Ιστογράμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας άνεμου 6 ώρες μπροστά

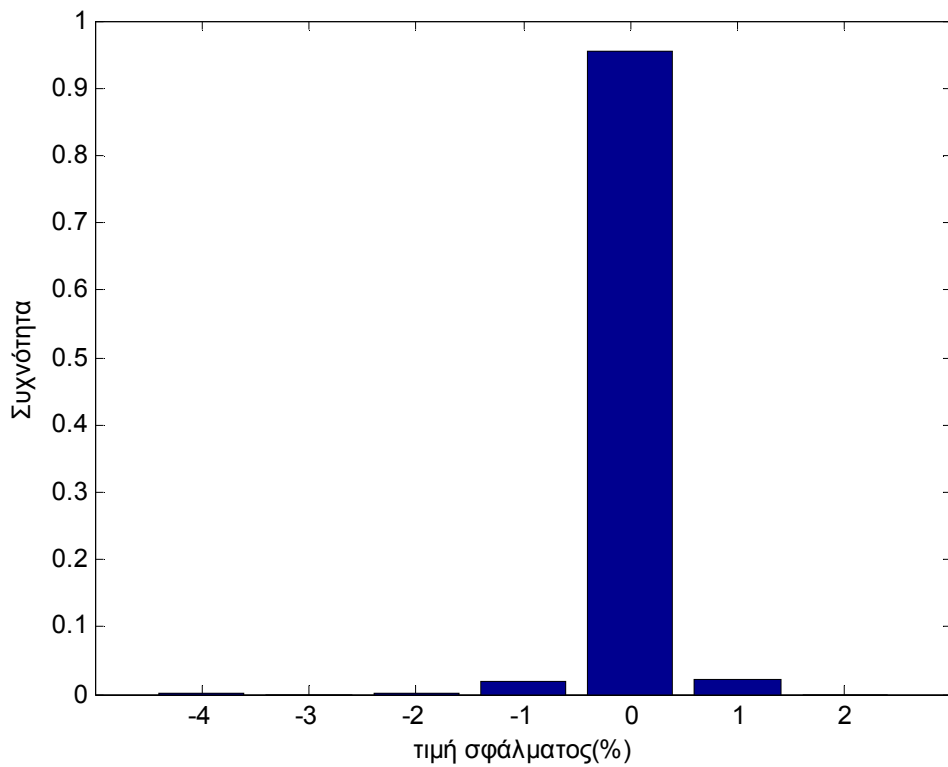
Να επισημάνουμε ότι σφάλματα μικρότερα του $\pm 0,25$ m/sec κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του 0 κάτι που συμβαίνει 1310 φορές δηλαδή στο 15% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 3255 (37.2%) ώρες υποεκτιμούμε την τιμή της ταχύτητας του άνεμου ενώ 4195 (47.8%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ $-2,62$ και $2,07$ m/sec. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-12,19$ και $-2,62$ m/sec και μεταξύ των $2,07$ και $6,84$ m/sec.

6.5.2.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στον δωρο ορίζοντα πρόβλεψης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

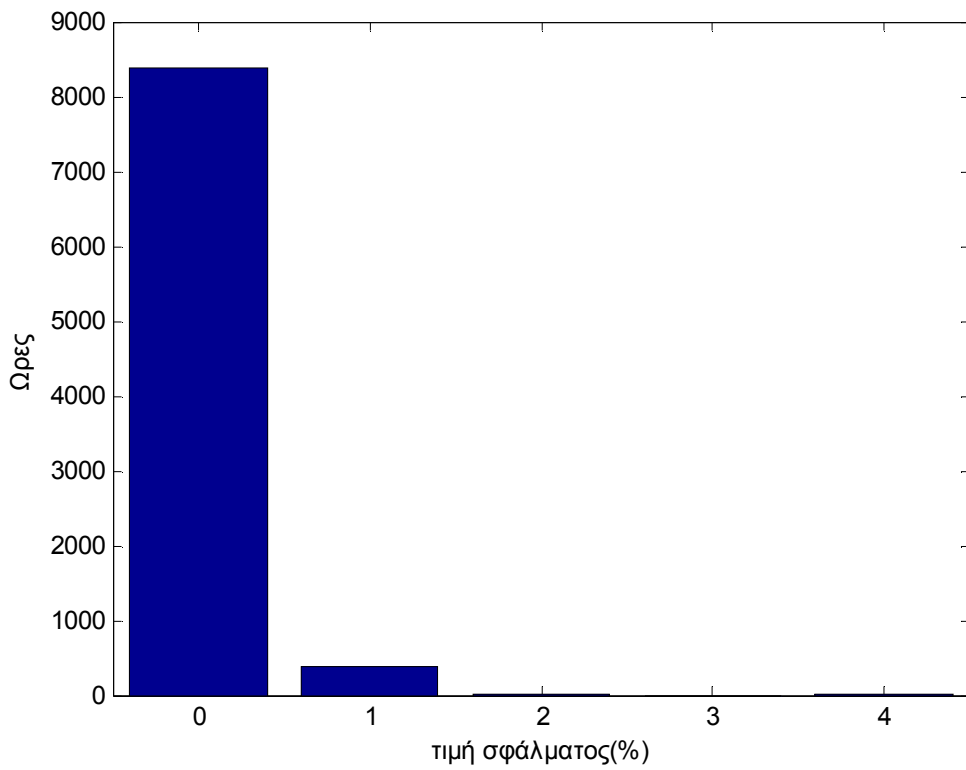
Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της ταχύτητας ανέμου επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/Β. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της ταχύτητας ανέμου θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/Β είναι $0,17W(0.08\%)$, δηλαδή πρακτικά 0, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



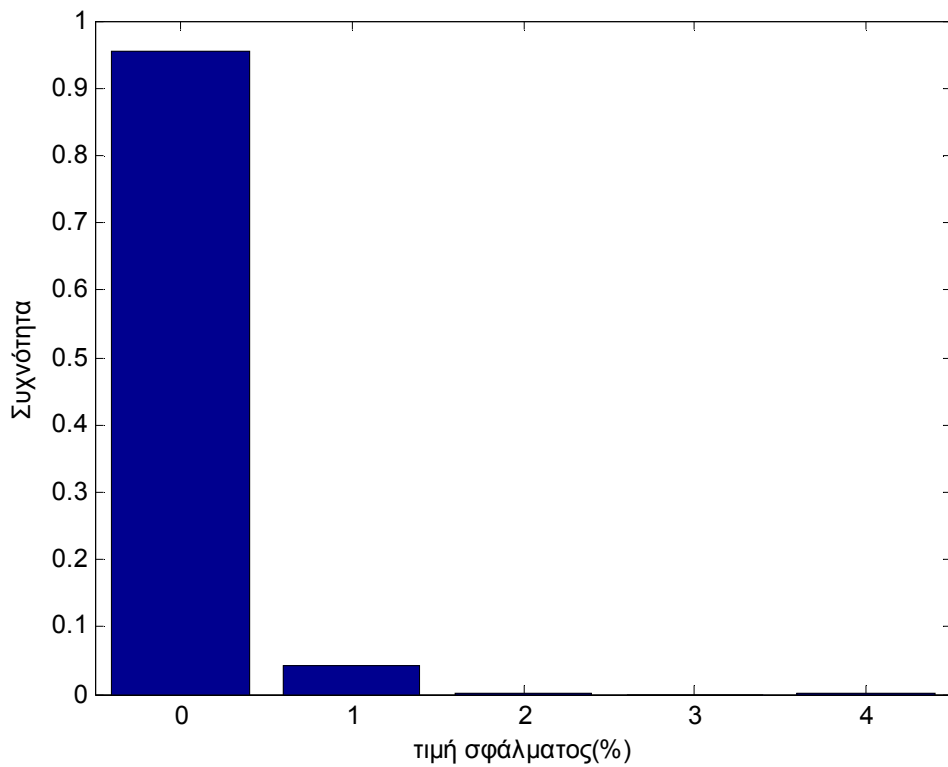
Εικόνα 6.74 Ιστόγραμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου βωρου ορίζοντα



Εικόνα 6.75 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου βωρου ορίζοντα



Εικόνα 6.76 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου δωρου ορίζοντα

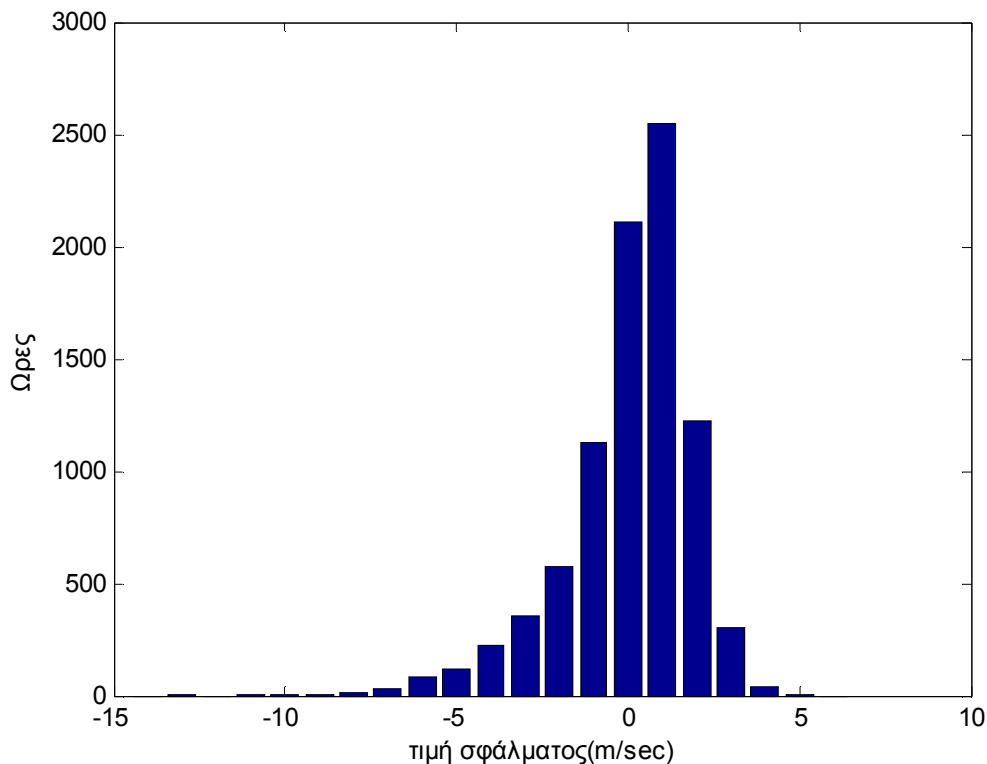


Εικόνα 6.77 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου δωρου ορίζοντα

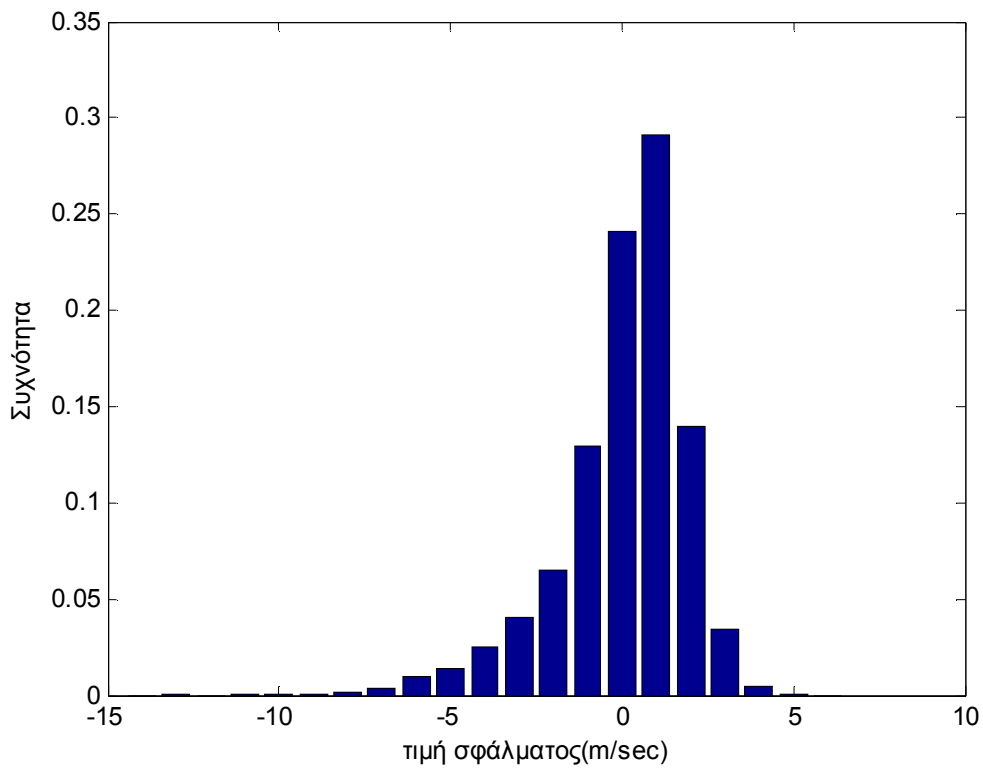
Στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ των -0,47(0.2%) και 0.64(0.3%) W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -7,92 και -0,47 W και μεταξύ των 0,64 και 3,09 W. Το απόλυτο σφάλμα είναι μικρότερο του 1.125(0.5%) W σε 8371 ώρες του έτους(95,6%).

6.5.3 Πρόβλεψη Ταχύτητας Ανέμου με 24ωρο Ορίζοντα

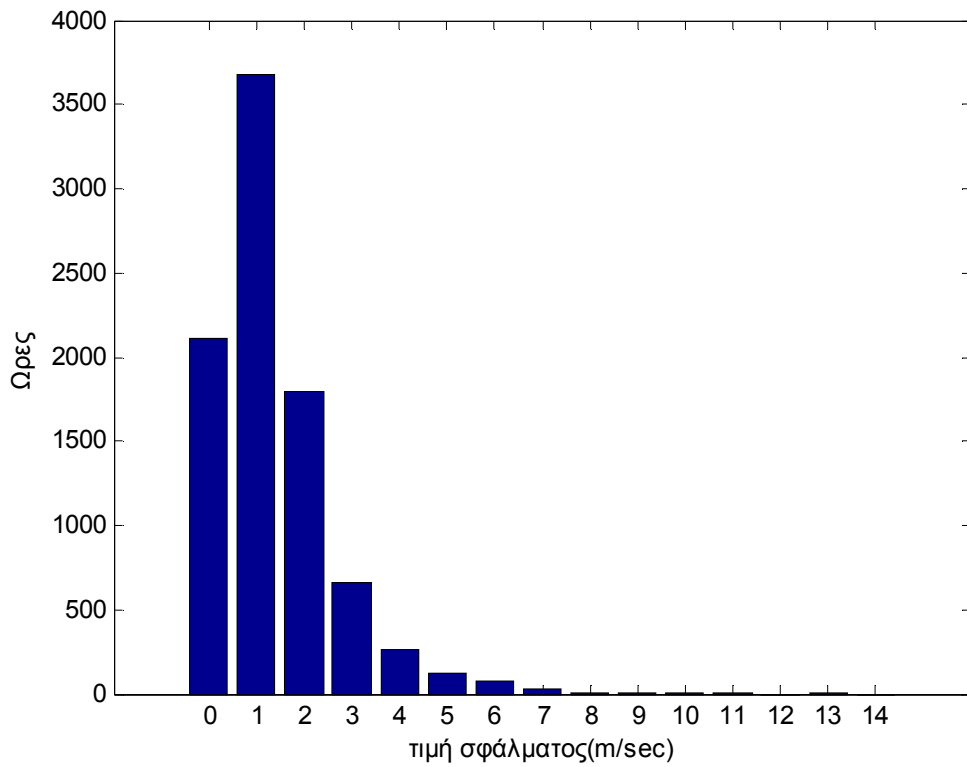
Ομοίως με την 6 ώρες μπροστά εκτίμηση ταχύτητας ανέμου έτσι και στην 24ωρες αποφασίσαμε να μην κάνουμε καινούργιες δόκιμες για να βρούμε το καλύτερο συνδυασμό προηγούμενων τιμών της χρονοσειρά στόχου και αριθμού νευρώνων στο κρυφό επίπεδο. Στην 24 ώρες μπροστά πρόβλεψη βρήκαμε μέσο απόλυτο σφάλμα 1,37 m/sec και γραμμική παλινδρόμηση 0,445 για δοκιμές από όλο το έτος. Ας δούμε σε ιστογράμματα τα αποτελέσματα:



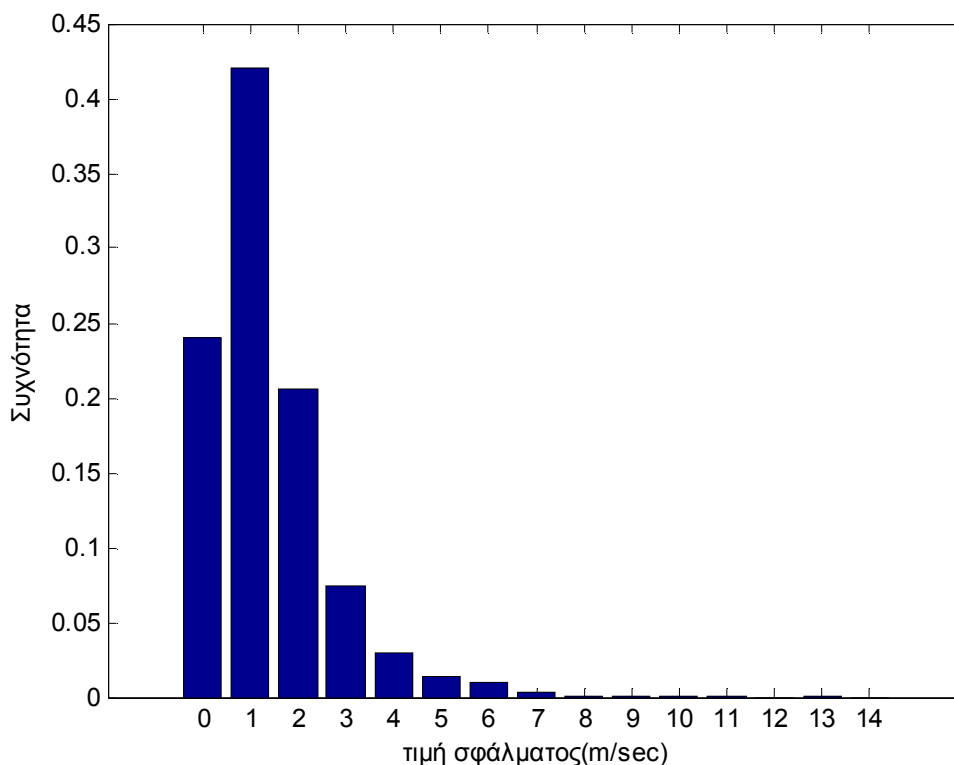
Εικόνα 6.78 Ιστόγραμμα σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου 24ωρου ορίζοντα



Εικόνα 6.79 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας άνεμου 24ωρου ορίζοντα



Εικόνα 6.80 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας άνεμου 24ωρου ορίζοντα

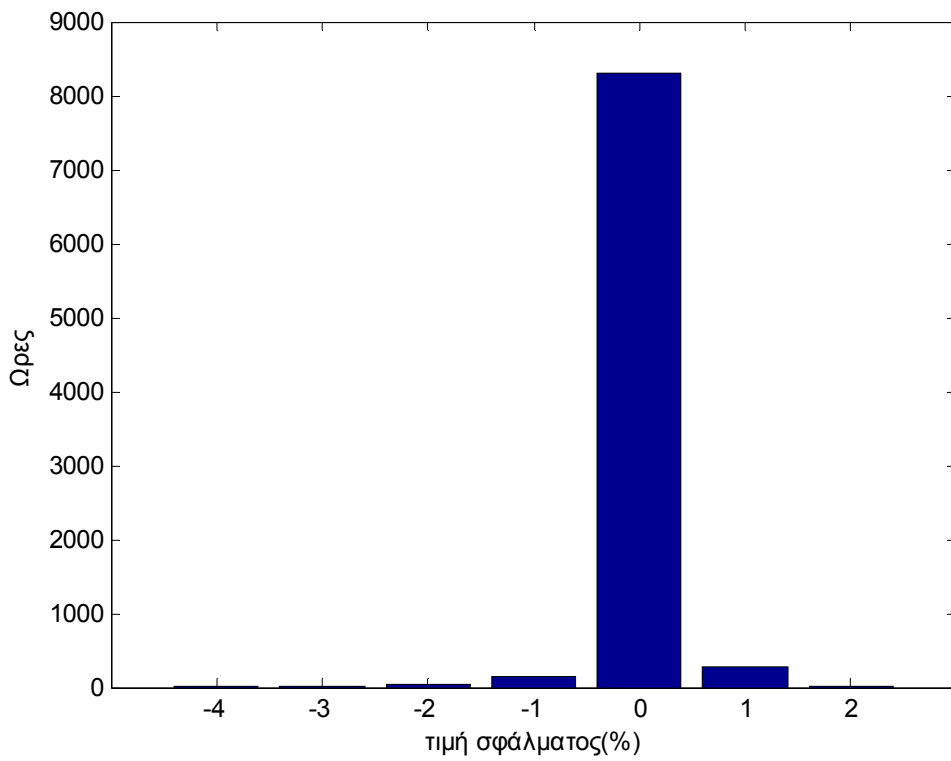


Εικόνα 6.81 Ιστογράμμο συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου 24ωρου ορίζοντα

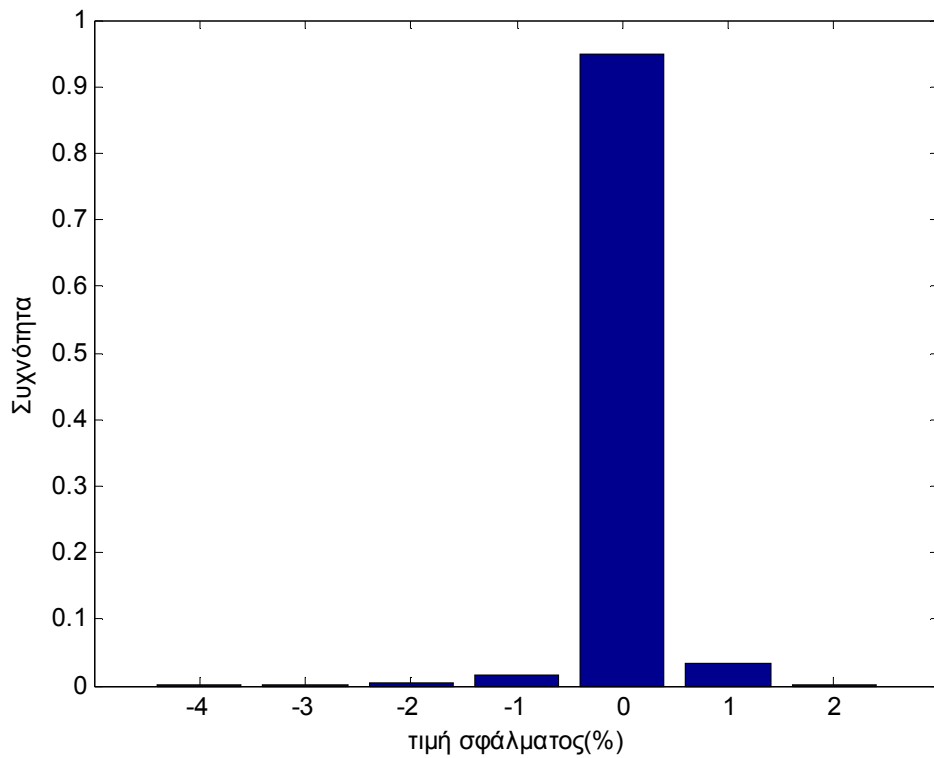
Να επισημάνουμε ότι σφάλματα μικρότερα του $\pm 0,25$ m/sec κατηγοριοποιήθηκαν στην κλάση του 0 κάτι που συμβαίνει 1082 φορές δηλαδή στο 12.4% των προβλέψεων. Ενδιαφέρον επίσης έχει να αναφέρουμε ότι 2960 (33,8%) υποεκτιμούμε την τιμή της ταχύτητας του ανέμου ενώ 4718 (53,8%) την υπερεκτιμούμε. Ακόμα να προσθέσουμε ότι στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ $-3,63$ και $2,36$ m/sec. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των $-13,12$ και $-3,63$ m/sec και μεταξύ των $2,36$ και $5,09$ m/sec.

6.5.3.1 Σφάλματα στην πρόβλεψη παραγωγής που οφείλονται στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης ταχύτητας του ανέμου

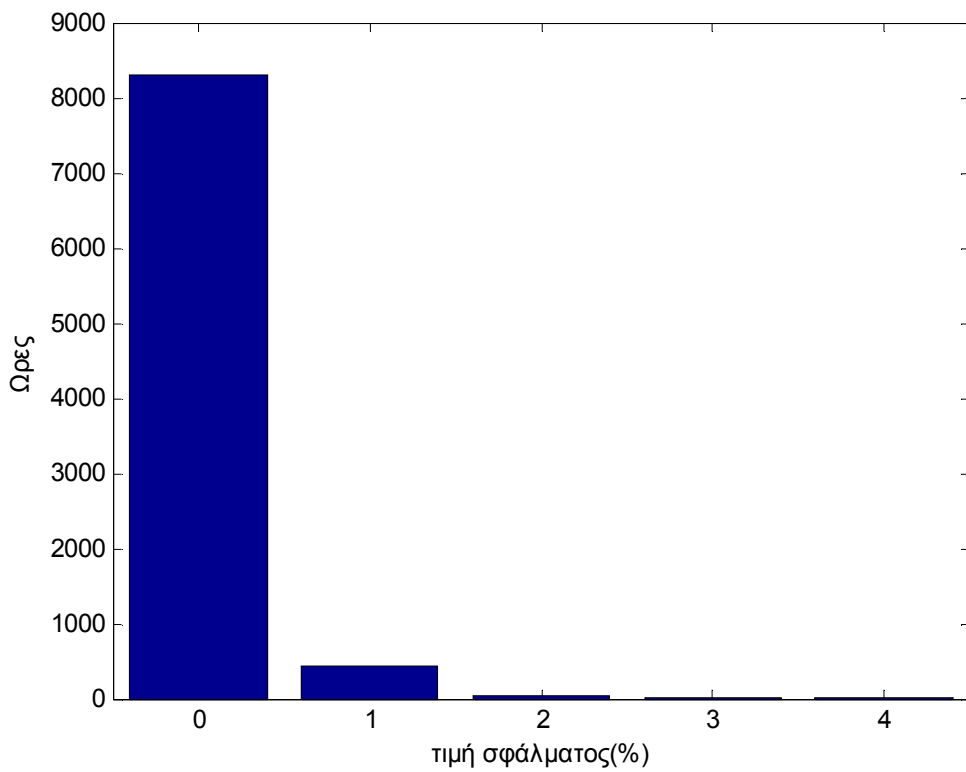
Όμως στην εργασία αυτή δεν μας ενδιαφέρει η εκτίμηση της τιμής της ταχύτητας ανέμου άμεσα. Εμείς επιθυμούμε πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β οπότε θέλουμε να δούμε πως το σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της ταχύτητας ανέμου επηρεάζει την εκτίμηση παραγωγής του Φ/Β. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία σωστά, τότε η λανθασμένη εκτίμηση της τιμής της ταχύτητας ανέμου θα έχει της εξής συνέπειες. Το μέσο απόλυτο σφάλμα για την παραγωγή του Φ/Β είναι $0,20W$ (0.09%), δηλαδή πρακτικά 0, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω ιστογράμματα.



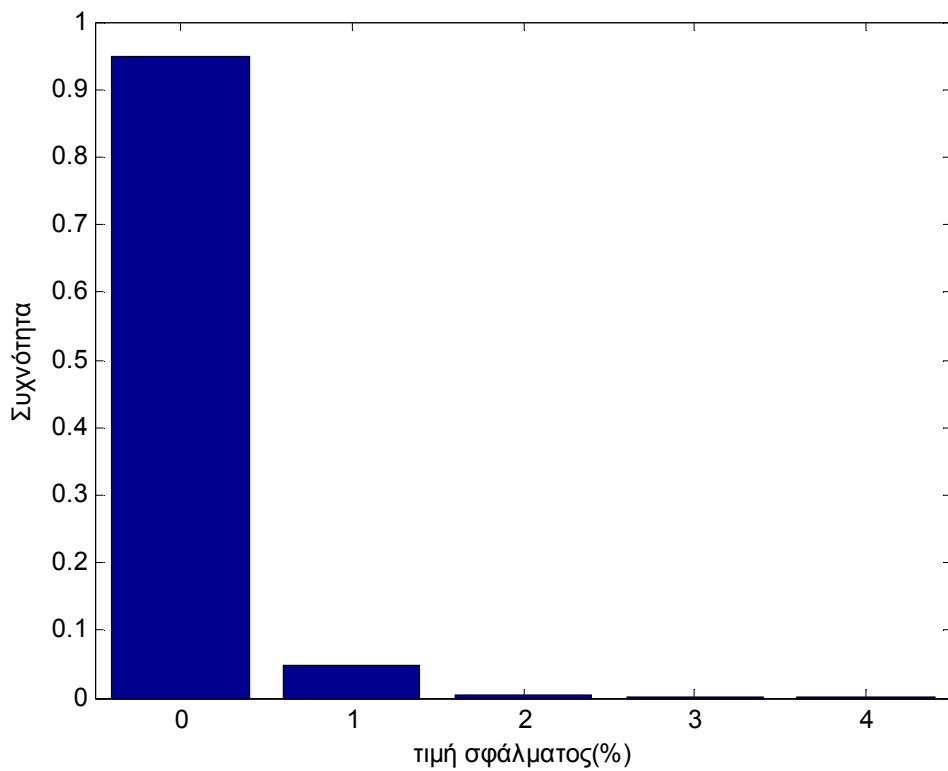
Εικόνα 6.82 Ιστόγραμμα σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου 24 ώρες μπροστά



Εικόνα 6.83 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος παραγωγής Φ/Β που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου 24 ώρες μπροστά



Εικόνα 6.84 Ιστόγραμμα απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου 24 ώρες μπροστά



Εικόνα 6.85 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος παραγωγής Φ/B που οφείλεται στην πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου 24 ώρες μπροστά

Στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% το σφάλμα είναι μεταξύ των -0,42(0.2%) και 0.88(0.4%) W. Ενώ στο 5% των ακραίων περιπτώσεων το σφάλμα είναι μεταξύ των -8,79 και -0,42 W και μεταξύ των 0,88 και 3,69 W. Το απόλυτο σφάλμα είναι μικρότερο του 1.125(0.5%) W σε 8304 ώρες του έτους(94.8%).

6.5.4 Γενικοί Συγκεντρωτικοί Πινάκες

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις σφαλμάτων εκτίμησης τιμής ταχύτητας ανέμου συγκεντρωμένες σε πινάκες.

	1 ώρα	6 ώρες	24 ώρες
MAE(m/sec)	0.57	1.12	1.37
Μηδενικό σφάλμα(<0.25m/sec,%)	31.7	15	12.4
Συχνότητα Υπερεκτίμησης(%)	37.7	47.8	53.8
Συχνότητα Υποεκτίμηση(%)	30.6	37.2	33.8
Διάστημα εμπιστοσύνης 95% (m/sec)	[-1.31, 1.21]	[-2.62, 2.07]	[-3.63, 2.36]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (m/sec)	[-0.89, 0.91]	[-1.85, 1.62]	[-2.41, 1.93]

Πίνακας 6.15 Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων εκτίμησης ταχύτητας ανέμου

Επειδή μας ενδιαφέρει η πρόβλεψη της παραγωγής Φ/Β δίνουμε και τον πίνακα σφαλμάτων για την παραγωγή του Φ/Β, αν θεωρήσουμε ότι έχουμε εκτιμήσει την ένταση της ακτινοβολίας και την θερμοκρασία σωστά.

	1 ώρα	6 ώρες	24 ώρες
MAPE (%)	0.04	0.08	0.09
Μηδενικό σφάλμα(<1.125W, %)	99.2	95.6	94.8
Συχνότητα Υπερεκτίμησης(%)	0.3	2.2	3.3
Συχνότητα Υποεκτίμηση(%)	0.5	2.2	1.9
Διάστημα εμπιστοσύνης 95% (W)	[-0.27, 0.27]	[-0.47, 0.64]	[-0.42, 0.88]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (%)	[-0.1, 0.1]	[-0.21, 0.28]	[-0.19, 0.39]

Πίνακας 6.16 Γενικός συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων εκτίμησης παραγωγής που οφείλονται στην λανθασμένη εκτίμηση τιμής ταχύτητας ανέμου

Από τους δυο παραπάνω πίνακες μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για εκτίμηση παραγωγής Φ/Β πλαισίων δεν έχουμε κανένα πρόβλημα από την ταχύτητα του ανέμου. Αν μελετούσαμε παραγωγή ανεμογεννητριών μάλλον η προσέγγιση της εκτίμησης της ταχύτητα του ανέμου με ΤΝΔ δεν θα ήταν καθόλου ικανοποιητική. Ας δούμε τι συμβαίνει αν δεν κάνουμε καθόλου πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου.

6.5.5 Αποτελέσματα χωρίς πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου

Επειδή η επιρροή της ταχύτητας του ανέμου στην παραγωγή Φ/Β πλαισίου είναι πολύ μικρή και ταυτόχρονα η εκτίμηση που κάναμε πριν είναι αρκετά εσφαλμένη, ας δούμε τι αποτελέσματα παίρνουμε αν δεν κάνουμε πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου. Θα πάρουμε ως τιμή ταχύτητας ανέμου για την ώρα πρόβλεψης την τιμή της ταχύτητας του ανέμου της παρούσας ώρας.

	ΜΑΕ(m/sec)	Μηδενικό σφάλμα(<0.25m/sec,%)	Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (m/sec)
Με πρόβλεψη	1.12	15	[-2.62, 2.07]
Χωρίς πρόβλεψη	1.51	11.8	[-3.18, 3.17]

Πίνακας 6.17 Πινάκας σύγκρισης σφαλμάτων εκτίμησης ταχύτητας ανέμου με ΤΝΔ και χωρίς για 6ωρο ορίζοντα πρόβλεψης

Το σφάλμα στην εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου με ΤΝΔ ήταν μεγάλο. Χωρίς ΤΝΔ, όπως βλέπουμε στο παραπάνω πίνακα είναι ακόμα χειρότερο. Όμως ας δούμε στον επόμενο πίνακα πως αυτό μπορεί να επηρεάσει την εκτίμηση παραγωγής του πλαισίου.

	ΜΑΡΕ (%)	Μηδενικό σφάλμα(<1.125W, %)	Διάστημα εμπιστοσύνης 90% (%)
Με πρόβλεψη	0.08	95.6	[-0.21, 0.28]
Χωρίς πρόβλεψη	0.13	91.8	[-0.81, 0.16]

Πίνακας 6.18 Πινάκας σύγκρισης σφαλμάτων εκτίμησης παραγωγής που οφείλονται στην λανθασμένη εκτίμηση τιμής ταχύτητας ανέμου με και χωρίς ΤΝΔ

Δεν παρατηρούμε μεγάλες διαφορές στο σφάλμα παραγωγής για να αξίζει θεαματικά η πρόβλεψη της τιμής της ταχύτητας του ανέμου με ΤΝΔ. Θα μπορούσαμε και να μην είχαμε κάνει πρόβλεψη.

7. Αποτελέσματα Τελικής Πρόβλεψης

Τώρα που έχουμε κάνει προβλέψεις για τα μετρολογικά μας δεδομένα(τιμές έντασης ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου), ακλουθώντας το μοντέλο πρόβλεψης μας (εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων στο Sandia model), είναι ώρα να εξάγουμε τα τελικά αποτελέσματα πρόβλεψης της παραγωγής του πλαισίου ESP series60 poly 225W.

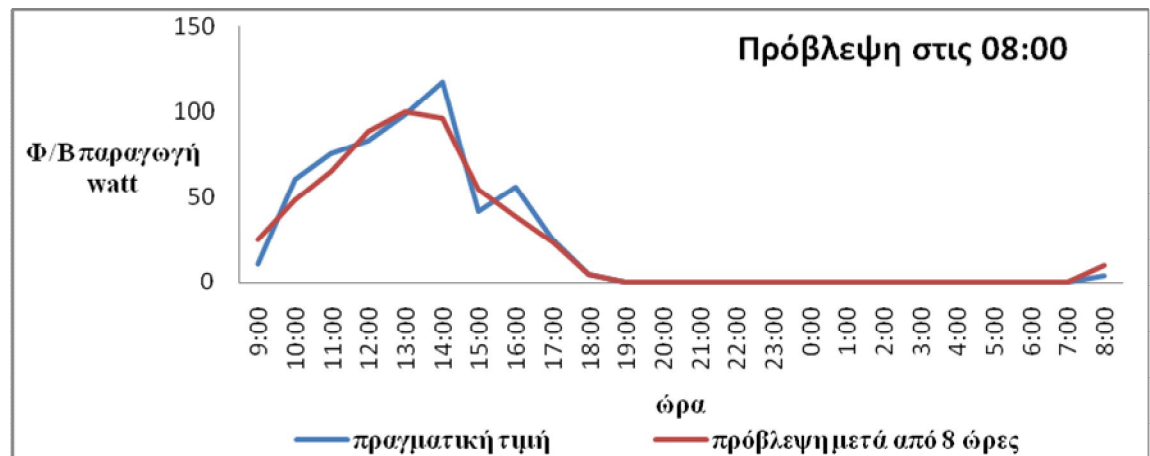
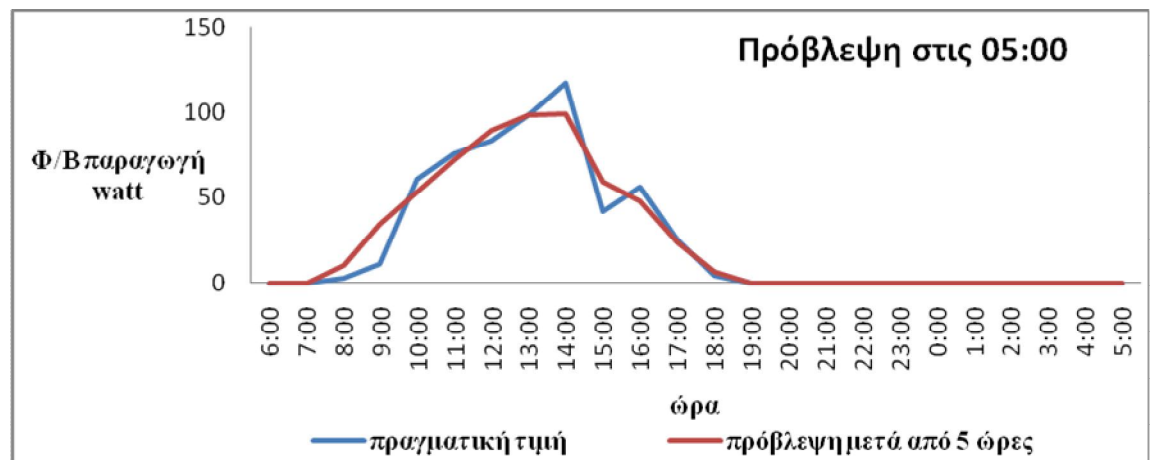
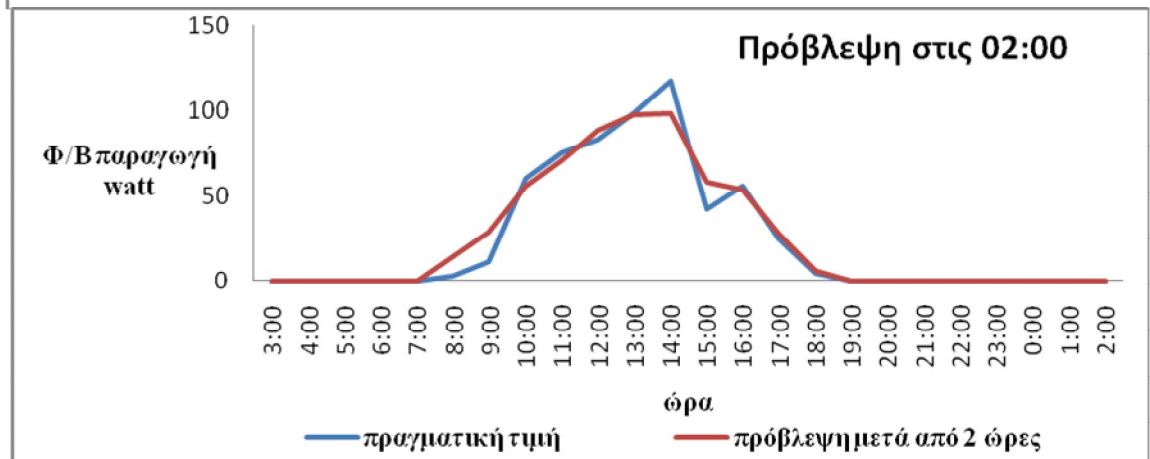
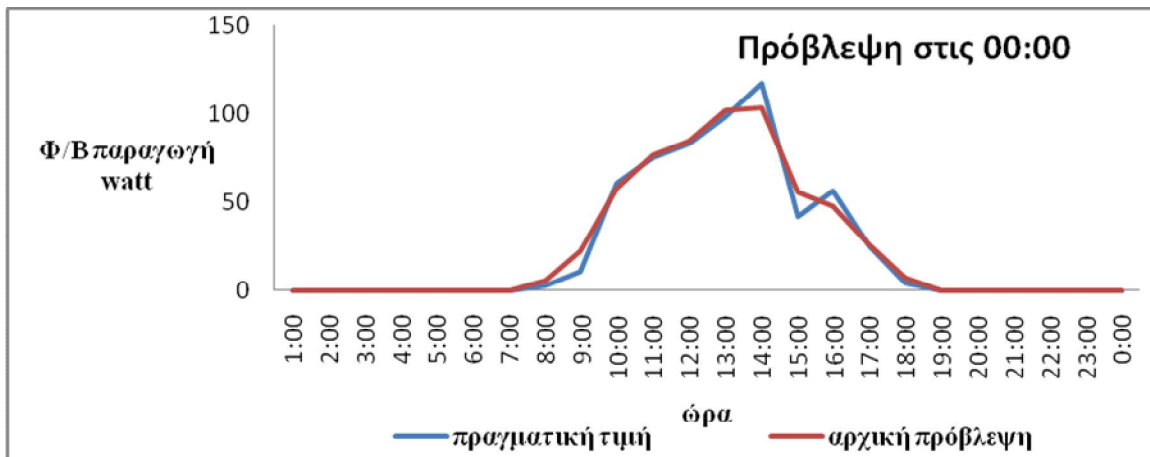
Για την πρόβλεψη επόμενης ώρας αναμένουμε πολύ καλά αποτελέσματα γιατί κάθε μετεωρολογικό δεδομένο και κυρίως η τιμή της έντασης της ακτινοβολίας έχει προβλεφτεί με καλή ακρίβεια. Όσο αναφορά την πρόβλεψη της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για πρόβλεψη από 2 έως 6 ώρες μπροστά χρησιμοποιηθήκαν τα ΤΝΔ που είχαν εξεταστεί ώστε να έχουν ελάχιστο σφάλμα στην 6 ώρες μπροστά πρόβλεψη. Για 7 έως 24 ώρες, τα άλλα ΤΝΔ, που είχαν εξεταστεί ώστε να έχουν ελάχιστο σφάλμα στην 24 ώρες μπροστά πρόβλεψη.

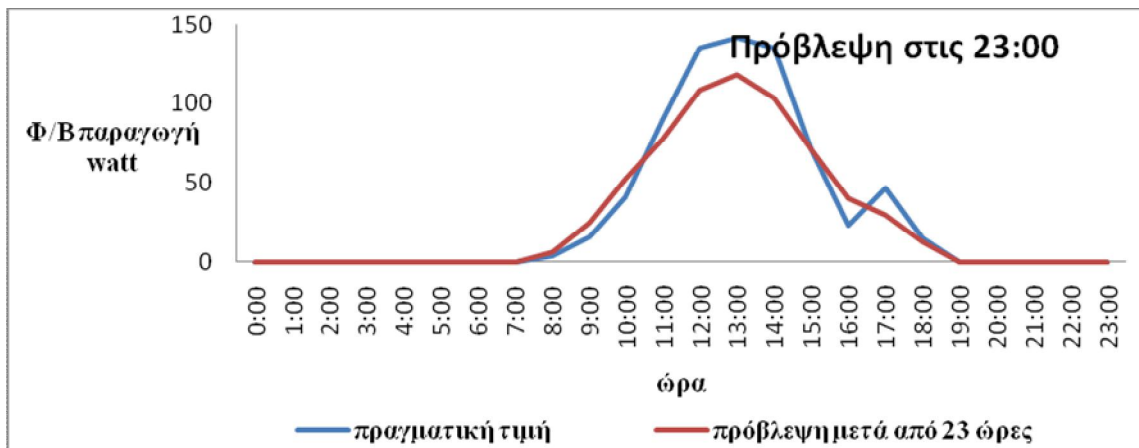
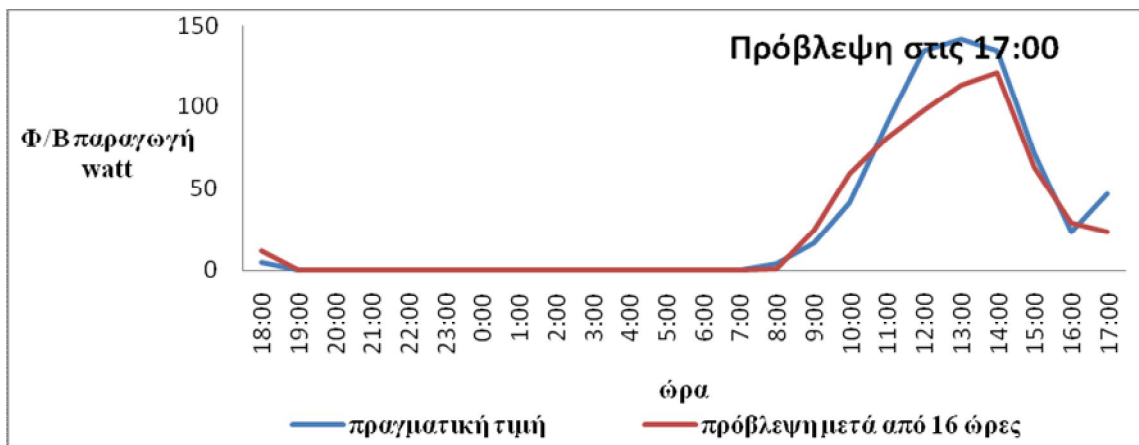
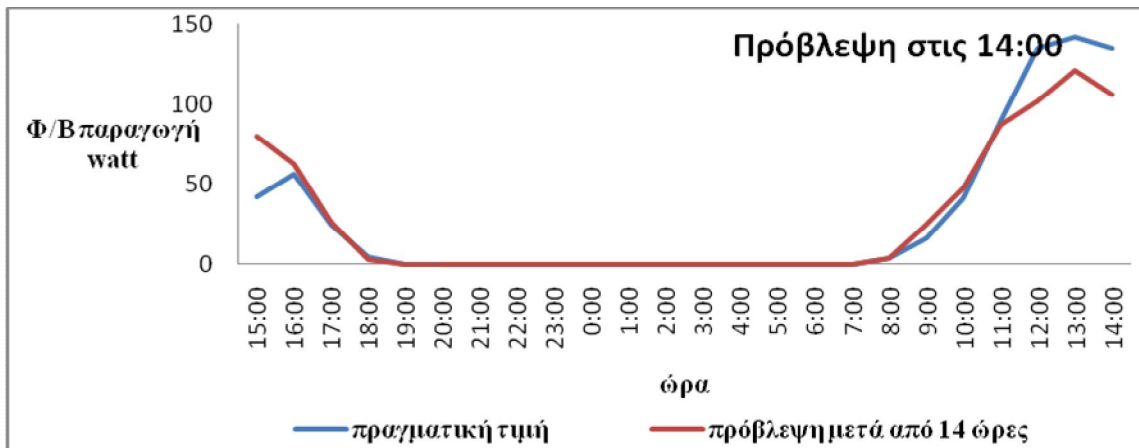
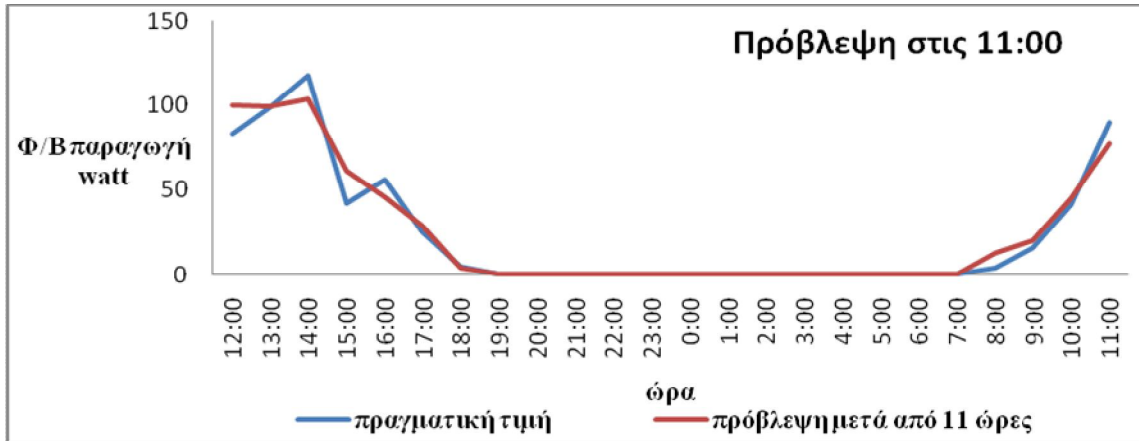
Θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα αρχικά για όλο το έτος. Σε δεύτερη φάση χωρίζουμε το έτος σε δυο εποχές με βάση τις ημερομηνίες της ισημερίας(21^η Μαρτίου και 21^η Σεπτεμβρίου). Σε τρίτη φάση θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για κάθε μήνα του έτους χωριστά. Πριν από αυτά όμως, θα παρουσιάσουμε την τελική πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής σε παράθυρα 24ωρου ορίζοντα, πως αυτή ανανεώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και τη σύγκρισή της με την πραγματική παραγωγή.

7.1 Παρουσίαση της τελικής πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής σε παράθυρα 24ωρου ορίζοντα με ανανέωση

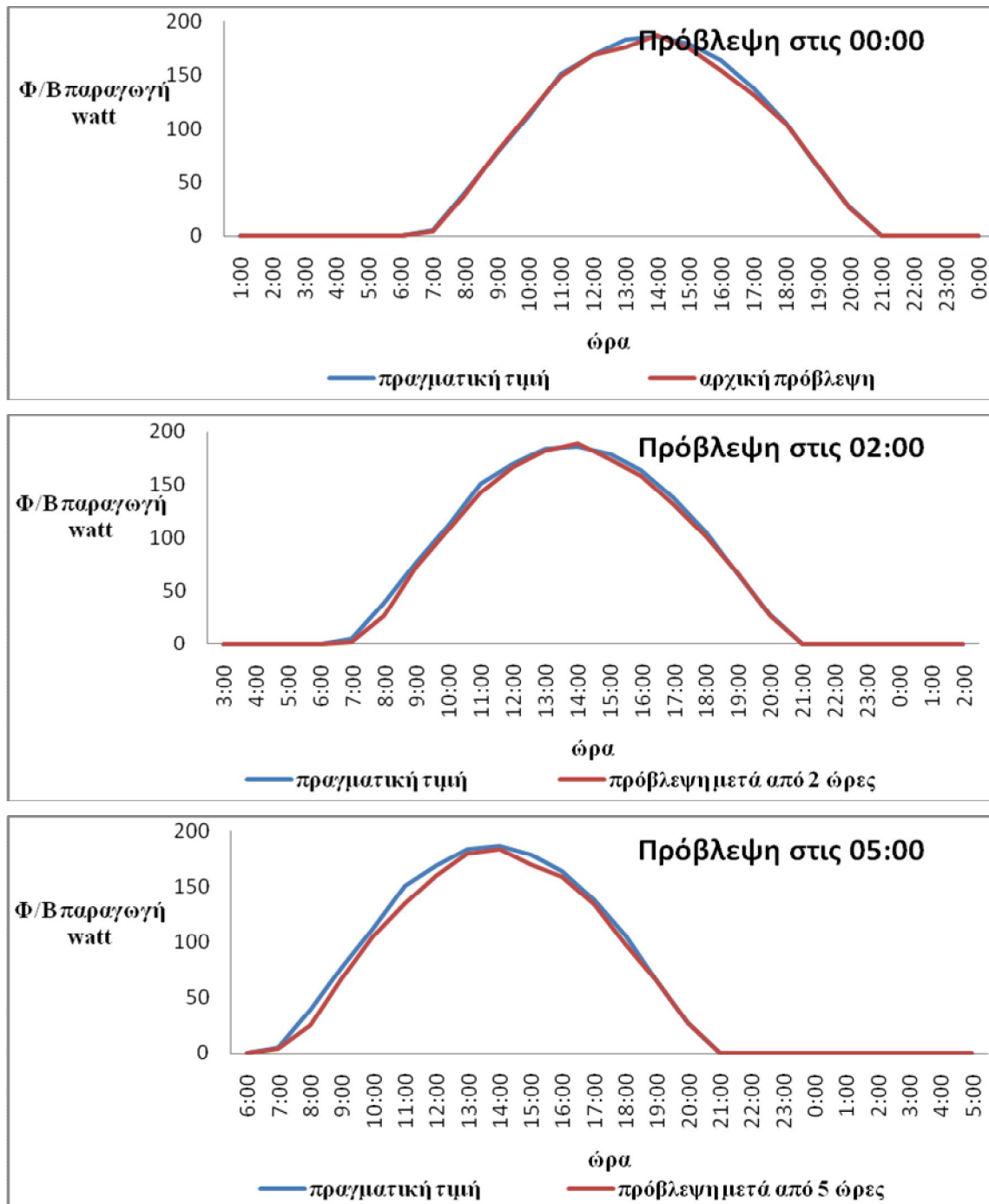
Πριν μελετήσουμε διεξοδικά το MAPE της τελικής πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής, το διάστημα εμπιστοσύνης της και τα ποσοστά υπό-εκτίμησης και υπέρ-εκτίμησης ας δούμε πιο πρακτικά πως συμπεριφέρεται η πρόβλεψη παραγωγής παρουσιάζοντας δυο παραδείγματα πρόβλεψης ένα για χειμερινή και ένα για τη θερινή περίοδο. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούμε την πραγματική τιμή παραγωγής σε σύγκριση με την προβλεπόμενη τιμή όπως αυτή ανανεώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

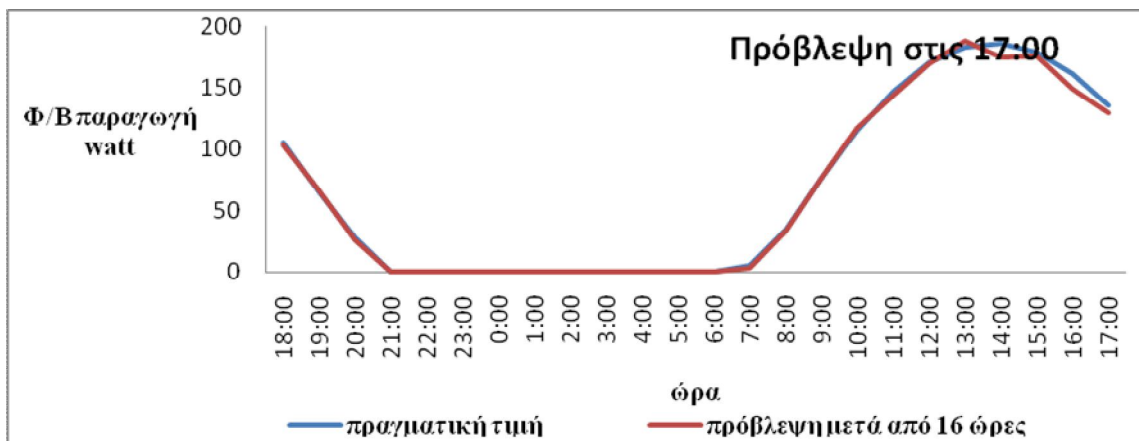
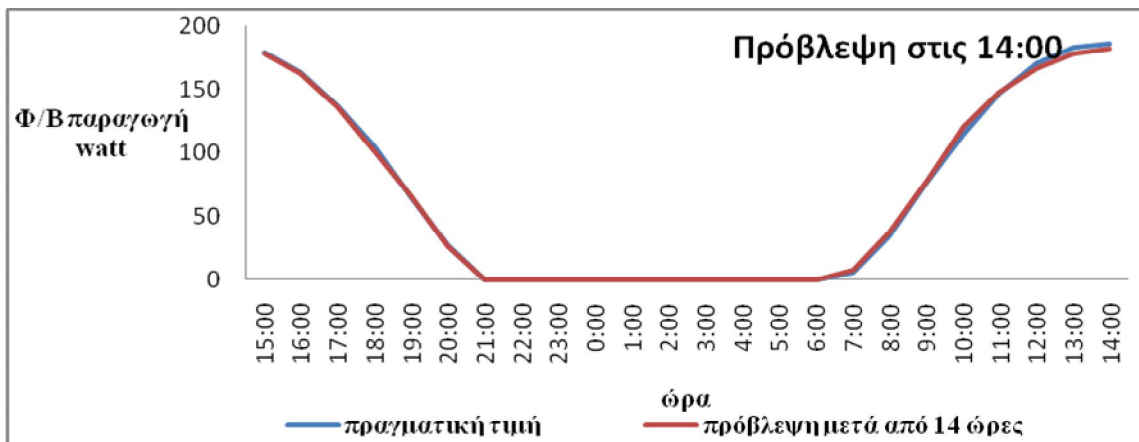
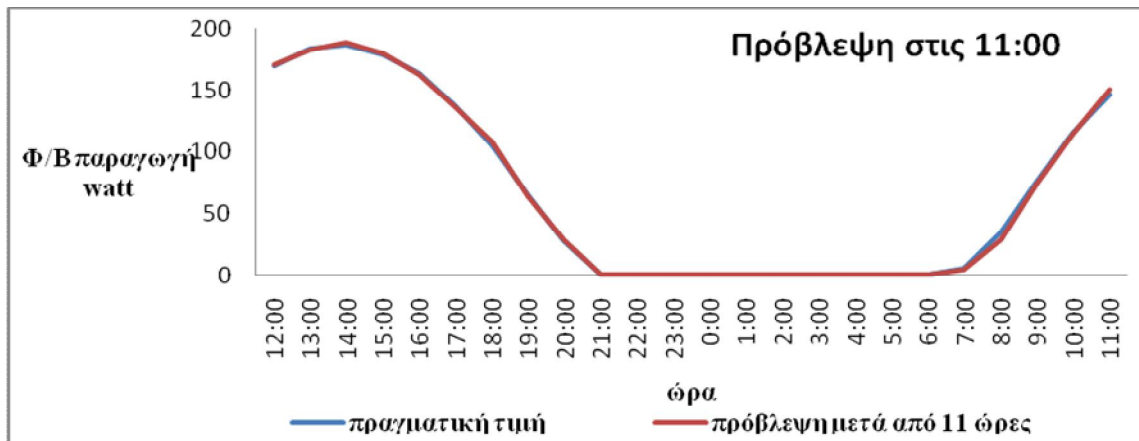
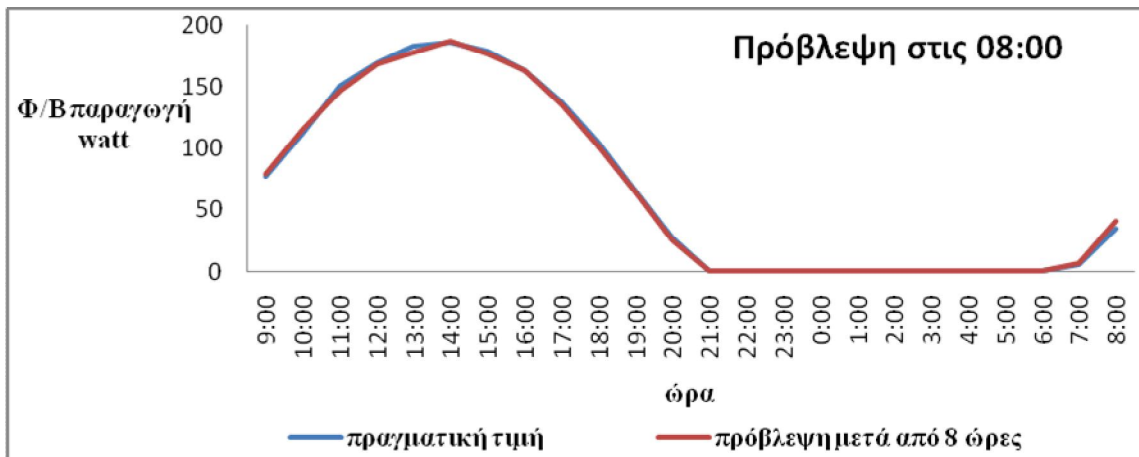
Αρχικά ένα παράδειγμα πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής 24ωρου ορίζοντα (εικόνα 7.1) σε μια ημέρα της χειμερινής περιόδου. Στις 3 Φεβρουαρίου στις 00:00 το μοντέλο μας κάνει την πρόβλεψη 24ωρου ορίζοντα, με ανανεώσεις μετά από 2,5,8,11,14,15 και 23 ώρες, Στη συνέχεια και ένα παράδειγμα πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής 24ωρου ορίζοντα (εικόνα 7.2) σε μια ημέρα της θερινής περιόδου όπως είναι η 16^η Ιουνίου. Βλέπουμε και πάλι την πρόβλεψη του μοντέλου στις 00:00 και στις συνεχείς την ανανέωση της πρόβλεψης στις 02:00, στις 05:00, στις 08:00, στις 11:00, στις 14:00, στις 17:00 και στις 23:00.

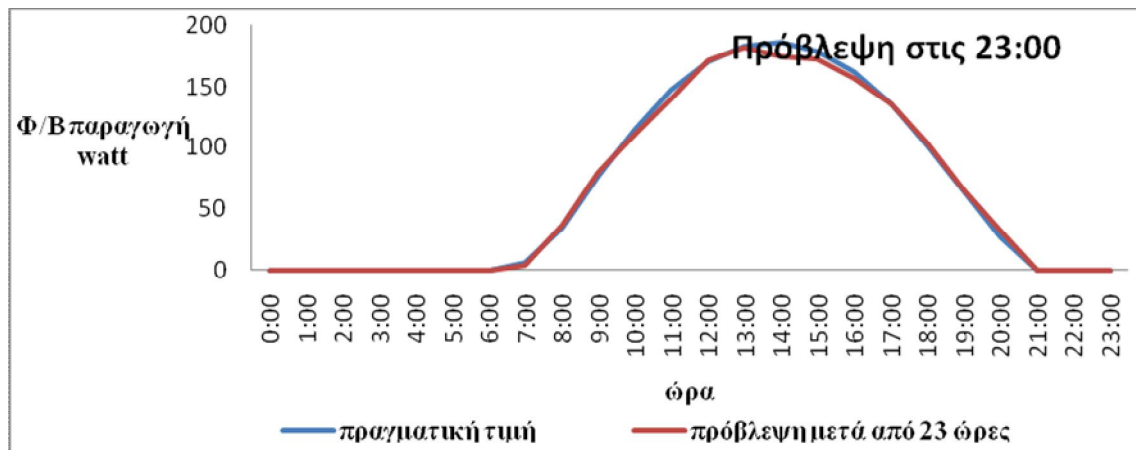




Εικόνα 7.1 Πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής 24ωρου οριζοντα με ανανεώσεις τη 3^η Φεβρουαρίου







Εικόνα 7.2 Πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής 24ωρου ορίζοντα με ανανεώσεις τη 16^η Ιουλίου

Παρατηρώντας τις προβλέψεις αυτές δυο τυχαίων ημερών που ανήκουν σε διαφορετικές εποχές μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε πως η πρόβλεψη της παραγωγής τη θερινή περίοδο γίνεται με πολύ μικρό σφάλμα ακόμα και πολλές ώρες πριν. Στην τυχαία χειμερινή ημέρα με τις αυξομειώσεις που παρατηρούνται στην τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι δύσκολο για τα ΤΝΔ να κάνουν εξίσου καλή πρόβλεψη, όμως τα καταφέρνουν ικανοποιητικά.

Επίσης φαίνεται ότι στις προβλέψεις και στις 3 Φεβρουαρίου και στις 16 Ιουνίου η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερη της πραγματικής τιμής με εξαίρεση τις ώρες που η ένταση ελαττώνεται απότομα μέσα στην μέρα.

7.2 Σφάλματα Πρόβλεψης για Όλο το Έτος Συνολικά

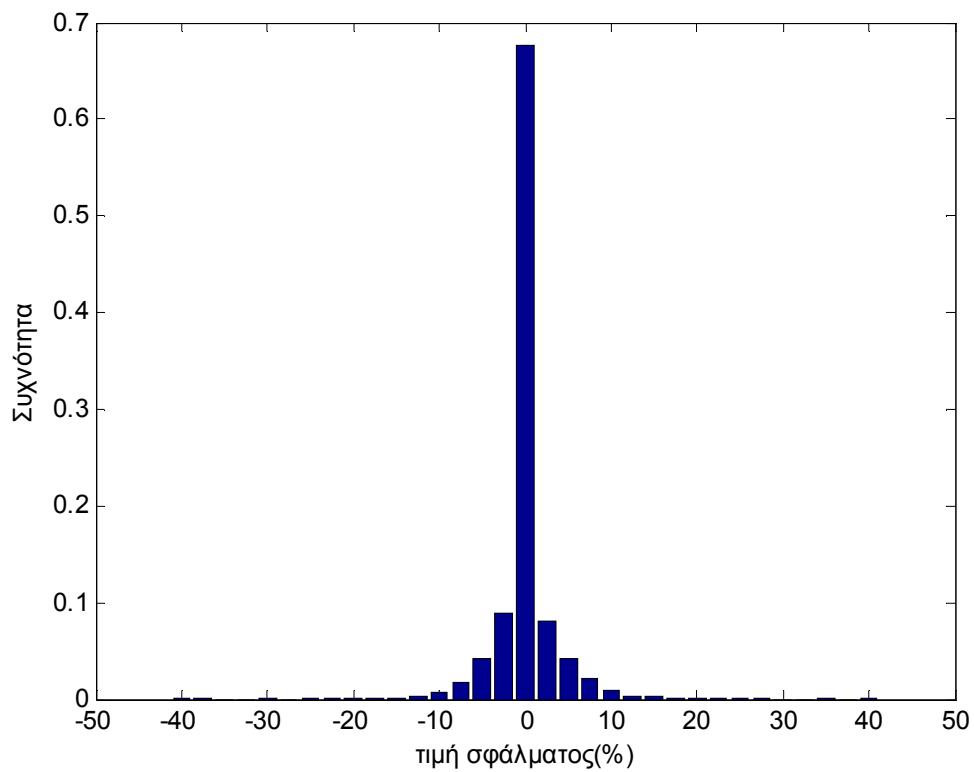
Παρακάτω εξετάζεται πως συμπεριφέρεται το μοντέλο σε όλο το εύρος του έτους αρχικά. Θα παρουσιαστούν αποτελέσματα για προβλέψεις με ορίζοντα 1,6 και 24 ωρών.

7.2.1 Σφάλματα Πρόβλεψης Επόμενης Ώρας

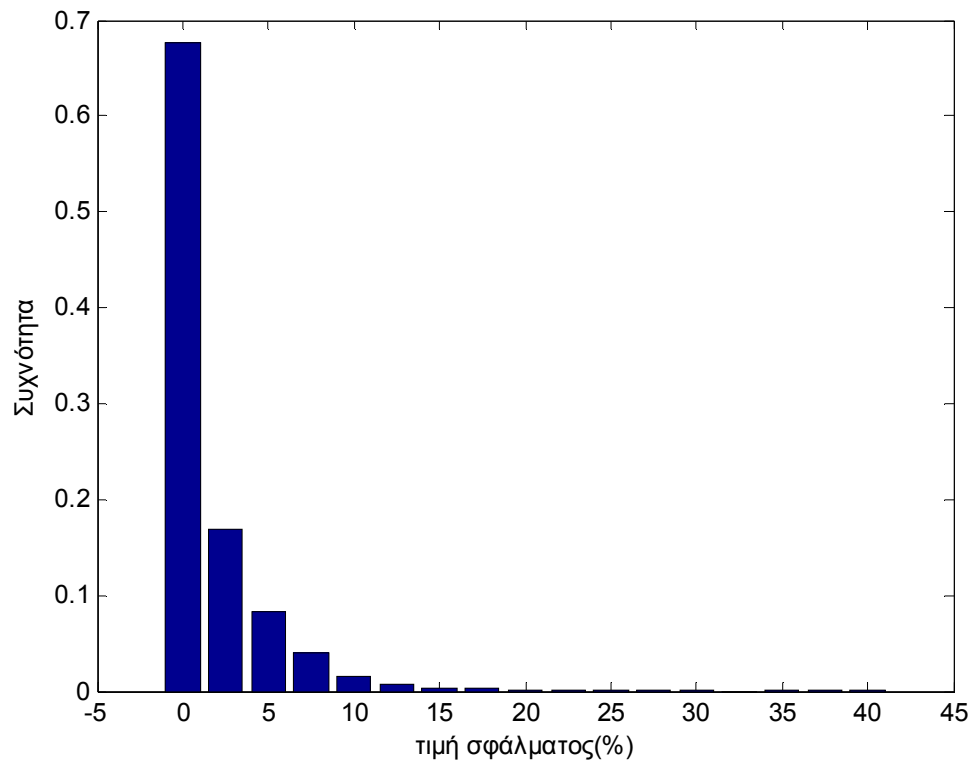
Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για την επόμενη ώρα παρουσιάζει το έξης σφάλμα:

- MAE = 3.59 Watt
- MAPE = 1.6%
- Διασπορά 7.59 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 21.3%, υποεκτιμάται 21.7% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 57% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-11.07 , 12.51] Watt, ή [-4.92% , 5.56%]
- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-6.06 , 5.99] Watt, ή [-2.69% , 2.66%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα συχνότητας:



Εικόνα 7.3 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας



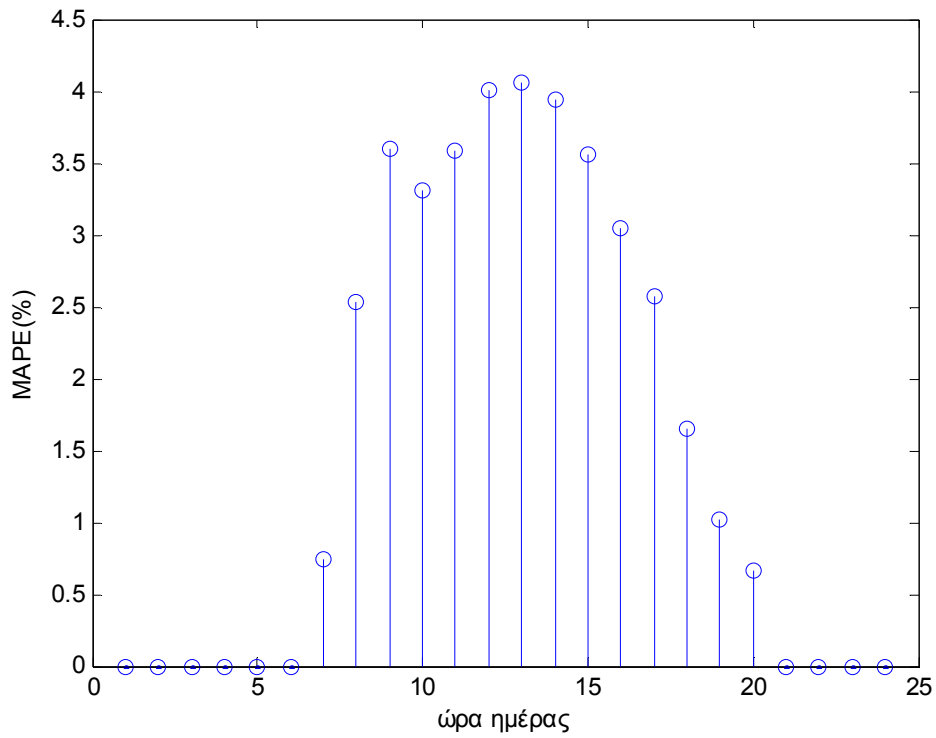
Εικόνα 7.4 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σφάλματα χωριστά για κάθε ώρα του 24ωρου που γίνεται πρόβλεψη. Το MAPE για πρόβλεψη επόμενης ώρας είναι 1.6%, όμως για κάθε ώρα που αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ των 0 και των 4.05%. Πιο αναλυτικά (πίνακας 7.1)

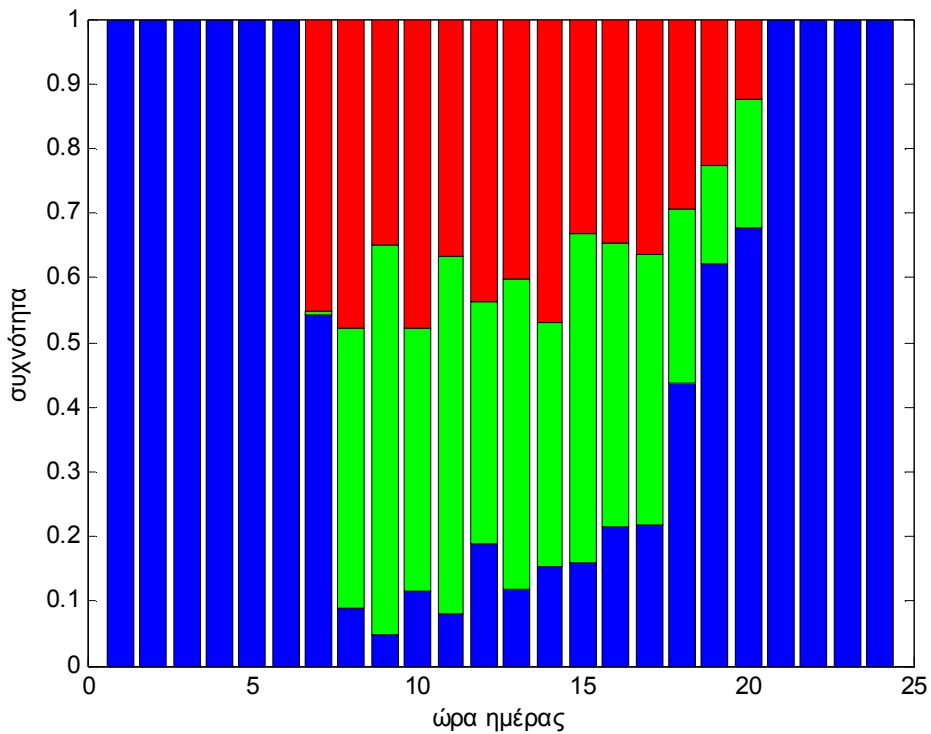
Ωρα Πρόβλεψης	MAPE(%)	Μηδενικό σφάλμα(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	0	100	0	0
2	0	100	0	0
3	0	100	0	0
4	0	100	0	0
5	0	100	0	0
6	0	100	0	0
7	0.74	54.2	45.2	0.6
8	2.53	9.1	47.9	43
9	3.59	5	35	60
10	3.30	11.5	47.7	40.8
11	3.58	7.9	36.7	55.3
12	4.01	18.9	43.8	37.3
13	4.05	11.9	40.2	47.9
14	3.94	15.4	46.8	37.8
15	3.56	15.9	33.1	51
16	3.04	21.4	34.5	44.1
17	2.57	21.6	36.4	41.9
18	1.64	43.9	29.3	26.8
19	1.01	62.2	22.7	15.1
20	0.66	67.7	12.3	20
21	0	100	0	0
22	0	100	0	0
23	0	100	0	0
24	0	100	0	0

Πίνακας 7.1 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής για κάθε ενδιάμεση ώρα ωριαίας πρόβλεψης

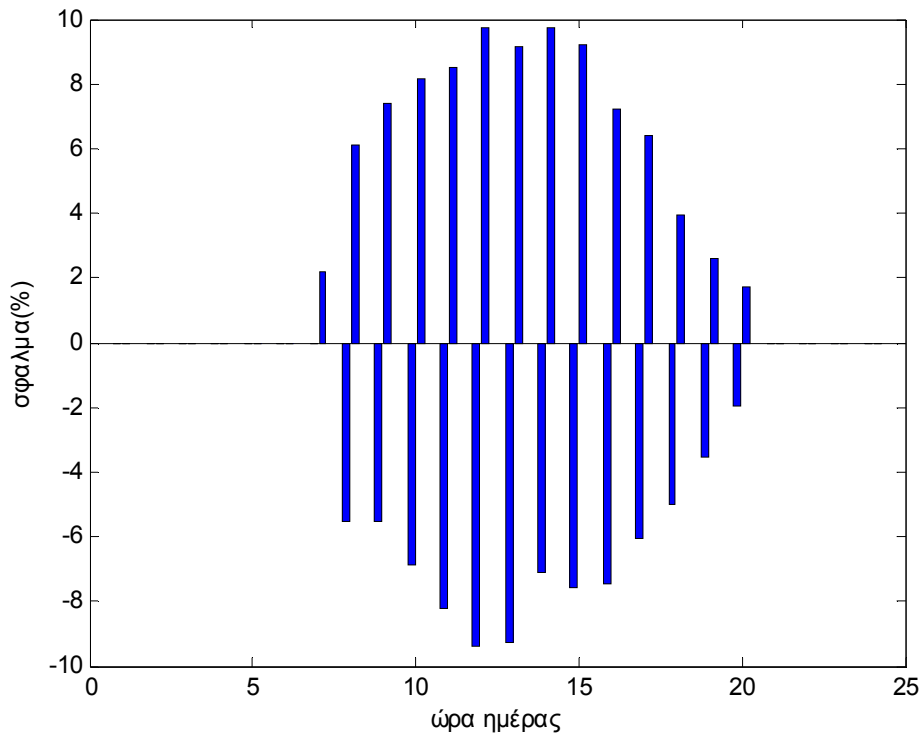
Παρατηρούμε ότι τις νυχτερινές ώρες δεν υπάρχει σφάλμα διότι η παράγωγη είναι 0 κάτι που συμφωνεί και το μοντέλο. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά χρονικά στην αιχμή ηλιακής ακτινοβολίας αναφέρεται η ώρα πρόβλεψης τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμενόταν, κάτι που παρουσιάζεται στα αμέσως επόμενα σχήματα:



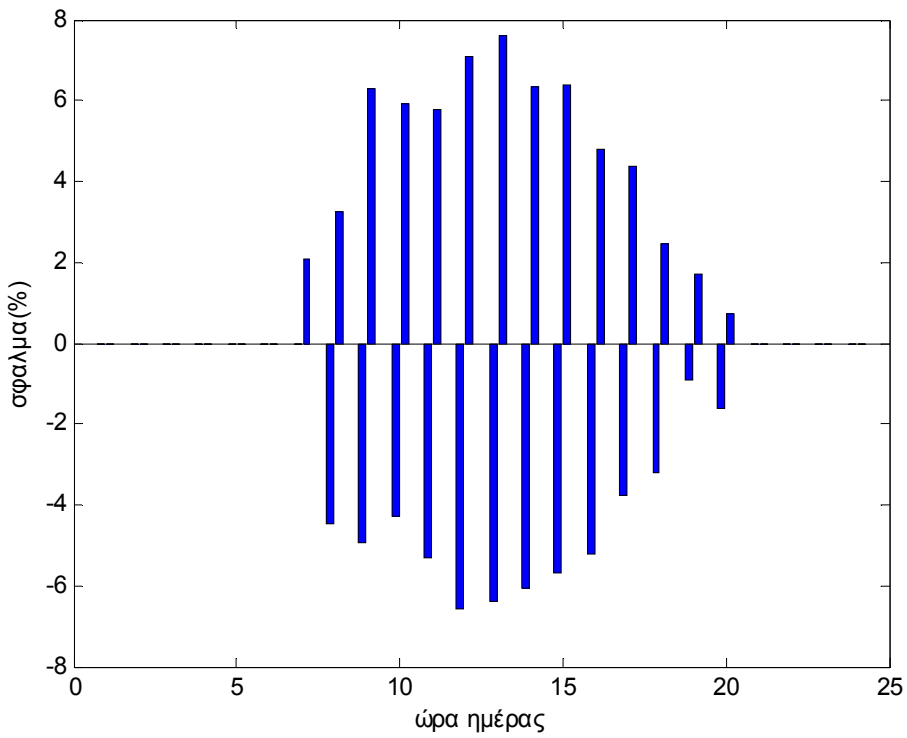
Εικόνα 7.5 MAPE για κάθε ώρα της ημέρας από πρόβλεψη επόμενης ώρας



Εικόνα 7.6 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας από πρόβλεψη επόμενης ώρας



Εικόνα 7.7 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% για κάθε ώρα της ημέρας από πρόβλεψη επόμενης ώρας



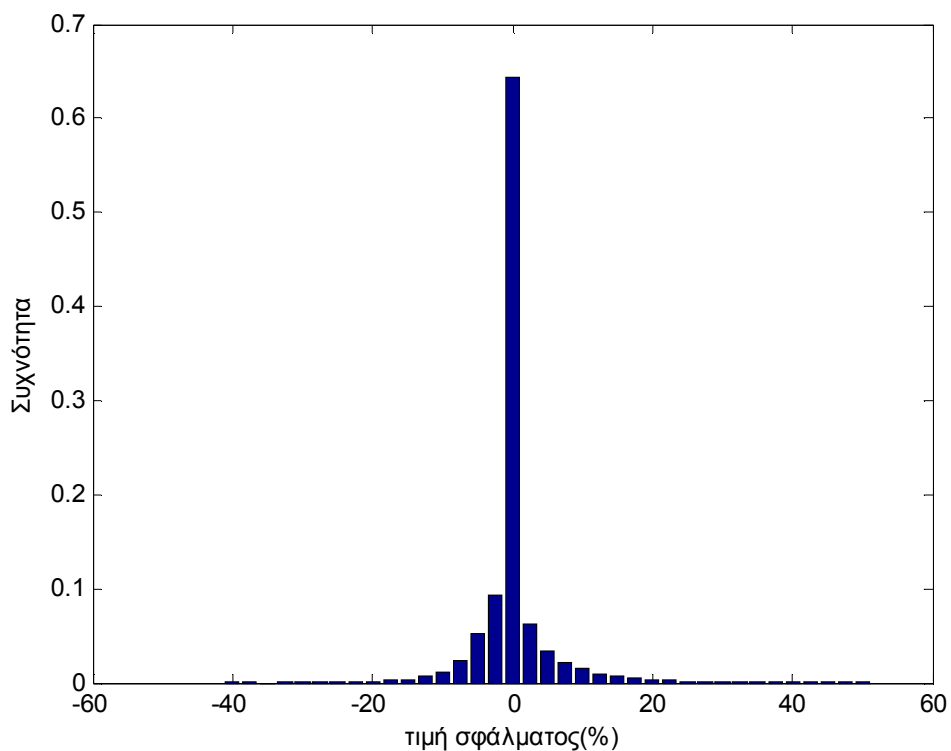
Εικόνα 7.8 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% για κάθε ώρα της ημέρας από πρόβλεψη επόμενης ώρας

7.2.2 Σφάλματα Πρόβλεψης βωρου ορίζοντα

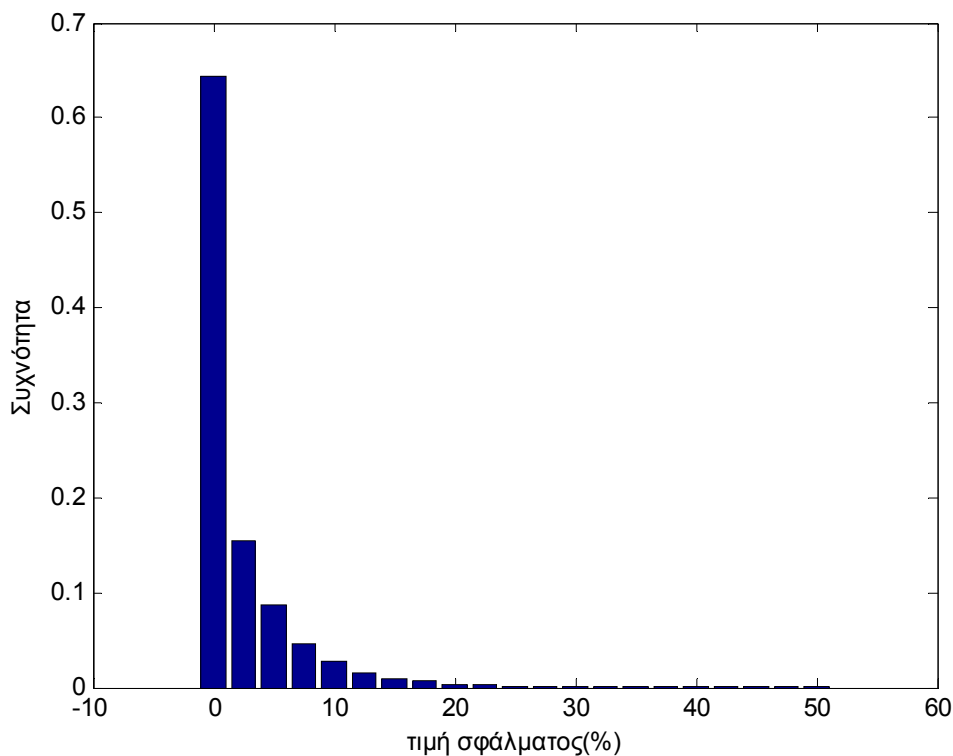
Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για βωρο ορίζοντα παρουσιάζει κατά μέσο όρο το έξης σφάλμα:

- MAE = 4.92 Watt
- MAPE = 2.2%
- Διασπορά 10.39 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 19.4%, υποεκτιμάται 24.6% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 56% των περιπτώσεων.
- υτ

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα συχνότητας:



Εικόνα 7.9 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για βωρο ορίζοντα



Εικόνα 7.10 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για 6ωρο ορίζοντα

Επειδή όλα τα παραπάνω είναι πολύ γενικά δεν αρκούν για να κατανοήσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου, θα εξεταστούν τα σφάλματα πρόβλεψης 6ωρου υπό 2 διαφορετικές οπτικές γωνίες.

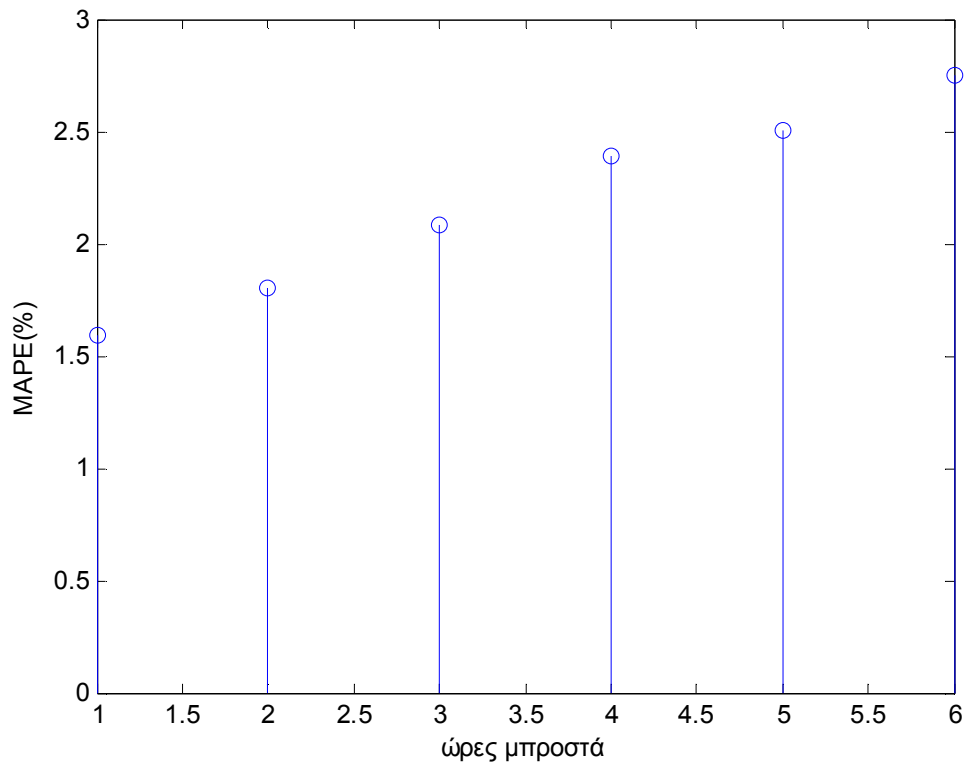
7.2.2.1 Σφάλματα ενδιάμεσων ωρών πρόβλεψης 6ωρου ορίζοντα

Το MAPE για το συνολικό 6ωρο παράθυρο είναι 2.2% κατά μέσο όρο, όμως ανάλογα με το πόση ώρα μπροστά αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ του 1.59 και του 2.50%. Πιο αναλυτικά (Πίνακας 7.2):

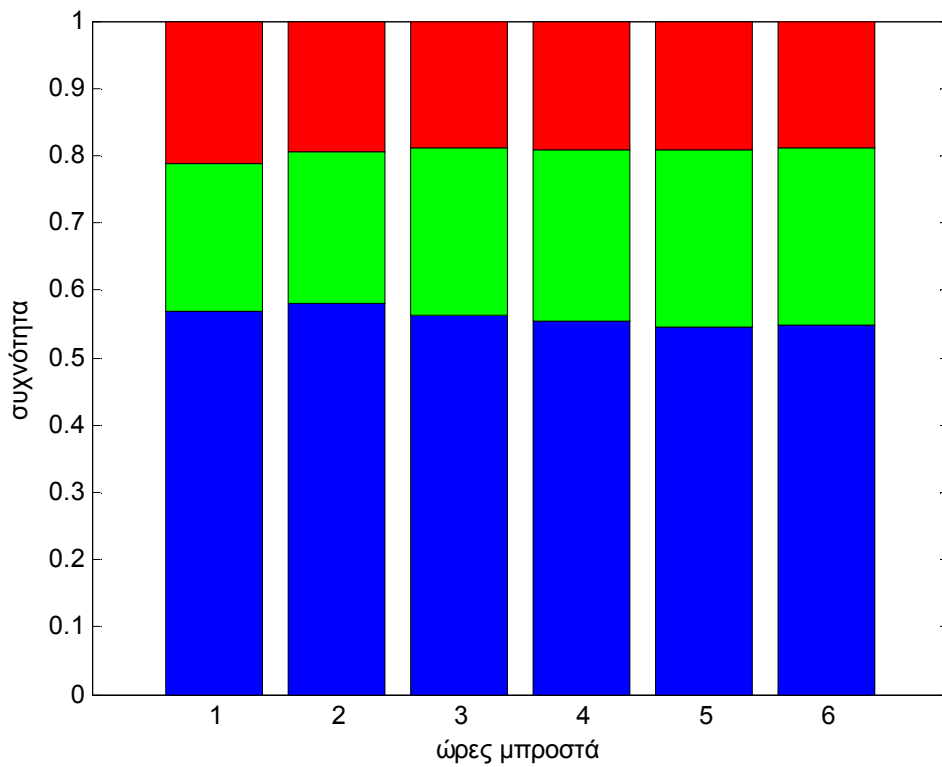
Ωρες μπροστά	MAPE(%)	Μηδενικό σφάλμα(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	1.59	57	21.3	21.7
2	1.81	58	19.4	22.6
3	2.08	56.1	18.8	25.1
4	2.39	55.4	19	25.6
5	2.50	54.5	19.2	26.3
6	2.75	54.7	18.8	26.5

Πίνακας 7.2 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων 6ωρου ορίζοντα πρόβλεψης

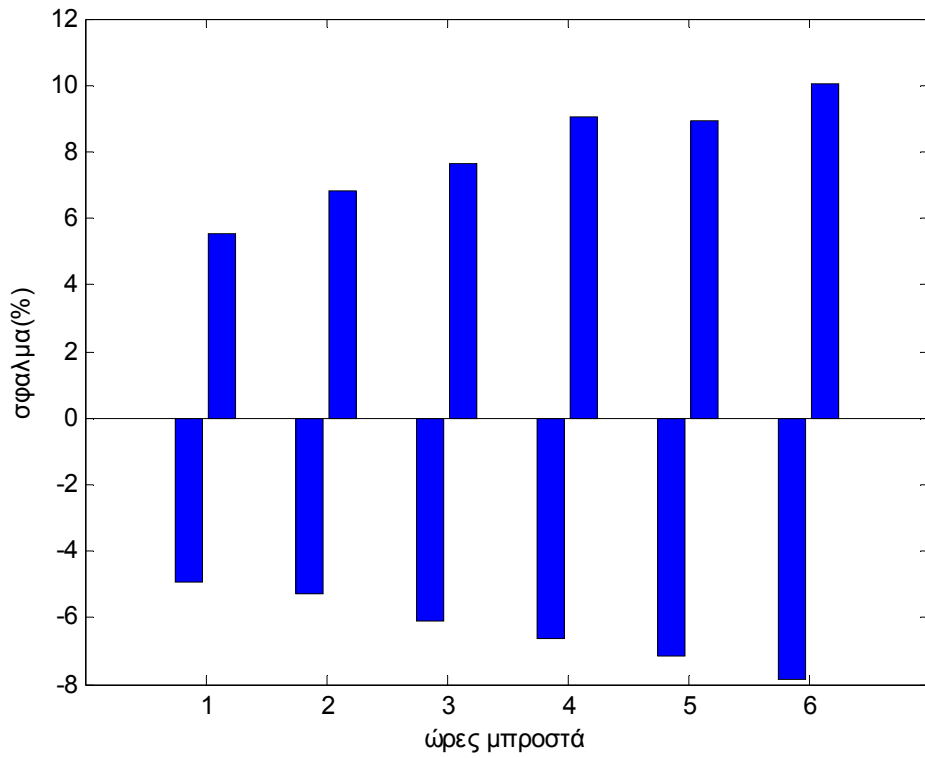
Παρατηρούμε ότι όσο πιο μακριά χρονικά γίνει η πρόβλεψη τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμένεται, κάτι που παρατηρείται στα αμέσως επόμενα σχήματα:



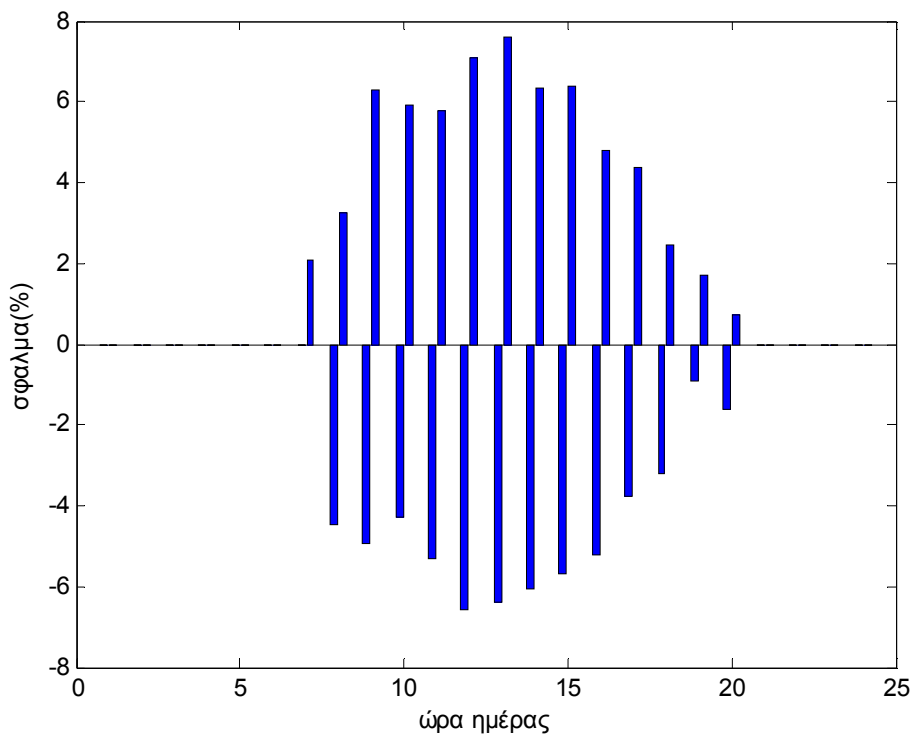
Εικόνα 7.11 MAPE ενδιάμεσων προβλέψεων βωρου ορίζοντα πρόβλεψης



Εικόνα 7.12 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων βωρου ορίζοντα πρόβλεψης



Εικόνα 7.13 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% ενδιάμεσων προβλέψεων 6ωρου ορίζοντα πρόβλεψης



Εικόνα 7.14 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% ενδιάμεσων προβλέψεων 6ωρου ορίζοντα πρόβλεψης

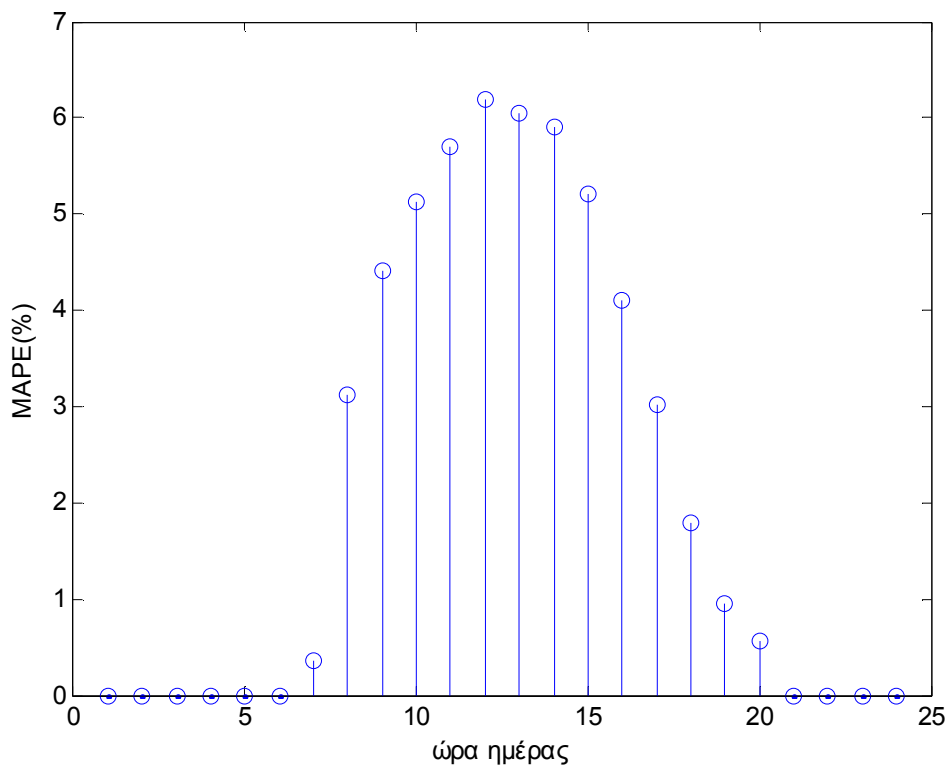
7.2.2.2 Σφάλματα πρόβλεψης βωρου ορίζοντα πρόβλεψης για κάθε ώρα της ημέρας χωριστά

Το MAPE για το συνολικό βωρο παράθυρο είναι 2.2% κατά μέσο όρο, όμως για κάθε ώρα που αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ των 0 και των 6.19%. Πιο αναλυτικά (Πίνακας 7.3):

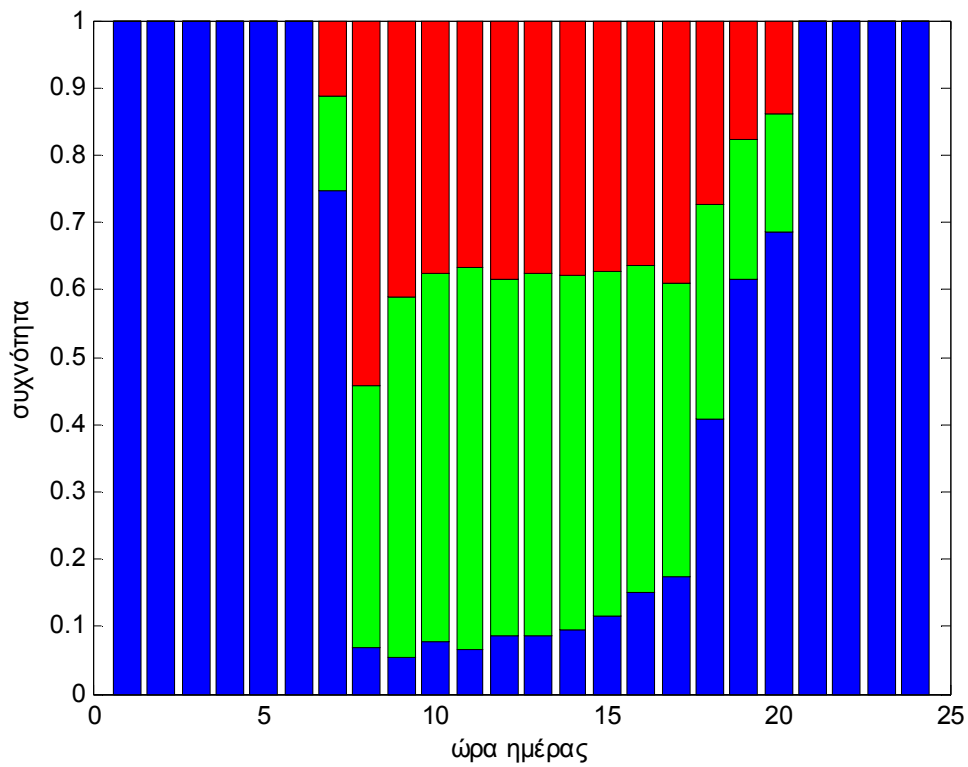
Ωρα Πρόβλεψης	MAPE(%)	Μηδενικό σφάλμα(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	0	100	0	0
2	0	100	0	0
3	0	100	0	0
4	0	100	0	0
5	0	100	0	0
6	0	100	0	0
7	0.36	74.7	11.3	14
8	3.12	6.9	54.1	39
9	4.41	5.5	41.2	53.3
10	5.13	7.6	37.4	55
11	5.69	6.5	36.6	56.9
12	6.19	8.5	38.3	53.2
13	6.05	8.5	37.6	53.9
14	5.89	9.6	37.9	52.5
15	5.20	11.5	37.1	51.4
16	4.11	15.1	36.4	48.5
17	3.01	17.4	39.1	43.5
18	1.78	40.9	27.4	31.7
19	0.94	61.7	17.6	20.7
20	0.56	68.7	13.9	17.4
21	0	100	0	0
22	0	100	0	0
23	0	100	0	0
24	0	100	0	0

Πίνακας 7.3 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής για κάθε ενδιάμεση ώρα βωρου ορίζοντα πρόβλεψης

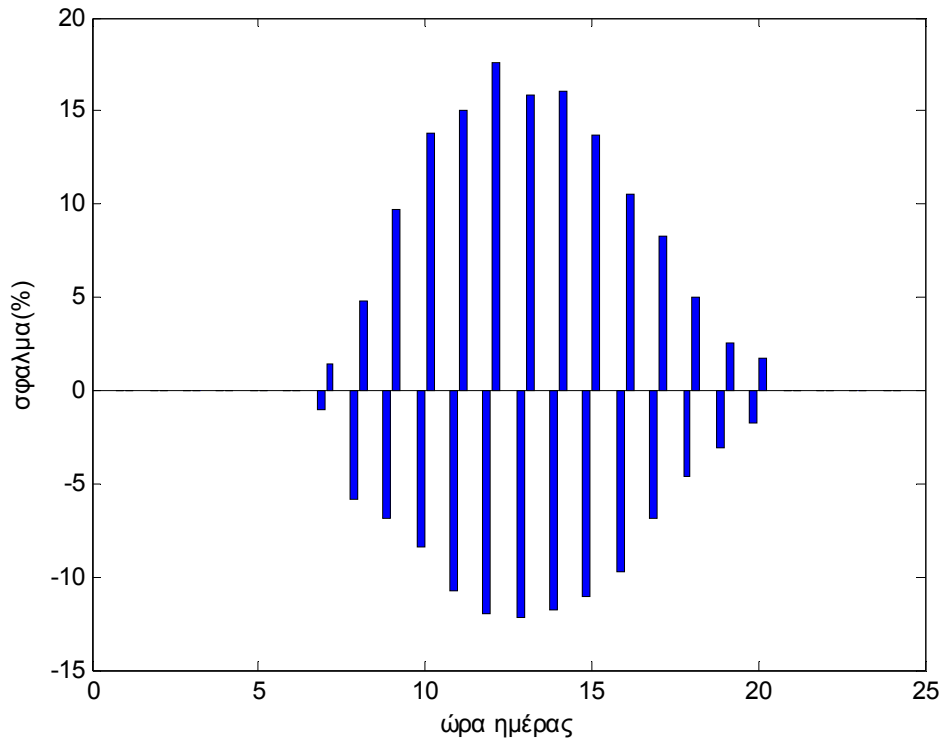
Παρατηρούμε ότι τις νυχτερινές ώρες δεν υπάρχει σφάλμα διότι η παράγωγη είναι 0 κάτι που συμφωνεί και το μοντέλο. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά χρονικά στην αιχμή ηλιακής ακτινοβολίας αναφέρεται η ώρα πρόβλεψης τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμενόταν, κάτι που θα προκύπτει από τα αμέσως επόμενα σχήματα. Να αναφερούμε ακόμα ότι το MAPE στην προβλεψη για κάθε ώρα του βωρου είναι μεγαλύτερο σε σχέση με όσο παρουσιασαμε πριν στο «7.2.1 Σφάλματα Πρόβλεψης Επόμενης Ώρας», γιατί εδώ η πρόβλεψη γίνεται από 1 μέχρι και 6 ώρες πριν, ενώ προηγουμένως πάντα 1 ώρα πριν.



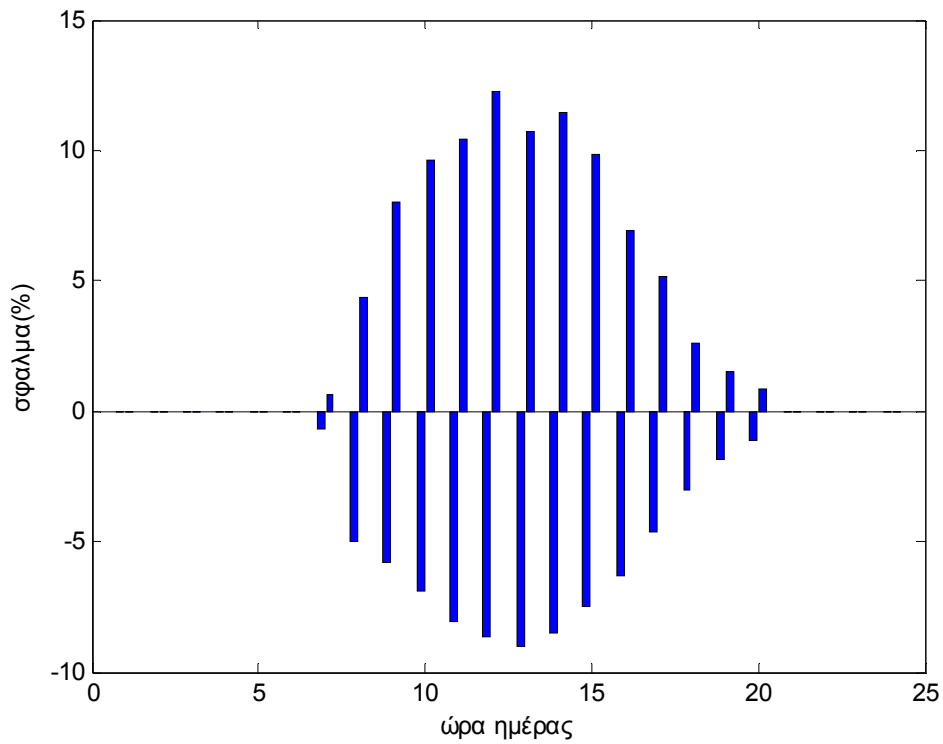
Εικόνα 7.15 MAPE για κάθε ώρα της ημέρας δωρου ορίζοντα πρόβλεψης



Εικόνα 7.16 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας δωρου ορίζοντα πρόβλεψης



Εικόνα 7.17 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% για κάθε ώρα της ημέρας δωρου ορίζοντα πρόβλεψης



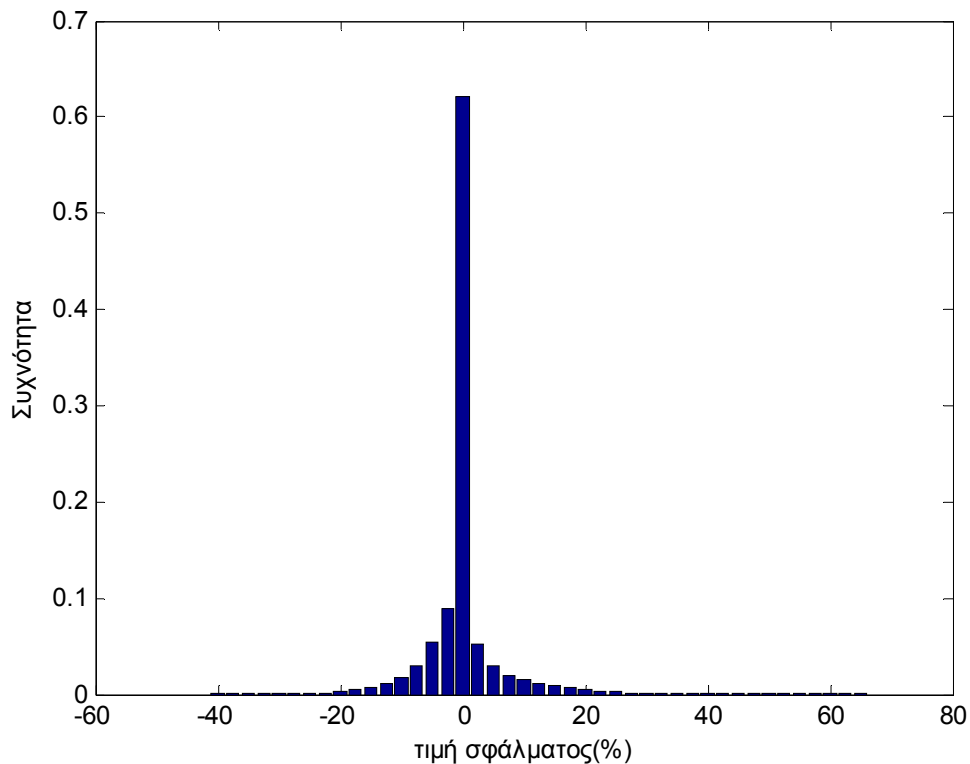
Εικόνα 7.18 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% για κάθε ώρα της ημέρας δωρου ορίζοντα πρόβλεψης

7.2.3 Σφάλματα Πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα

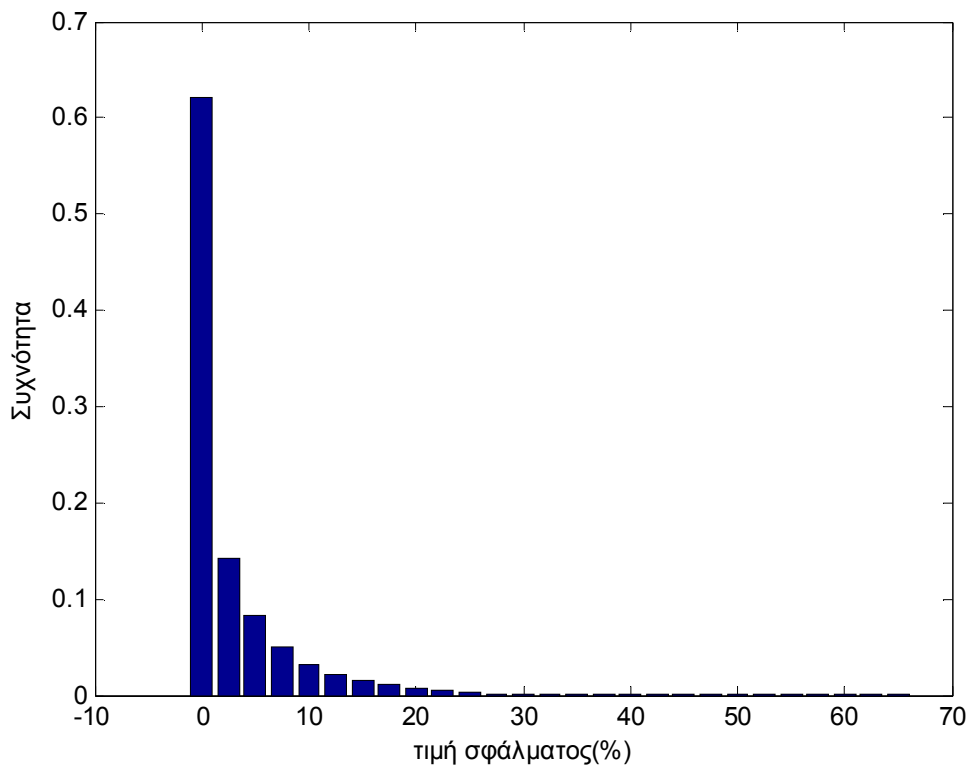
Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για 24ωρο ορίζοντα παρουσιάζει κατά μέσο όρο το έξης σφάλμα:

- MAE = 6.30 Watt
- MAPE = 2.8%
- Διασπορά 13.36 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 19.2%, υποεκτιμάται 25.7% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 55.1% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-18.26 , 23.31] Watt, ή [-8.12% , 10.36%]
- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-10.95 , 10.02] Watt, ή [-4.87% , 4.46%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα συχνότητας:



Εικόνα 7.19 Ιστογράμμο συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για 24ωρο ορίζοντα



Εικόνα 7.20 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για 24ωρο ορίζοντα

Επειδή όλα τα παραπάνω είναι πολύ γενικά δεν αρκούν για να εξετάσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου, θα παρουσιάσουμε τα σφάλματα πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα υπό 2 διαφορετικές οπτικές γωνίες.

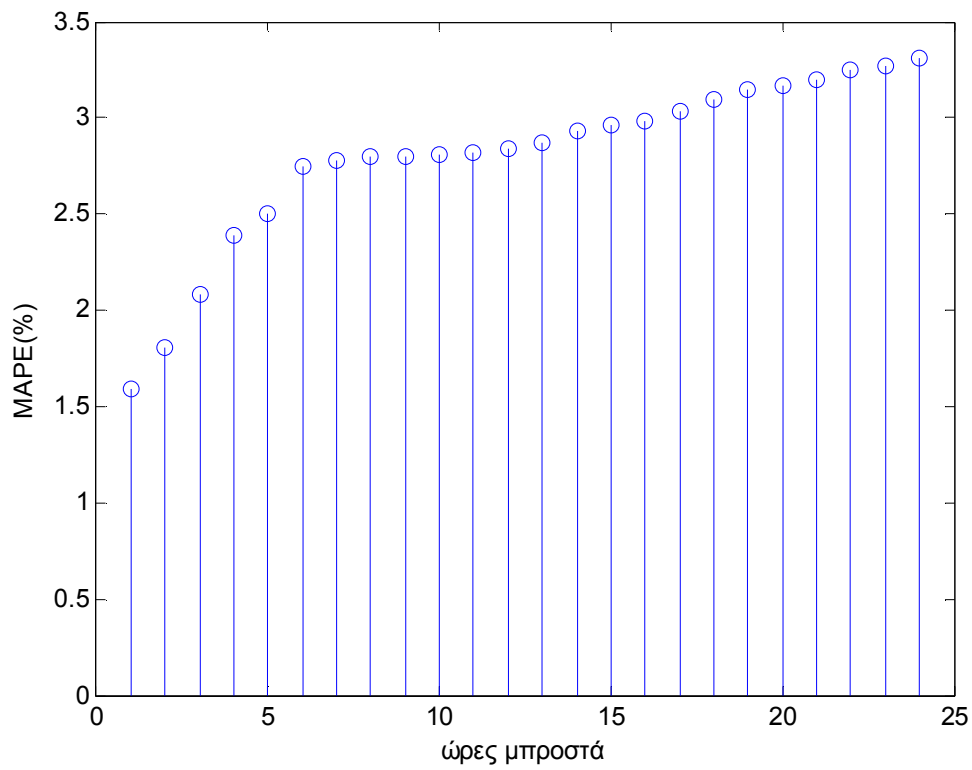
7.2.3.1 Σφάλματα ενδιάμεσων ωρών πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα

Το MAPE για το συνολικό 24ωρο παράθυρο είναι 2.8% κατά μέσο όρο, όμως ανάλογα με το πόση ώρα μπροστά αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ του 1.59 και του 3.31%. Πιο αναλυτικά (Πίνακας 7.4):

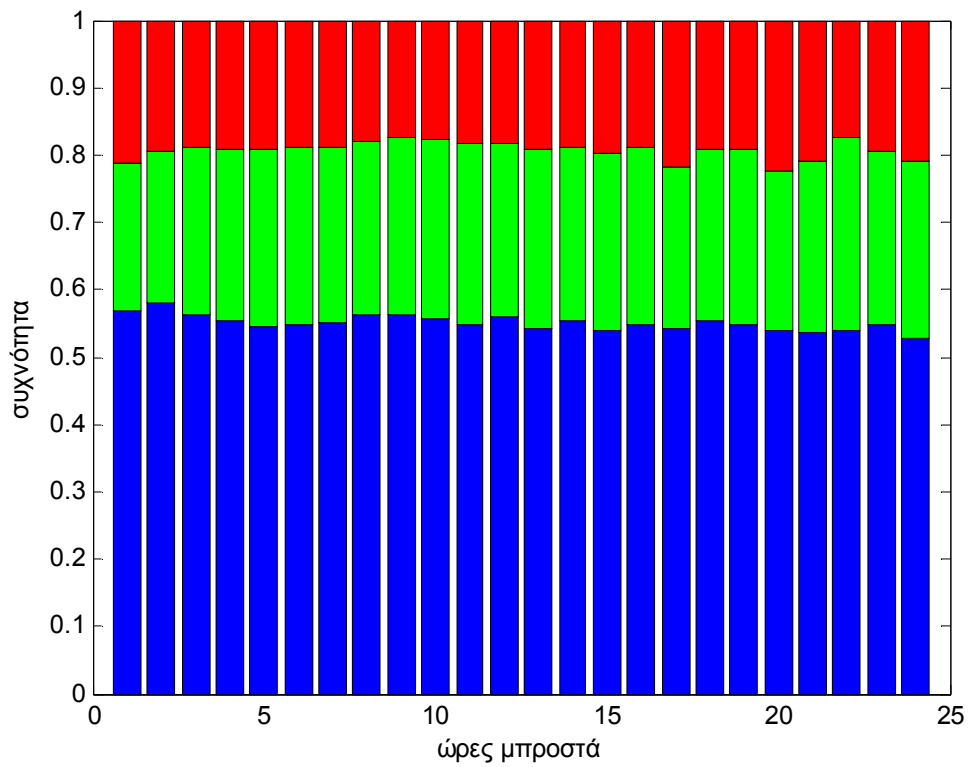
Ωρες μπροστά	MAPE(%)	Μηδενικό σφάλμα(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	1.59	57	21.3	21.7
2	1.81	58	19.4	22.6
3	2.08	56.1	18.8	25.1
4	2.39	55.4	19	25.6
5	2.50	54.5	19.2	26.3
6	2.75	54.7	18.8	26.5
7	2.78	55.1	18.9	26
8	2.79	56.2	18.1	25.7
9	2.80	56.3	17.4	26.3
10	2.81	55.8	17.6	26.6
11	2.82	54.9	18.3	26.8
12	2.84	55.9	18.4	25.7
13	2.87	54.4	19	26.6
14	2.93	55.5	18.8	25.7
15	2.96	53.9	19.7	26.4
16	2.99	54.8	18.9	26.3
17	3.03	54.2	21.7	24.1
18	3.10	55.3	19.1	25.6
19	3.14	54.9	19	26.1
20	3.16	54	22.4	23.6
21	3.20	53.8	20.9	25.3
22	3.24	54	17.2	28.8
23	3.27	54.7	19.6	25.7
24	3.31	52.7	21	26.3

Πινάκας 7.4 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρης πρόβλεψης

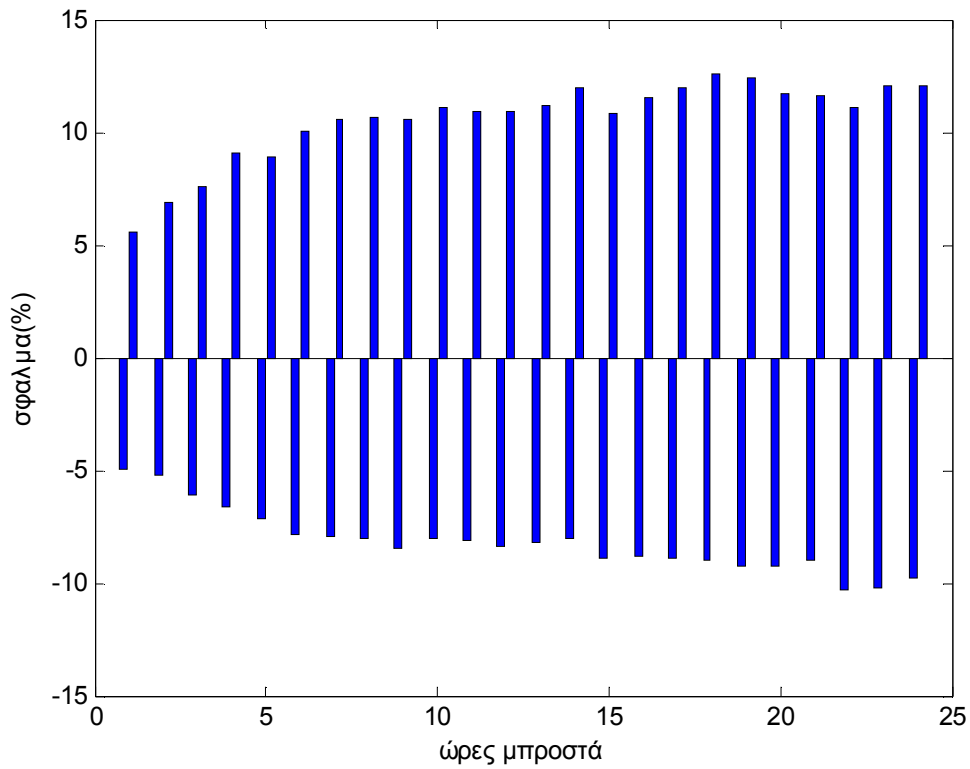
Παρατηρούμε ότι όσο πιο μακριά χρονικά γίνει η πρόβλεψη τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμένεται, κάτι που παρουσιάζεται στα αμέσως επόμενα σχήματα:



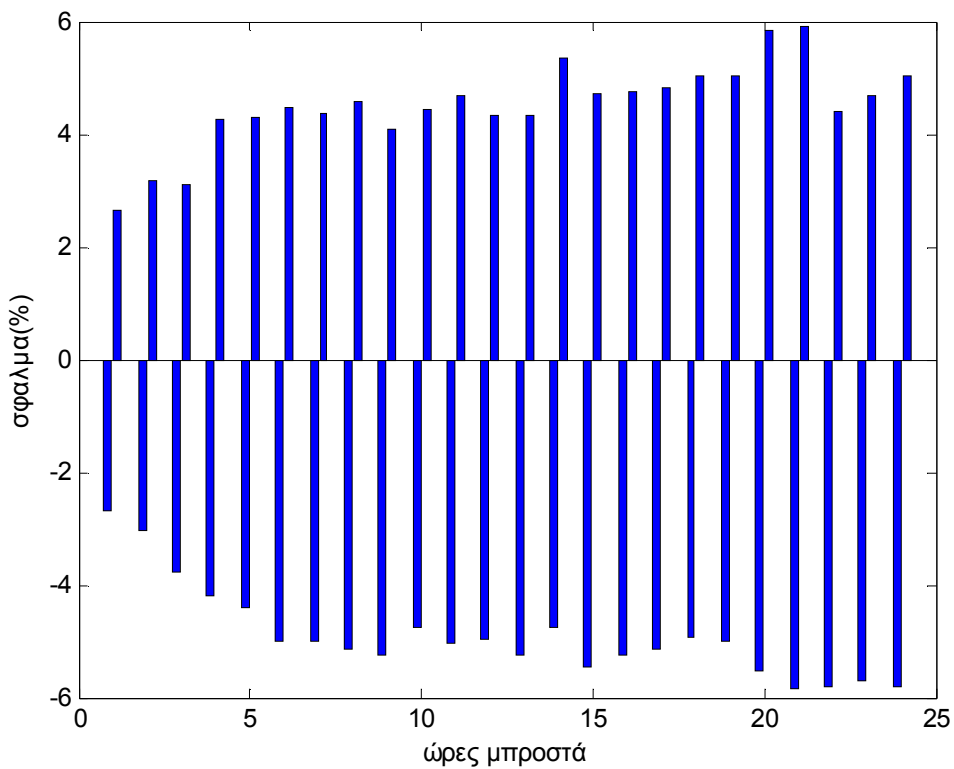
Εικόνα 7.21 MAPE ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρου ορίζοντα πρόβλεψης



Εικόνα 7.22 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρου ορίζοντα πρόβλεψης



Εικόνα 7.23 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρου οριζοντα πρόβλεψης



Εικόνα 7.24 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρου οριζοντα πρόβλεψης

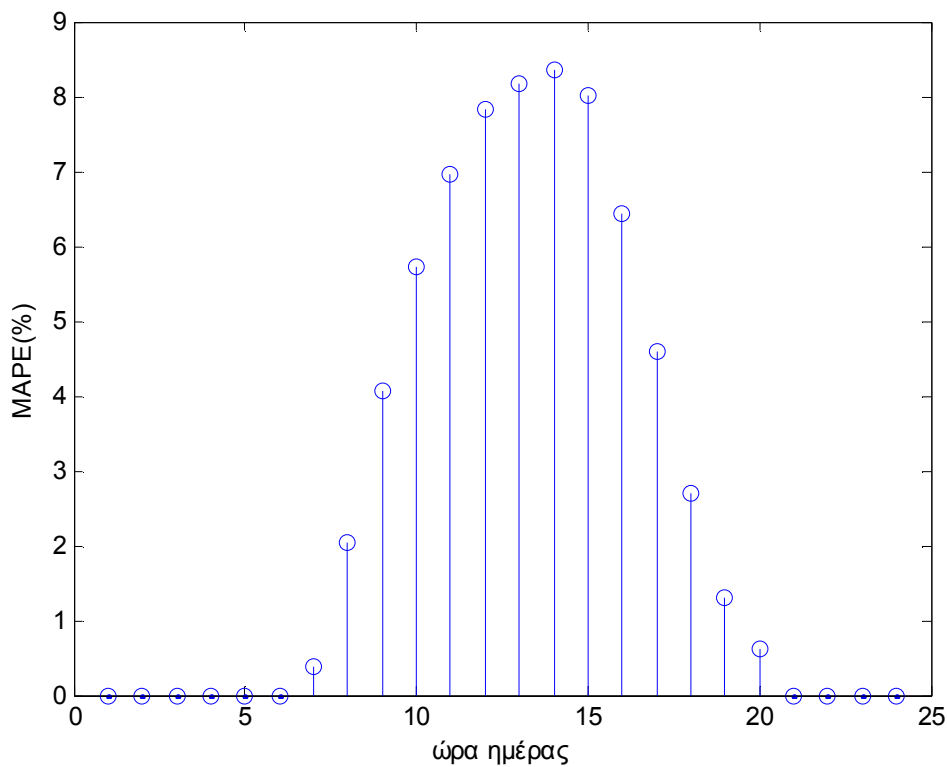
7.2.3.2 Σφάλματα πρόβλεψης 24ωρου για κάθε ώρα της ημέρας χωριστά

Το MAPE για το συνολικό 24ωρο παράθυρο είναι 2.8% κατά μέσο όρο, όμως για κάθε ώρα που αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ των 0 και των 8.34%. Πιο αναλυτικά(Πίνακας 7.5):

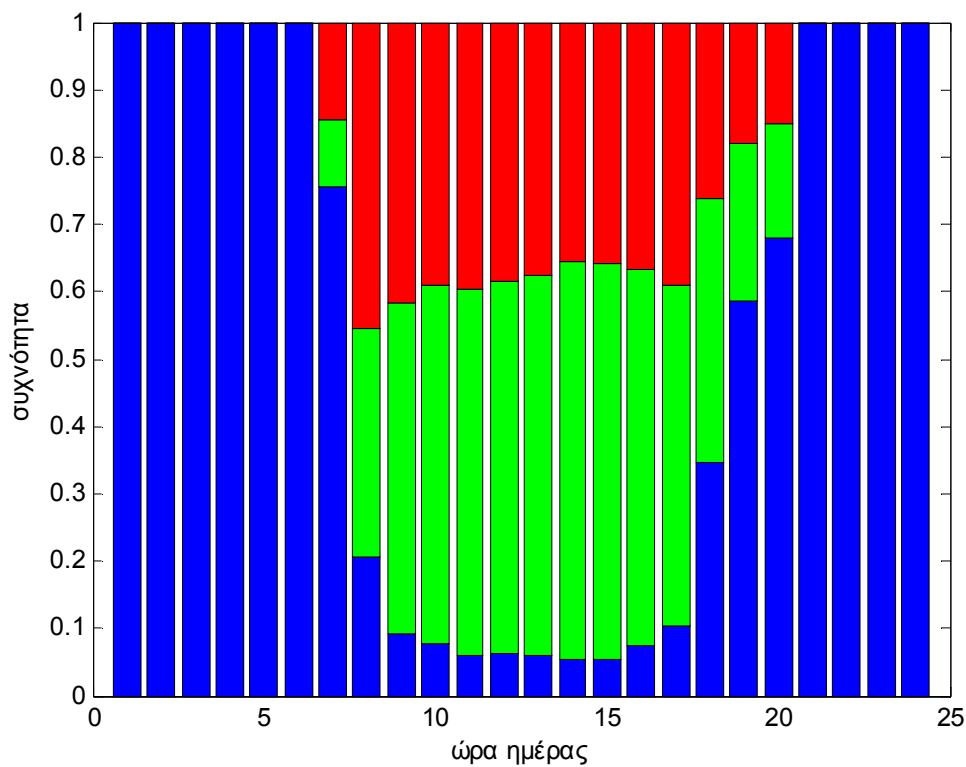
Ωρα Πρόβλεψης	MAPE(%)	Μηδενικό σφάλμα(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	0	100	0	0
2	0	100	0	0
3	0	100	0	0
4	0	100	0	0
5	0	100	0	0
6	0	100	0	0
7	0.38	75.6	14.4	10
8	2.05	20.7	45.4	33.9
9	4.05	9.1	41.6	49.3
10	5.73	7.6	39.2	53.2
11	6.95	6.1	39.4	54.5
12	7.84	6.2	38.4	55.4
13	8.17	5.8	37.5	56.7
14	8.34	5.6	35.5	58.9
15	8.02	5.5	35.9	58.6
16	6.43	7.6	36.7	55.7
17	4.58	10.5	39.1	50.4
18	2.71	34.8	26.3	38.9
19	1.30	58.7	17.8	23.5
20	0.62	68.1	15.2	16.7
21	0	100	0	0
22	0	100	0	0
23	0	100	0	0
24	0	100	0	0

Πίνακας 7.5 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη

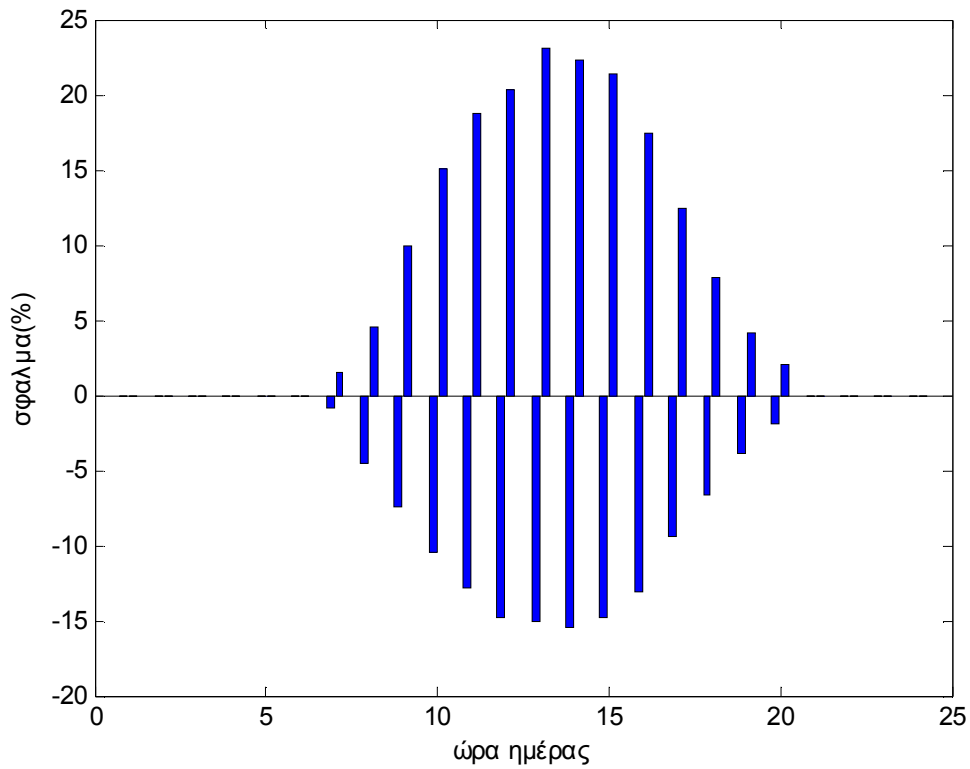
Παρατηρούμε ότι τις νυχτερινές ώρες δεν υπάρχει σφάλμα διότι η παράγωγη είναι 0 κάτι που συμφωνεί και το μοντέλο. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά χρονικά στην αιχμή ηλιακής ακτινοβολίας αναφέρεται η ώρα πρόβλεψης τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμενόταν, κάτι που θα παρουσιάζεται στα αμέσως παρακάτω σχήματα. Να αναφέρουμε ακόμα ότι το MAPE στην προβλεψη για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα είναι μεγαλύτερο σε σχέση με όσο παρουσιασαμε πριν στο «7.2.2 Σφάλματα πρόβλεψης 6ωρου ορίζοντα για κάθε ώρα της ημέρας χωριστά», γιατί εδώ η πρόβλεψη γίνεται από 1 μέχρι και 24 ώρες πριν, ενώ προηγουμένως από 1 μέχρι και 6 ώρες πριν.



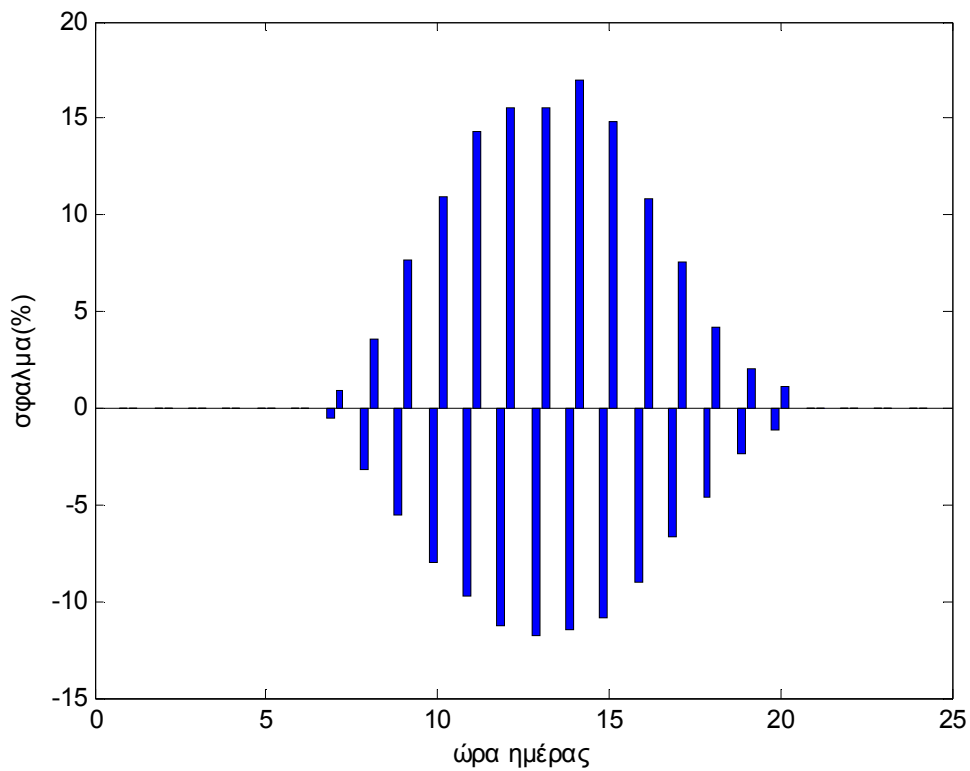
Εικόνα 7.25 MAPE για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη



Εικόνα 7.26 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη



Εικόνα 7.27 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη



Εικόνα 7.28 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη

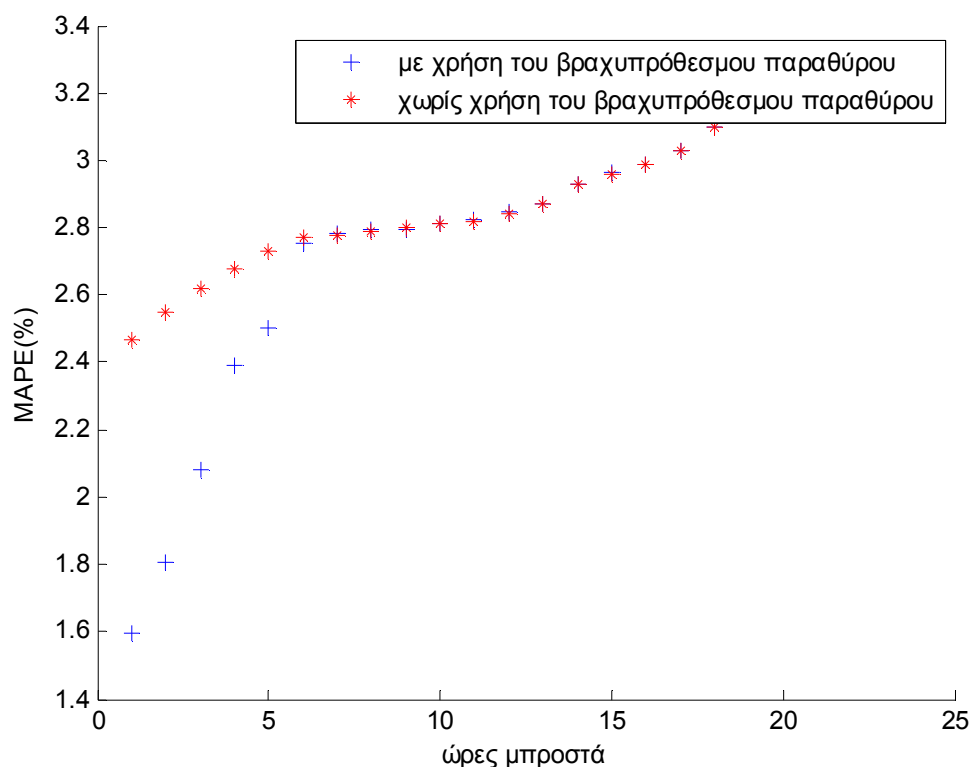
7.2.3.3 Σφάλματα ενδιάμεσων ωρών 24ωρης πρόβλεψης αν δεν είχε γίνει χρήση δωρου παραθύρου

Όπως διατυπώθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, για τις 6 πρώτες προβλέψεις του 24ωρου παραθύρου, χρησιμοποιήσαμε τα αποτελέσματα του δωρου παραθύρου, διότι αυτά ήταν βελτιστοποιημένα για την 6^η ώρα, ενώ τα άλλα για την 24^η. Θα δείξουμε εδώ τι κερδίσαμε παρουσιάζοντας αρχικά πως θα ήταν το MAPE για τις πρώτες 6 προβλέψεις του 24ωρου παραθύρου, πρώτα στον Πίνακα 7.6:

Ωρες μπροστά	MAPE(%)	Μηδενικό σφάλμα(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	2.47	56.7	21.4	21.9
2	2.55	56.8	19.5	22.7
3	2.62	55.6	19.2	25.4
4	2.68	55.5	19	25.5
5	2.73	54.3	19.3	26.4
6	2.77	54.4	18.9	26.7

Πίνακας 7.6 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής 6 πρώτων ενδιάμεσων προβλέσεων 24ωρου οριζοντα πρόβλεψης αν δεν είχε γίνει χρήση δωρου παραθύρου

Αν συγκρίνουμε τον παραπάνω πίνακα με τον 7.10 μπορούμε να δούμε πόσο χειρότερα θα ήταν αν δεν είχε γίνει χρήση του βραχυπρόθεσμου παραθύρου. Αν θέλουμε να το δούμε σχηματικά, με μπλε(+) το MAPE με χρήση του βραχυπρόθεσμου παραθύρου και με κόκκινο(*) το MAPE που θα είχαμε αν δεν κάναμε χρήση του βραχυπρόθεσμου παραθύρου:



Εικόνα 7.29 MAPE ενδιάμεσων προβλέσεων 24ωρου οριζοντα πρόβλεψης

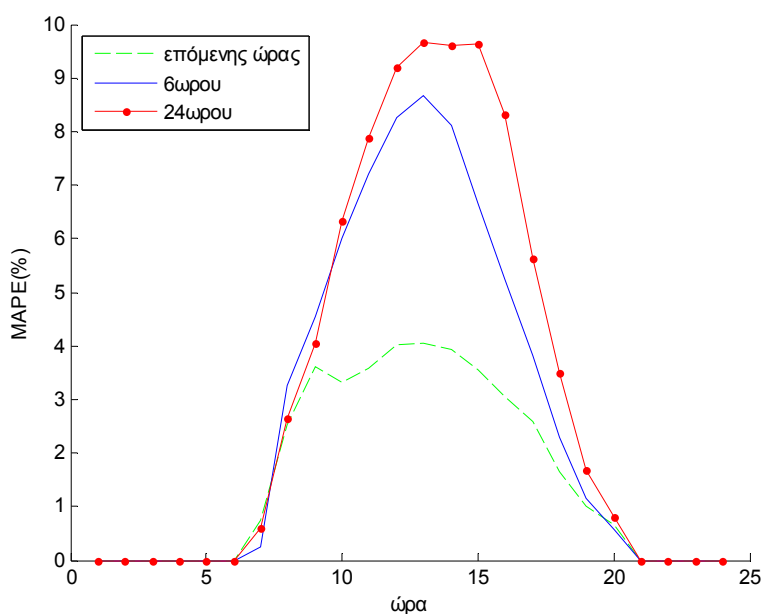
Στην πρόβλεψη που θα είχαμε αν δεν κάναμε χρήση του βραχυπρόθεσμου παραθύρου Το συνολικό MAPE του παραθύρου από 2.80% αυξάνεται στο 2.91%, η διασπορά από 13.36 Watt στα 14.09 Watt, ενώ το διάστημα εμπιστοσύνης 95% από [-26.16 , 36.58] Watt σε [-26.30 , 36.69] Watt, ή [-11.63% , 16.26%] σε [-11.69% , 16.31%] . Παρατηρούμε δηλαδή βελτίωση της συμπεριφοράς, όχι πολύ σημαντική αλλά ικανή για να αξίζει η χρήση του βραχυπρόθεσμου παραθύρου μέσα στο μακροπρόθεσμο.

7.2.4 Συγκεντρωτικά τα σφάλματα πρόβλεψης για όλο το έτος

Για να έχουμε μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς του μοντέλου στο συνολικό έτος δίνουμε τους παρακάτω συγκεντρωτικούς πίνακες. Μπορούμε να δούμε γρήγορα και να συγκρίνουμε το MAPE και το διάστημα εμπιστοσύνης για όλο το έτος. Το γράφημα με το MAPE για κάθε ώρα της ημέρας από κάθε παράθυρο πρόβλεψης παρουσιάζεται στην εικόνα 7.30.

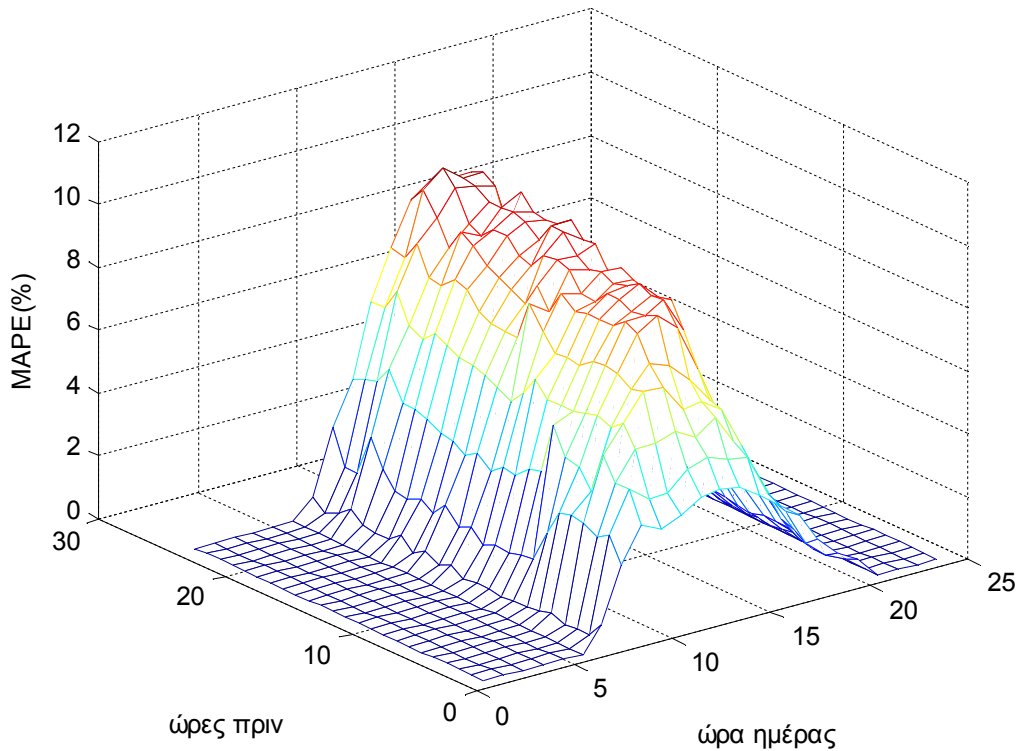
	Επομένη ώρα	6ωρο παράθυρο	24ωρο παράθυρο
MAE(Watt)	3.59	4.92	6.30
MAPE(%)	1.6	2.2	2.8
Διασπορά(Watt)	7.59	10.39	13.36
μηδενικό σφάλμα(%)	57	56	55.1
υπερεκτίμηση(%)	21.3	19.4	19.2
υποεκτίμηση(%)	21.7	24.6	25.7
Διάστημα εμπιστοσύνης 95%(%)	[-4.92 , 5.56]	[-6.32 , 7.86]	[-8.12 , 10.36]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90%(%)	[-2.69 , 2.66]	[-3.87 , 3.68]	[-4.87 , 4.46]

Πίνακας 7.7 Συγκεντρωτικός σφαλμάτων για όλο το έτος



Εικόνα 7.30 MAPE εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας, με πράσινο+ για πρόβλεψη επόμενης ώρας, με μπλε- για πρόβλεψη 6ωρου και με κόκκινο για πρόβλεψη* 24ωρου

Ενδιαφέρουσα πληροφορία μπορεί να μας παρέχει ο πίνακας 24 επί 24 με το MAPE με κάθε ώρα της ημέρας και για κάθε ώρα πριν που έγινε η πρόβλεψη για την αντίστοιχη ώρα. Από αυτό τον πίνακα μπορούμε να σχεδιάσουμε τον παρακάτω ιστό:



Εικόνα 7.31 MAPE εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας και για κάθε ώρα πριν που έγινε η εκτίμηση

Από εκείνο τον πίνακα μπορούμε να εξάγουμε τον παρακάτω πίνακα που δείχνει σε κάθε ώρα το MAPE για την πρόβλεψη όλου του επόμενου 24ωρου παράθυρου, καθώς και την πρόβλεψη όλου του επόμενου 6ωρου παράθυρου.

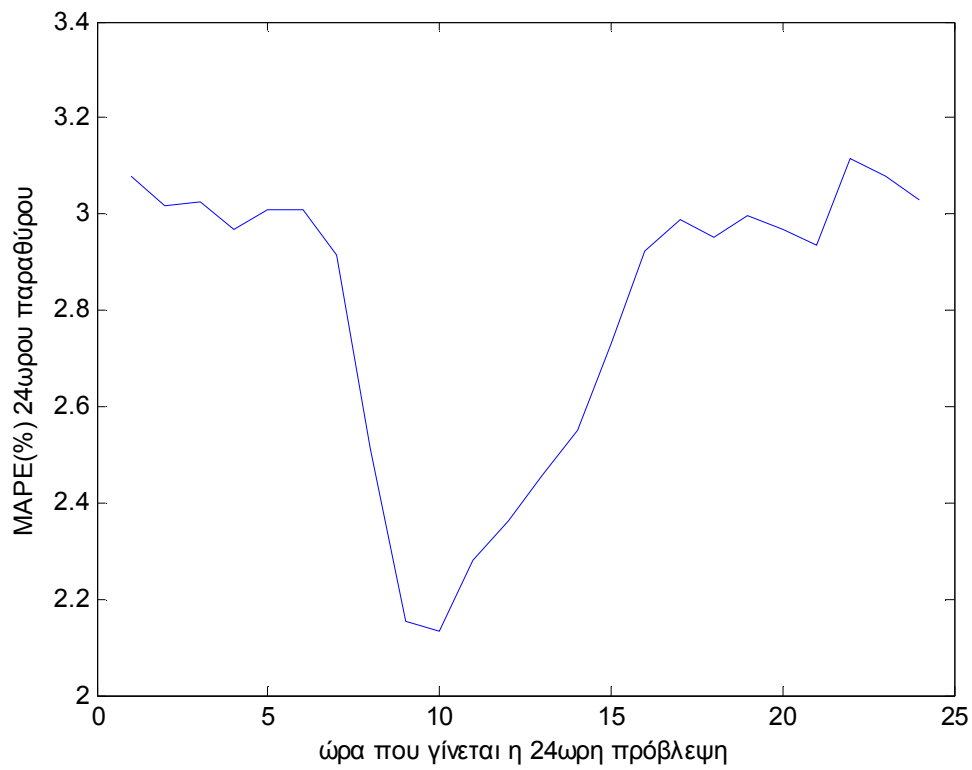
Ωρα που έγινε η πρόβλεψη	MAPE επόμενου 24ωρου(%)	MAPE επόμενου 6ωρου(%)
1	3.0779	0.04
2	3.0174	0.61
3	3.0246	1.36
4	2.9697	2.25
5	3.0081	3.60
6	3.0072	4.96
7	2.9162	5.95
8	2.5125	5.92
9	2.1538	5.41
10	2.1345	5.14
11	2.2811	4.86
12	2.3633	3.99
13	2.4571	3.12
14	2.5495	2.14
15	2.7327	1.45
16	2.9212	0.86
17	2.9885	0.48
18	2.9500	0.25
19	2.9970	0.11
20	2.9672	0
21	2.9373	0
22	3.1135	0
23	3.0768	0
24	3.0311	0

Πίνακας 7.8 με το MAPE 24ωρης και 6ωρης εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας που έγινε η εκτίμηση

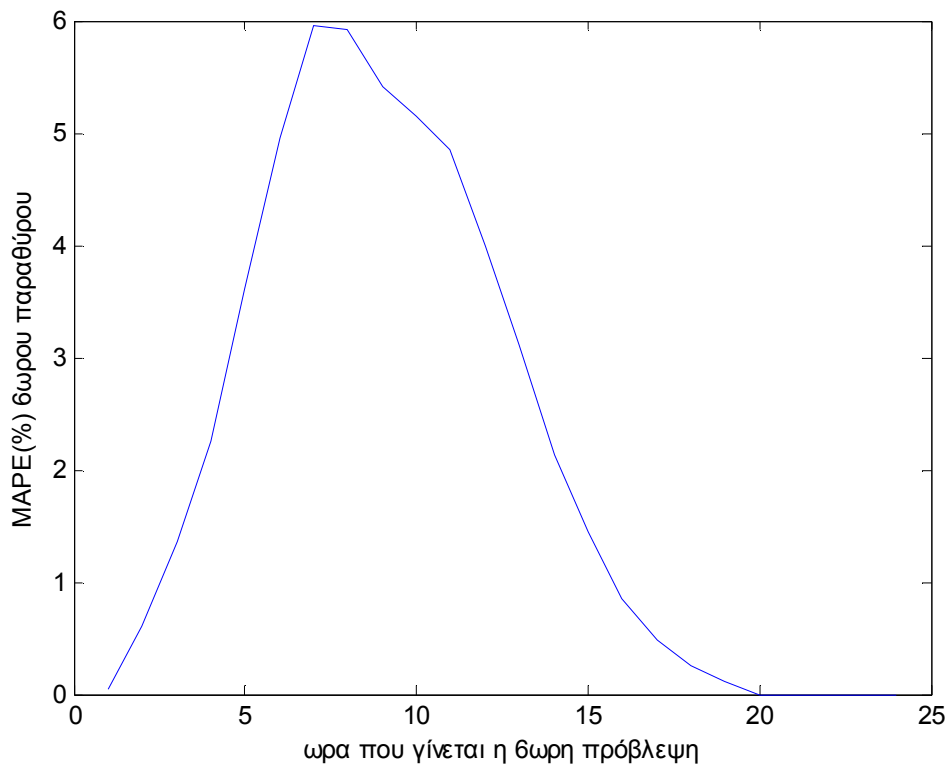
Στις 10 το πρωί παρατηρείται η καλύτερη 24ωρη πρόβλεψη με MAPE = 2.13%, ενώ η χειρότερη είναι στις 10 το βράδυ με MAPE = 3.1%.

Στις 7 το πρωί παρατηρείται η χειρότερη 6ωρη πρόβλεψη με MAPE = 5.95%, ενώ η καλύτερη είναι στις 8-12 το βράδυ με MAPE = 0. Αυτό είναι προφανές διότι στις 7 το πρωί γίνεται πρόβλεψη του 6ωρου παραθύρου αιχμής, ενώ στις 8 μέχρι τις 12 το βραδύ το 6ωρο παράθυρο αφορά καθαρά νυχτερινές ώρες, χωρίς παραγωγή.

Ο παραπάνω πίνακας μας δίνει τα εξής 2 σχήματα:



Εικόνα 7.32 MAPE 24ωρης εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας που έγινε η εκτίμηση



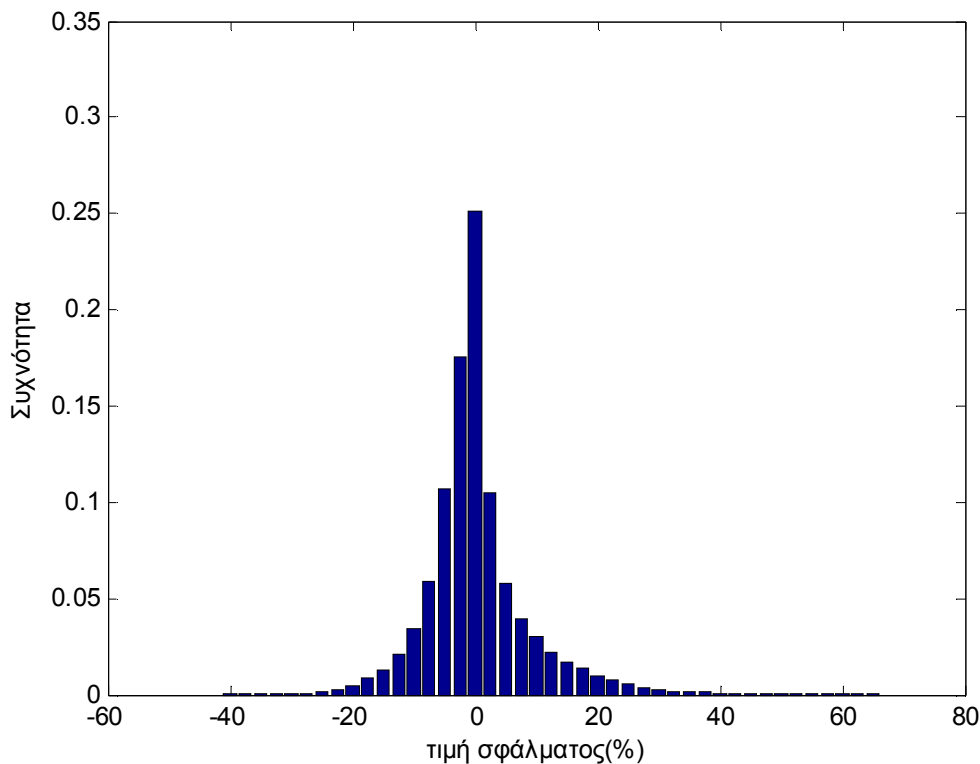
Εικόνα 7.33 MAPE 6ωρης εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας που έγινε η εκτίμηση

7.2.5 Σφάλματα πρόβλεψης 24ωρου μόνο για τις ώρες που αναμένεται παράγωγη

Θα ξαναμελετήσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου στην πρόβλεψη που κάνει για το επόμενο 24ωρο αλλά μόνο για τις ώρες που έχουμε παραγωγή. Το μοντέλο για το επόμενο 24ωρο παρουσιάζει κατά μέσο όρο το έξης σφάλμα:

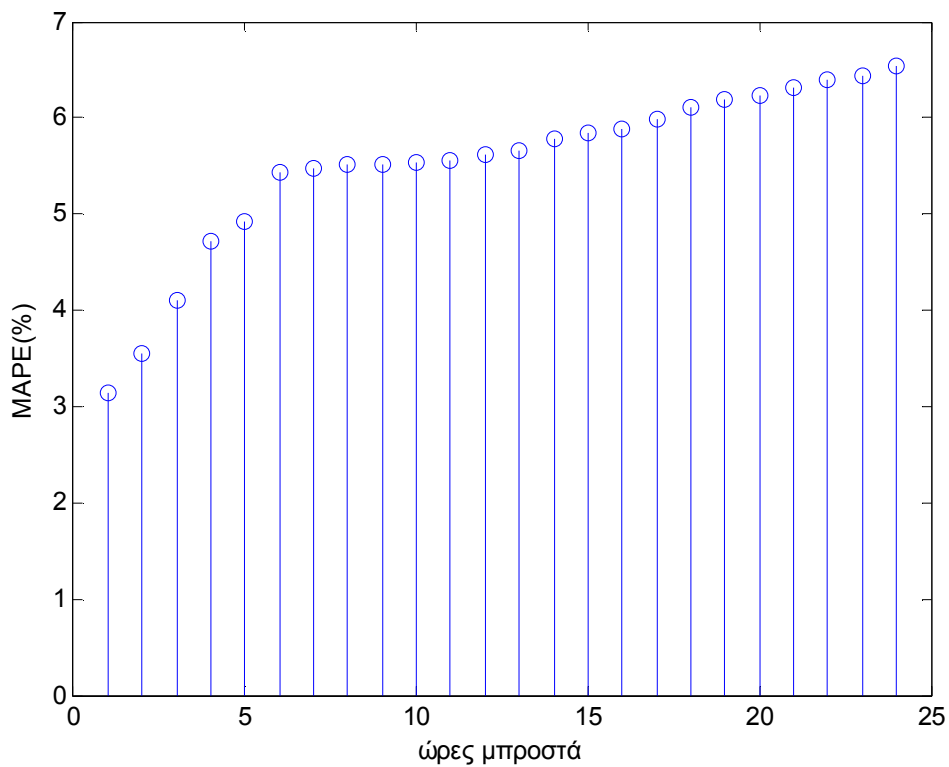
- MAE = 12.42 Watt
- MAPE = 5.5%
- Διασπορά 18.76 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 38%, υποεκτιμάται 50.6% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 11.4% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-25.98 , 36.31] Watt, ή [-11.54% , 16.13%]
- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-18.12 , 23.04] Watt, ή [-8.05% , 10.24%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστόγραμμα:

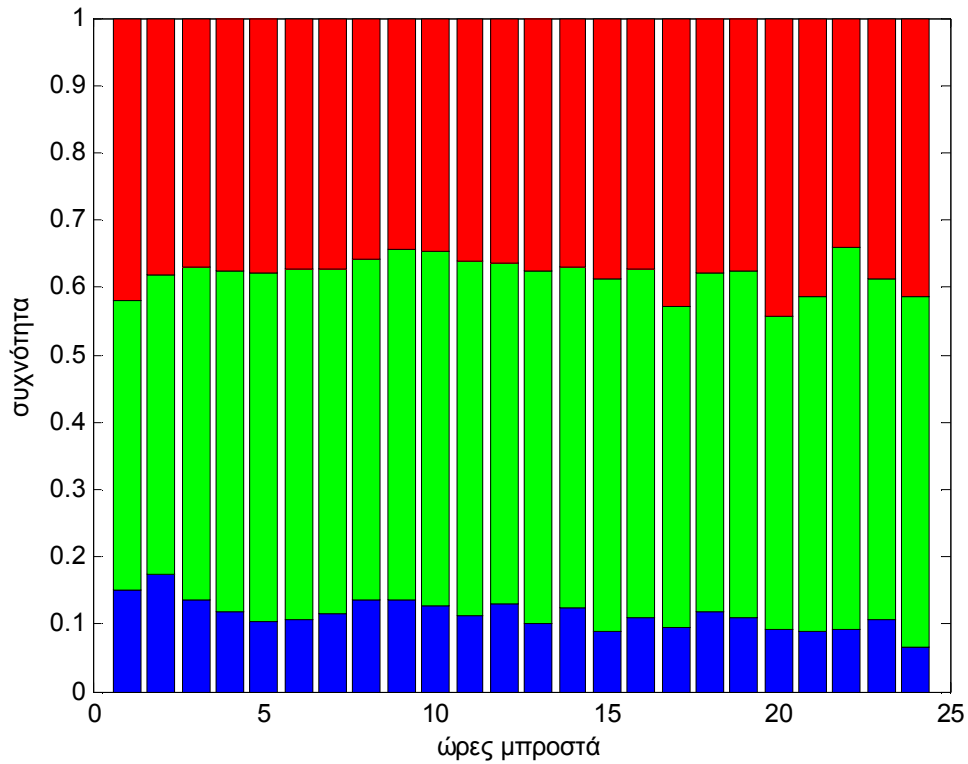


Εικόνα 7.34 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής μόνο για τις ώρες με παραγωγή για το επόμενο 24ωρο

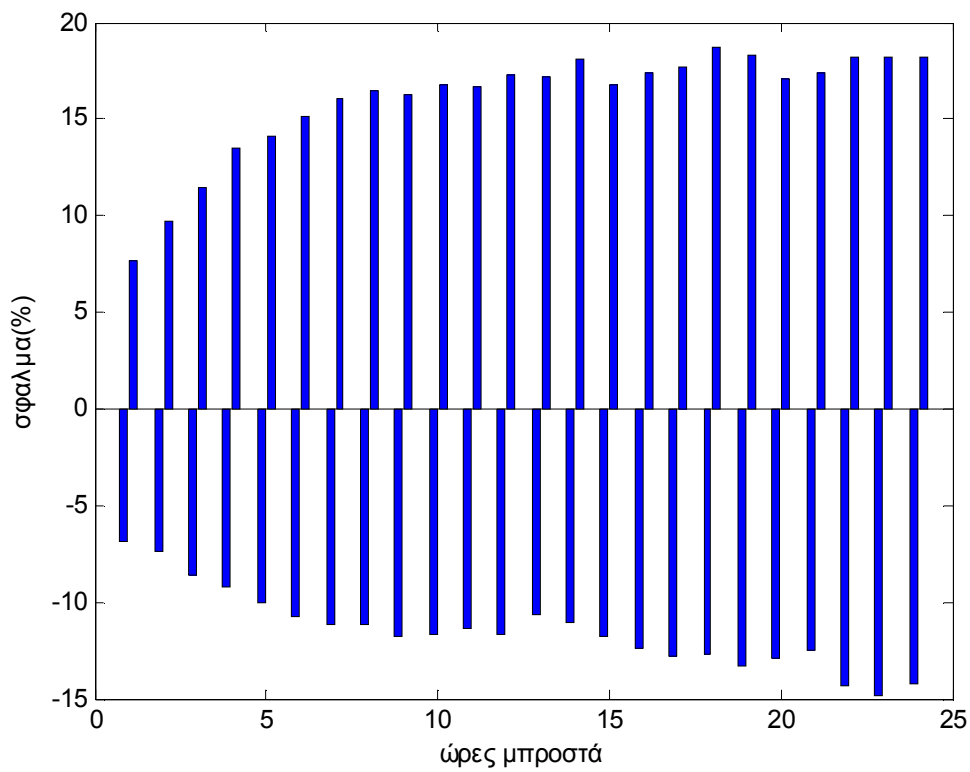
Το MAPE για το συνολικό 24ωρο παράθυρο είναι 5.5% κατά μέσο όρο, όμως ανάλογα με το πόση ώρα μπροστά αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ του 3.1 και του 6.5%. Πιο αναλυτικά ας δούμε τα σχήματα:



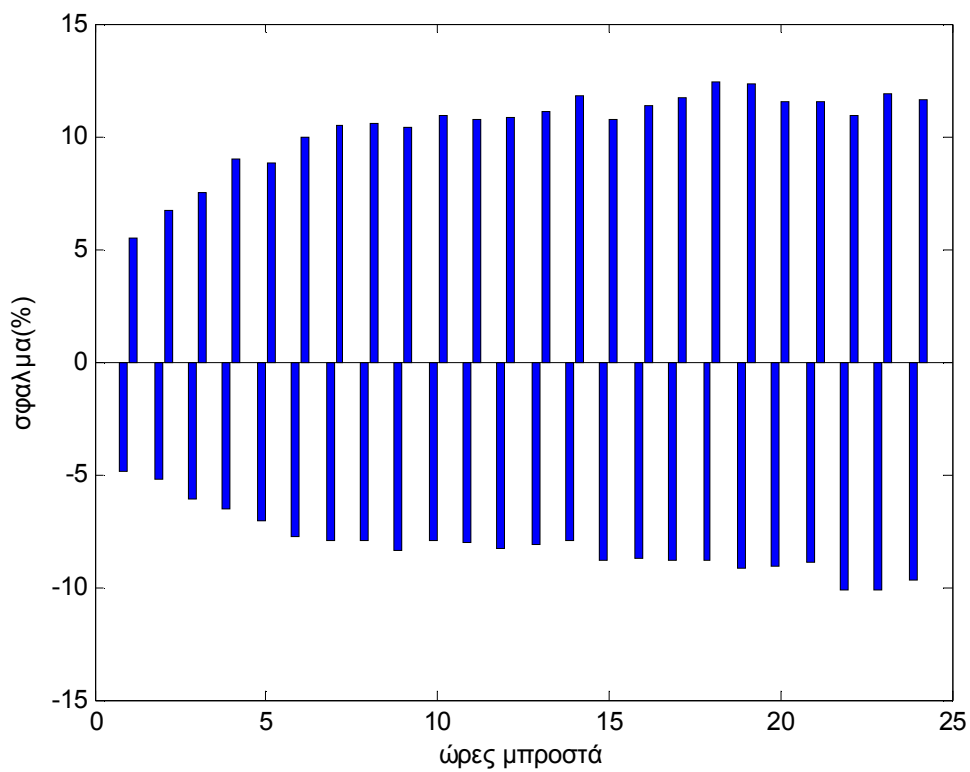
Εικόνα 7.35 MAPE ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρης πρόβλεψης μόνο για τις ώρες με παραγωγή



Εικόνα 7.36 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρης πρόβλεψης μόνο για τις ώρες με παραγωγή



Εικόνα 7.37 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρης πρόβλεψης μόνο για τις ώρες με



Εικόνα 7.38 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 90% ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρης πρόβλεψης μόνο για τις ώρες με παραγωγή

7.2.5.1 Συγκεντρωτικά τα σφάλματα πρόβλεψης για όλο το έτος μόνο για τις ώρες με παραγωγή

Για να έχουμε μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς του μοντέλου μονό για τις ώρες με ηλιοφάνεια συνολικά δίνουμε τον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα. Μπορούμε να δούμε το MAPE και το διάστημα εμπιστοσύνης για όλο το έτος.

	Επομένη ώρα	6ωρο παράθυρο	24ωρο παράθυρο
MAE(Watt)	7.07	9.70	12.42
MAPE (%)	3.1	4.3	5.5
Διασπορά(Watt)	10.66	14.39	18.53
μηδενικό σφάλμα(%)	15.1	13.1	11.4
υπερεκτίμηση(%)	42	38.3	38
υποεκτίμηση(%)	42.9	48.6	50.6
Διάστημα εμπιστοσύνης 95%(%)	[-9.21 , 9.51]	[-11.44 , 15.84]	[-11.54 , 16.13]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90%(%)	[-7.18 , 8.12]	[-9.02 , 11.47]	[-8.05 , 10.24]

Πίνακας 7.9 Συγκεντρωτικός σφαλμάτων για όλο το έτος μόνο για τις ώρες που έχουμε παραγωγή

Στο συνολικό εδώ πίνακα φαίνεται καθαρά ότι η μακροπρόθεσμη εκτίμηση έχει μεγαλύτερο σφάλμα, όπως ήταν και αναμενόμενο άλλωστε. Το MAPE για τις ώρες με ηλιοφάνεια ισούται με 5.5% στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης και είναι αρκετά καλό, σε σχέση με το 4-12% που παρουσιάζουν άλλες πτυχιακές χωρίς να προσδιορίζουν αν αναφέρεται σε αυτές τις ώρες ή όχι. Στις πιο πολλές περιπτώσεις υποεκτιμούμε την παραγωγή, κάτι που είναι θετικό για το διαχειριστή του ΣΗΕ που αρκετά συχνά προτιμά να είναι συντηρητικός αναφορικά με τη συνεισφορά των ΑΠΕ.

7.3 Σφάλματα Πρόβλεψης για 2 εποχές του Έτους

Σε δεύτερη φάση όπως είπαμε εξετάζεται πως συμπεριφέρεται το μοντέλο χωριστά σε δυο περιόδους του έτους. Χωρίζεται το έτος στα δυο σύμφωνα με τις 2 ημέρες της ισημερίας (21η Μαρτίου και 21η Σεπτεμβρίου) έτσι ώστε στο ένα διάστημα να έχουμε μεγαλύτερη μέρα από νύχτα και στο άλλο μεγαλύτερη νύχτα από μέρα. Θα παρουσιαστούν αποτελέσματα για προβλέψεις με ορίζοντα 1,6 και 24 ωρών.

7.3.1 Σφάλματα Πρόβλεψης Επόμενης Ώρας

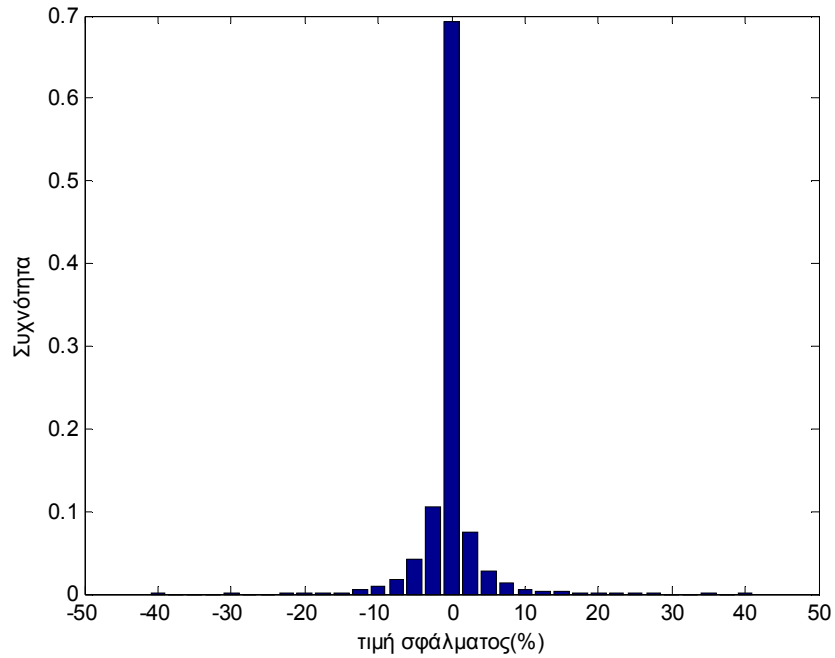
Θερινή περίοδος

Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για την επόμενη ώρα κατά τη θερινή περίοδο παρουσιάζει κατά μέσο όρο το εξής σφάλμα:

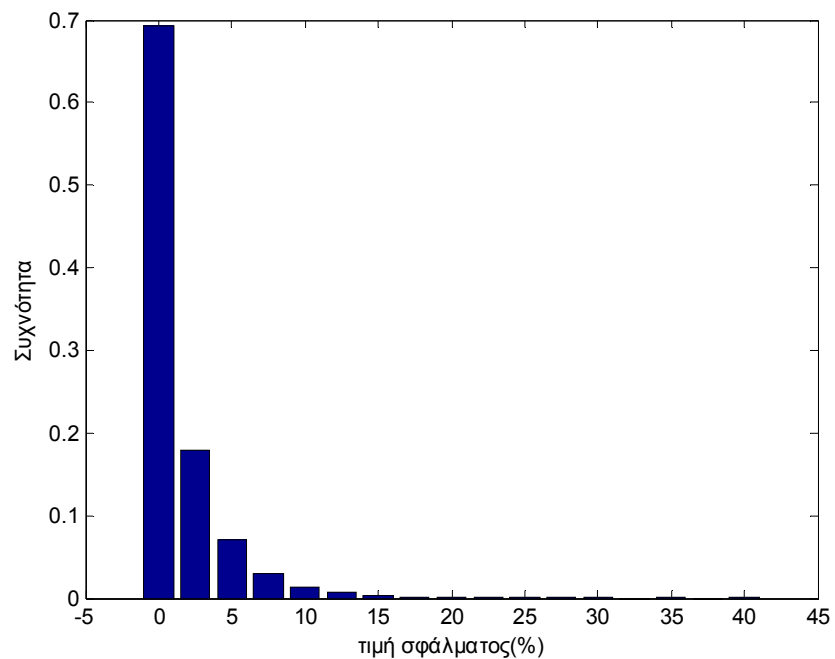
- MAE = 3.32 Watt
- MAPE = 1.48%
- Διασπορά 7.26 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 19.8%, υποεκτιμάται 25.8% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 54.4% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-11.41 , 8.87] Watt, ή [-5.07% , 3.94%]

- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-6.03 , 3.84] Watt, ή [-2.68% , 1.71%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα συχνότητας:



Εικόνα 7.39 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας θερινής περιόδου



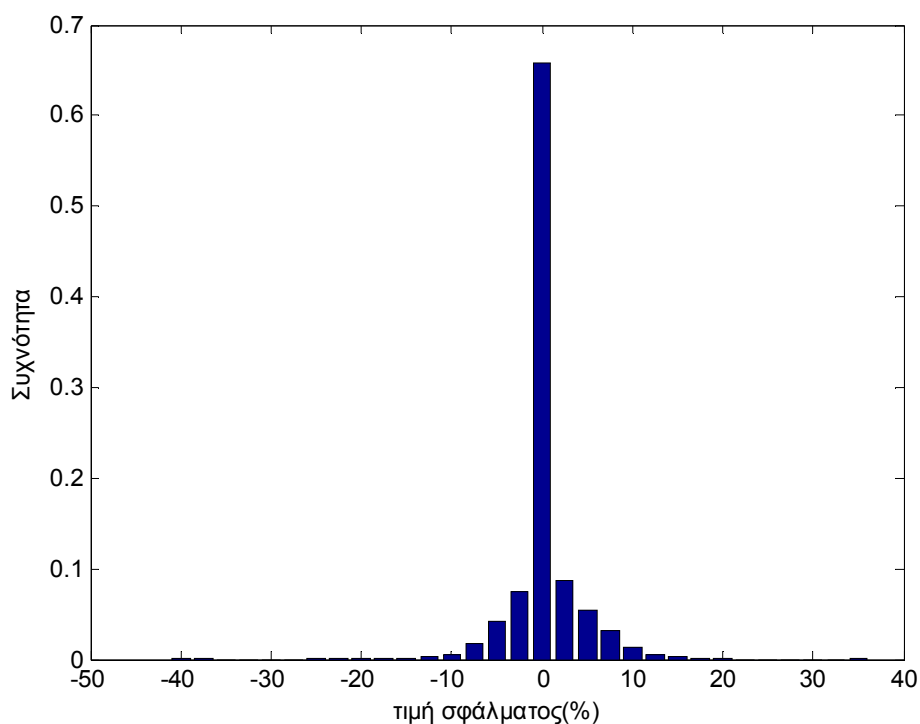
Εικόνα 7.40 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας θερινής περιόδου

Χειμερινή περίοδος

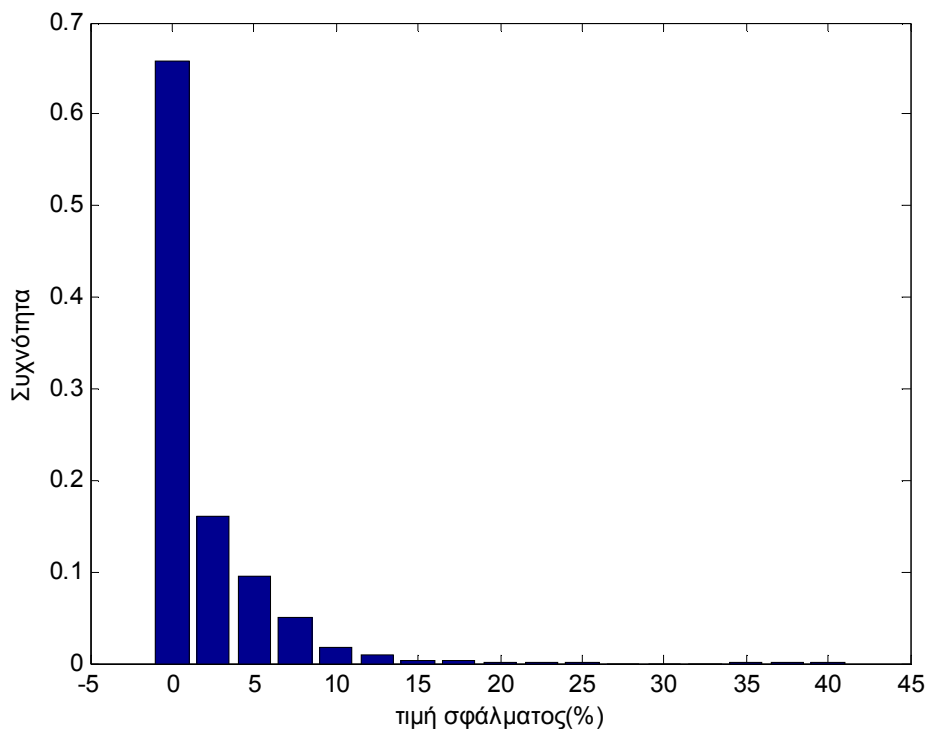
Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για την επόμενη ώρα κατά τη χειμερινή περίοδο παρουσιάζει κατά μέσο όρο το εξής σφάλμα:

- MAE = 3.85 Watt
- MAPE = 1.71%
- Διασπορά 7.87 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 22.8%, υποεκτιμάται 17.7% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 59.5% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-10.92 , 14.76] Watt, ή [-4.85% , 6.56%]
- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-6.10 , 9.05] Watt, ή [-2.07% , 4.02%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα συχνότητας:



Εικόνα 7.41 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας χειμερινής περιόδου



Εικόνα 7.42 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας χειμερινής περιόδου

Παρατηρούμε καλύτερη συμπεριφορά του μοντέλου στη θερινή περίοδο, όπως ήταν αναμενόμενο. Μικρότερο MAPE και στενότερα διαστήματα εμπιστοσύνης, οπότε έχουμε ακριβέστερη κατά μέσο όρο και ασφαλέστερη πρόβλεψη κατά τη θερινή περίοδο σε σχέση με τη χειμερινή.

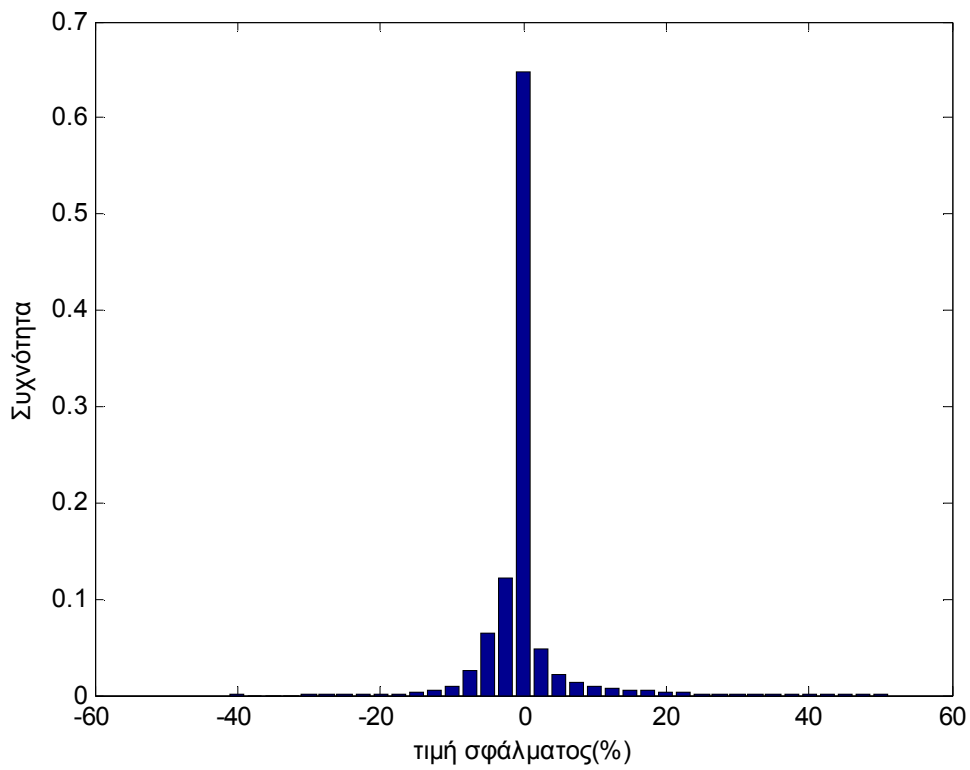
7.3.2 Σφάλματα Πρόβλεψης βωρου ορίζοντα

Θερινή περίοδος

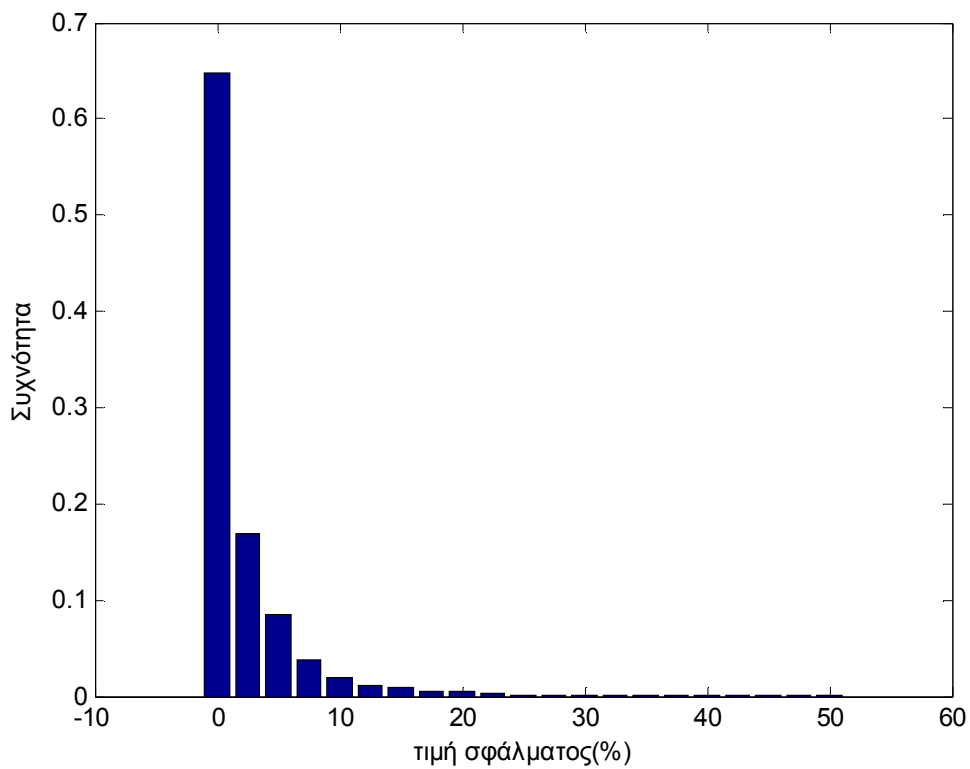
Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για βωρο ορίζοντα κατά τη θερινή περίοδο παρουσιάζει κατά μέσο όρο το έξης σφάλμα:

- MAE = 4.75 Watt
- MAPE = 2.11%
- Διασπορά 10.45 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 16.1%, υποεκτιμάται 30.7% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 53.2% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-13.47 , 14.71] Watt, ή [-5.98% , 6.53%]
- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-9.10 , 4.21] Watt, ή [-4.04% , 1.88%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα:



Εικόνα 7.43 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για ωρου ορίζοντα θερινής περιόδου



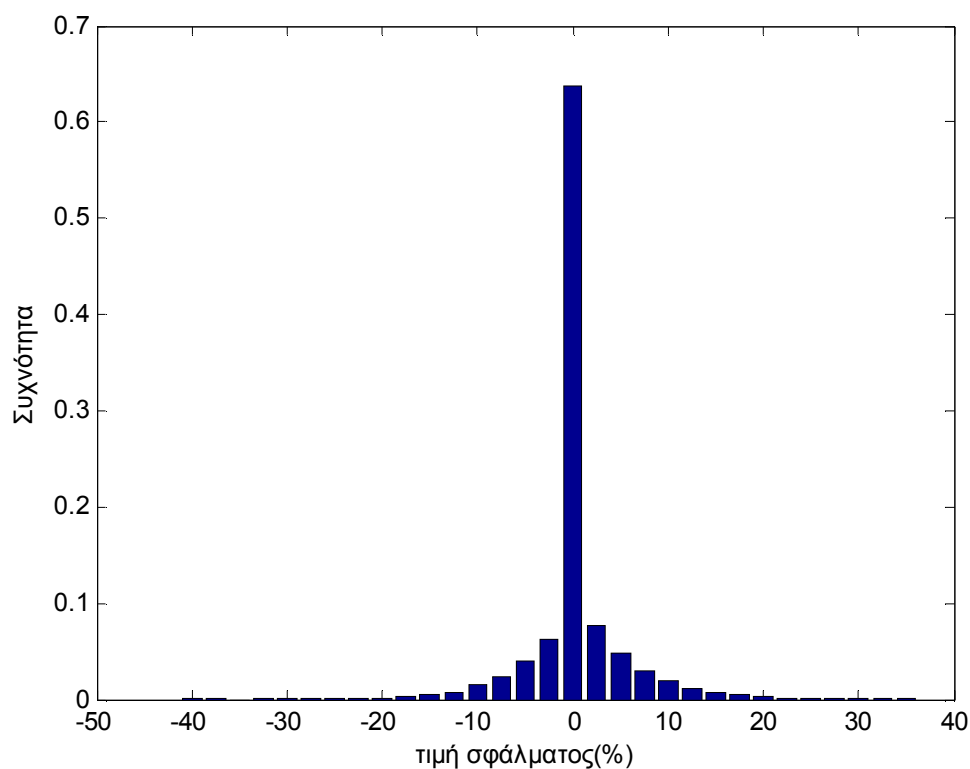
Εικόνα 7.44 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης ωρου ορίζοντα θερινής περιόδου

Χειμερινή περίοδος

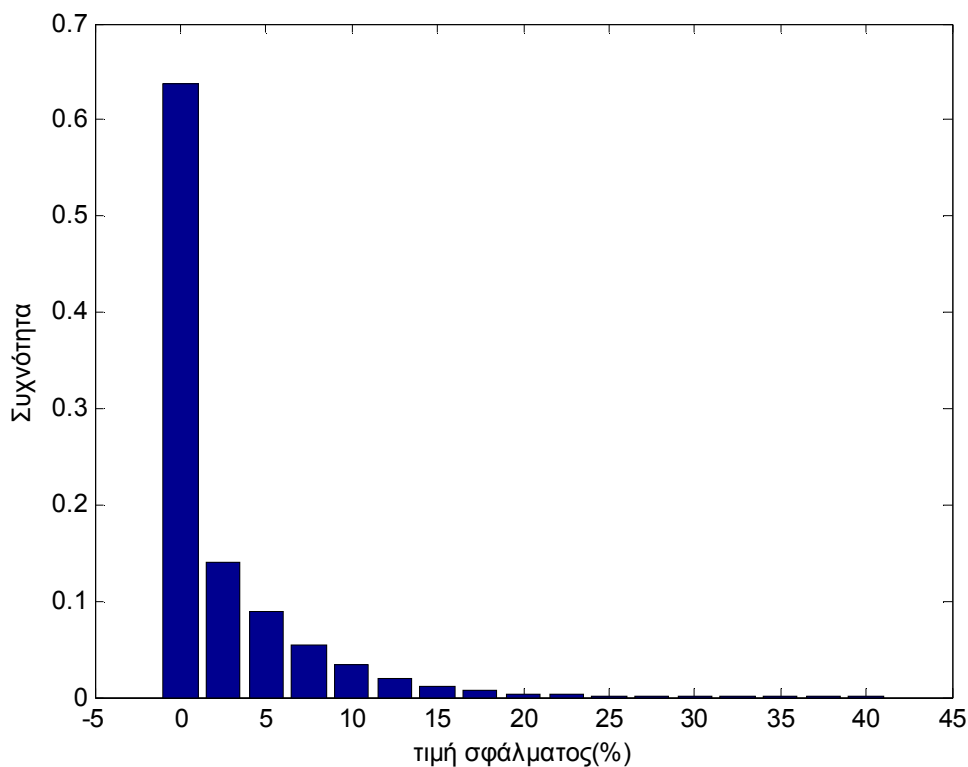
Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για ώρο ορίζοντα κατά τη χειμερινή περίοδο παρουσιάζει κατά μέσο όρο το εξής σφάλμα:

- MAE = 5.09 Watt
- MAPE = 2.27%
- Διασπορά 10.32 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 22.7%, υποεκτιμάται 18.5% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 58.8% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-11.09 , 19.09] Watt, ή [-4.93% , 8.48%]
- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-5.61 , 10.78] Watt, ή [-2.49% , 4.79%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα:



Εικόνα 7.45 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής ώρου ορίζοντα χειμερινής περιόδου



Εικόνα 7.46 Ιστογράμμο συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής 6ωρου ορίζοντα χειμερινής περιόδου

Παρατηρούμε καλύτερη συμπεριφορά του μοντέλου στη θερινή περίοδο, όπως ήταν αναμενόμενο. Μικρότερο MAPE και στενότερα διαστήματα εμπιστοσύνης, οπότε έχουμε ακριβέστερη κατά μέσο όρο και ασφαλέστερη πρόβλεψη κατά τη θερινή περίοδο σε σχέση με τη χειμερινή.

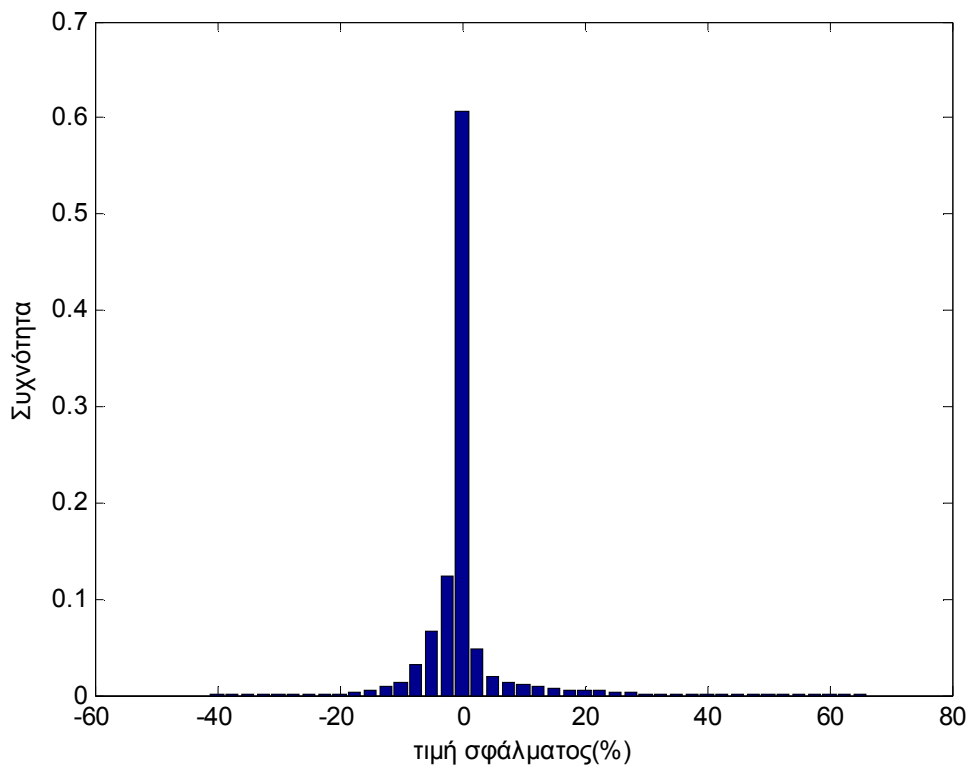
7.3.3 Σφάλματα Πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα

Θερινή περίοδος

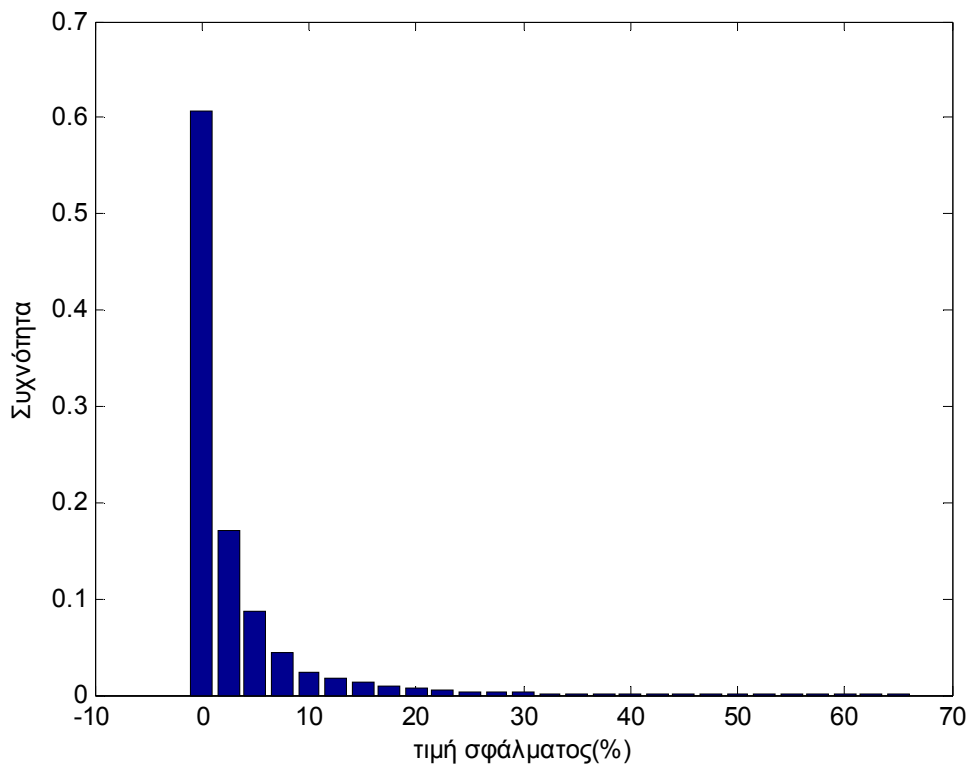
Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για 24ωρο ορίζοντα κατά τη θερινή περίοδο παρουσιάζει κατά μέσο όρο το έξης σφάλμα:

- MAE = 6.32 Watt
- MAPE = 2.81%
- Διασπορά 13.97 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 17.3%, υποεκτιμάται 29.6% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 53.1% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-16.66 , 21.85] Watt, ή [-7.40% , 9.71%]
- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-10.87 , 5.95] Watt, ή [-4.83% , 2.64%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα:



Εικόνα 7.47 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για 24ωρο ορίζοντα θερινής περιόδου



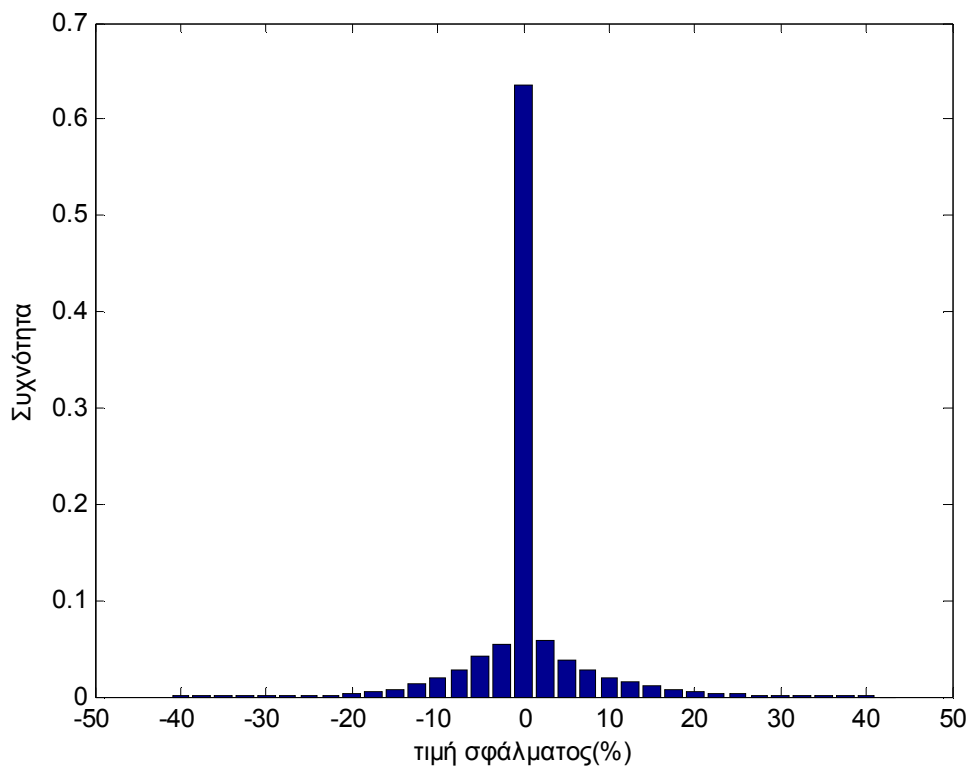
Εικόνα 7.48 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για 24ωρο ορίζοντα θερινής περιόδου

Χειμερινή περίοδος

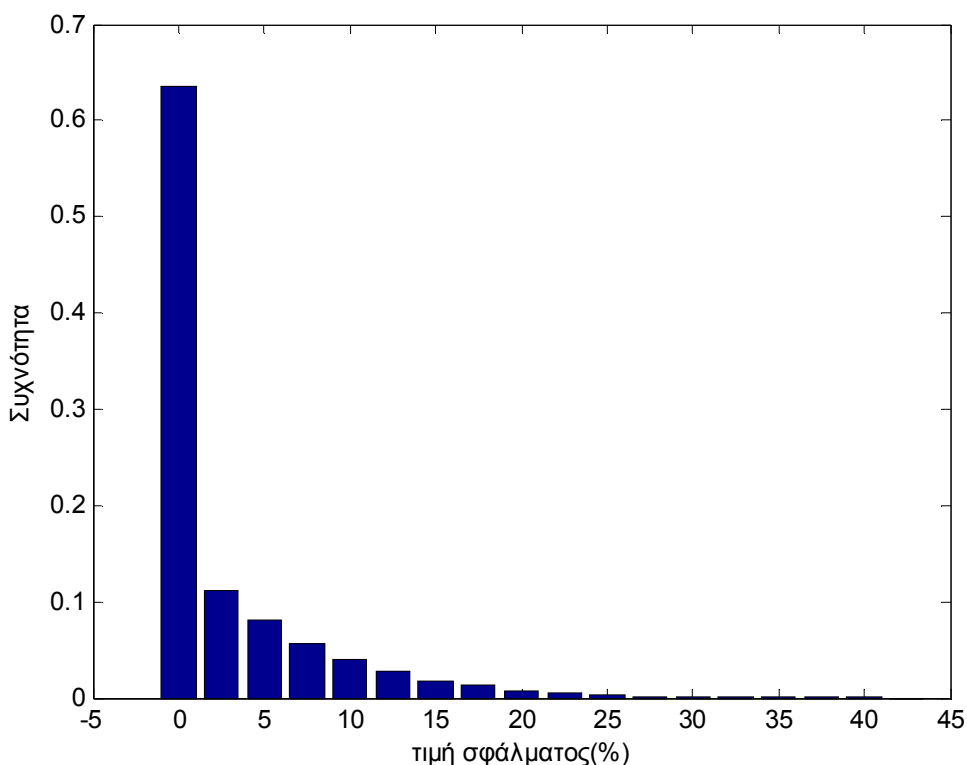
Στην πρόβλεψη που κάνει το μοντέλο για το 24ωρο ορίζοντα κατά τη χειμερινή περίοδο παρουσιάζει κατά μέσο όρο το έξης σφάλμα:

- MAE = 6.28 Watt
- MAPE = 2.79%
- Διασπορά 12.72 Watt
- Η τιμή της παράγωγης υπερεκτιμάται στο 19.7%, υποεκτιμάται 21.2% και παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα στο 59.1% των περιπτώσεων.
- Διάστημα εμπιστοσύνης 95% [-20.02 , 24.06] Watt, ή [-8.89% , 10.69%]
- Διάστημα εμπιστοσύνης 90% [-11.09 , 12.86] Watt, ή [-4.93% , 5.72%]

Ας απεικονίσουμε το σφάλμα και σε ιστογράμματα:



Εικόνα 7.49 Ιστόγραμμα συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για 24ωρο ορίζοντα χειμερινής περιόδου



Εικό

να 7.50 Ιστόγραμμα συχνότητας απόλυτης τιμής σφάλματος πρόβλεψης παραγωγής για 24ωρο ορίζοντα χειμερινής περιόδου

Με μια βιαστική ματιά θα δει κανείς ότι το MAPE στη χειμερινή περίοδο είναι πιο μικρό από ότι στη θερινή, ενώ ο καιρός είναι πιο ασταθής, άρα πιο δύσκολη η πρόβλεψη. Αυτό δεν σημαίνει ότι έχει γίνει καλύτερη πρόβλεψη σε καμιά περίπτωση. Συμβαίνει διότι η χειμερινή περίοδος έχει πιο λίγες ώρες με ηλιοφάνεια άρα πιο πολλές ώρες που η παραγωγή άρα και το σφάλμα είναι 0. Αν παρατηρήσουμε πιο προσεκτικά τα διαστήματα εμπιστοσύνης φαίνεται ότι για την θερινή περίοδο η πρόβλεψη είναι πιο ασφαλής. Ας δούμε όμως πάλι τα σφάλματα πρόβλεψης 24ωρου υπό 2 διαφορετικές οπτικές γωνίες για κάθε περίοδο του έτους χωριστά.

7.3.3.1 Σφάλματα ενδιάμεσων ωρών πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα

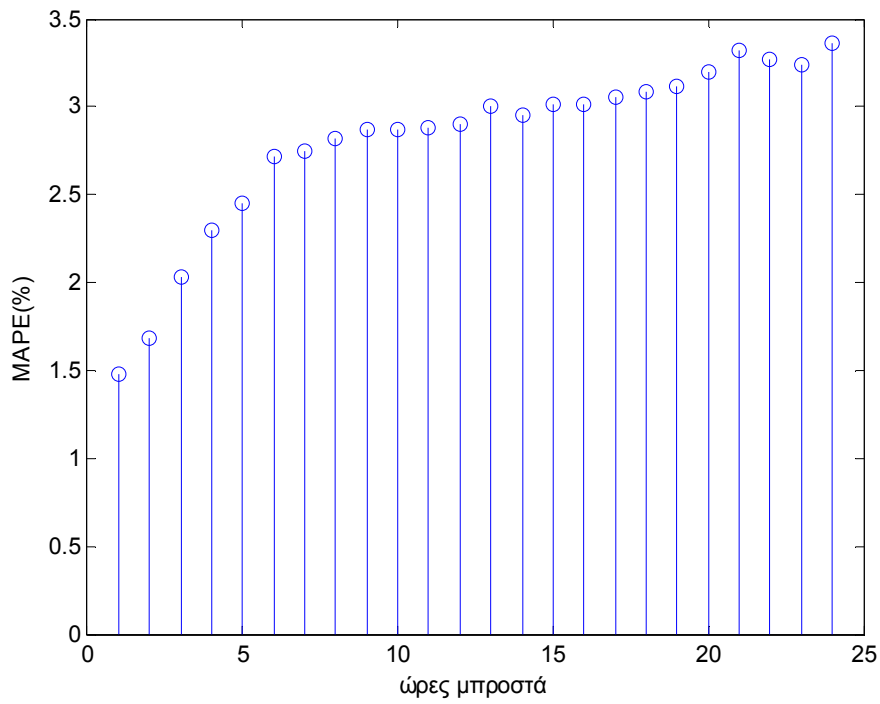
Θερινή περίοδος

Το MAPE για το συνολικό 24ωρο παράθυρο κατά τη θερινή περίοδο είναι 2.81% κατά μέσο όρο, όμως ανάλογα με το πόση ώρα μπροστά αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ του 1.48 και του 3.36%. Πιο αναλυτικά (Πίνακας 7.10):

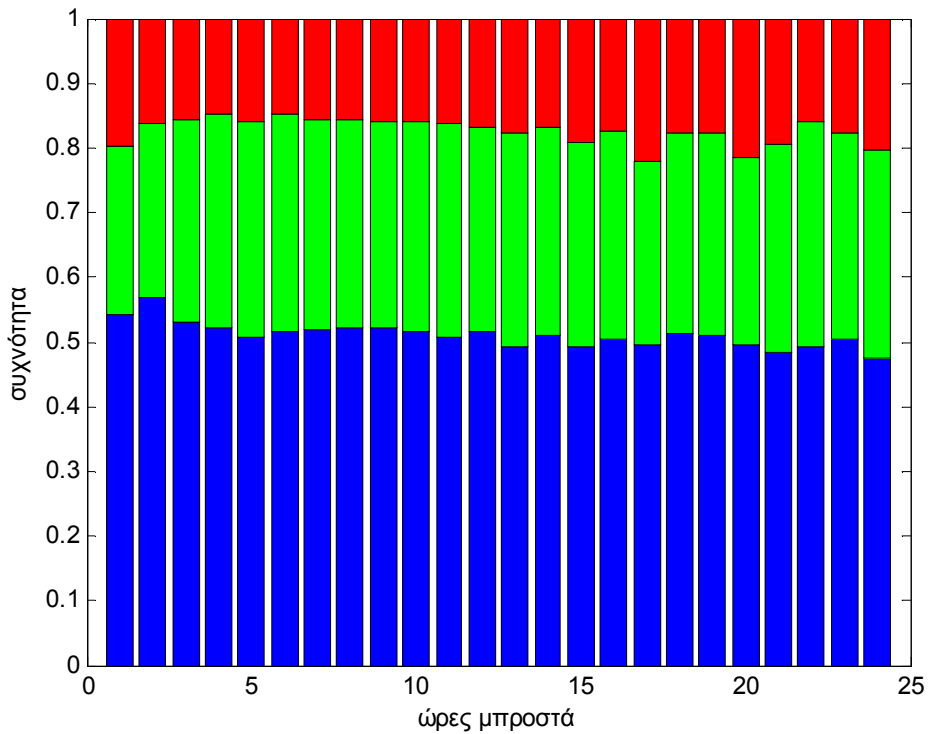
Ωρες μπροστά	MAPE(%)	Μηδενικό σφάλμα(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	1.48	54.4	19.8	25.8
2	1.68	56.8	16.1	27.1
3	2.04	53.2	15.5	31.3
4	2.30	52.1	14.9	33
5	2.45	50.7	15.9	33.4
6	2.71	51.7	14.7	33.6
7	2.75	51.9	15.5	32.6
8	2.82	52.2	15.6	32.2
9	2.87	52.2	16.1	31.7
10	2.87	51.7	16	32.3
11	2.89	50.8	16.2	33
12	2.90	51.6	16.9	31.5
13	3.00	49.3	17.7	33
14	2.96	51.1	16.8	32.1
15	3.02	49.4	19.1	31.5
16	3.01	50.5	17.4	32.1
17	3.05	49.5	22.2	28.3
18	3.09	51.3	17.6	31.1
19	3.12	51.1	17.8	31.1
20	3.20	49.4	21.4	29.2
21	3.32	48.4	19.6	32
22	3.27	49.2	15.9	34.9
23	3.24	50.6	17.7	31.7
24	3.36	47.4	20.1	34.5

Πινάκας 7.10 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα

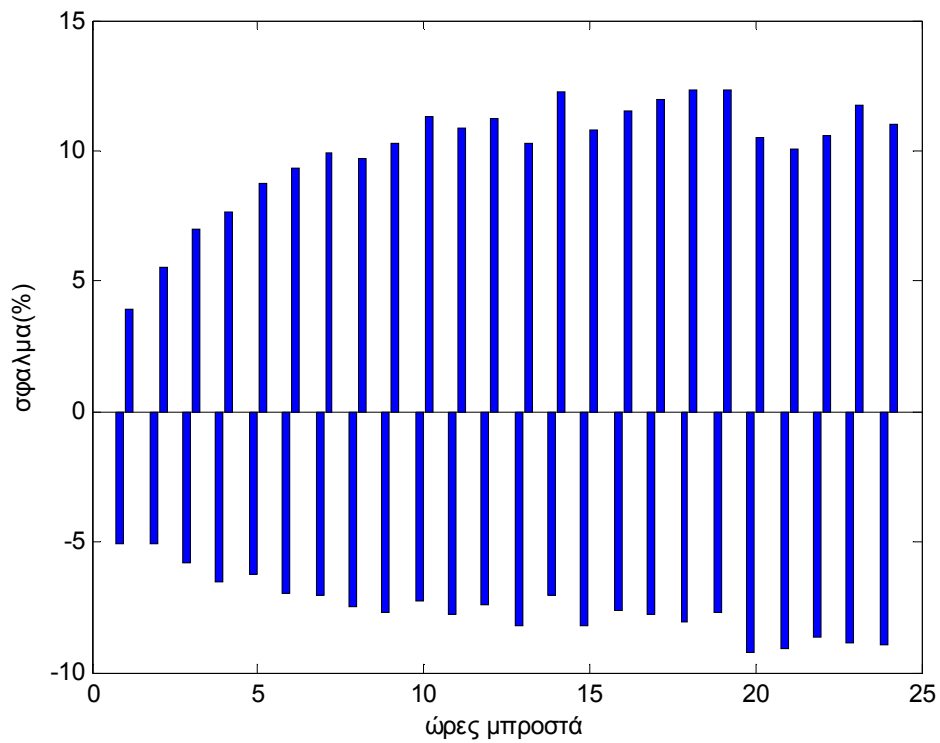
Παρατηρούμε ότι δεν έχει σημασία αν αναφερόμαστε σε όλο το έτος, ή μόνο στη θερινή περίοδο, όσο πιο μακριά χρονικά γίνει η πρόβλεψη τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμένεται, κάτι που θα δούμε αμέσως τώρα στα παρακάτω σχήματα:



Εικόνα 7.51 MAPE ενδιάμεσων προβλέψεων πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα θερινής περιόδου



Εικόνα 7.52 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα θερινής περιόδου



Εικόνα 7.53 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% ενδιάμεσων προβλέψεων πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα θερινής περιόδου

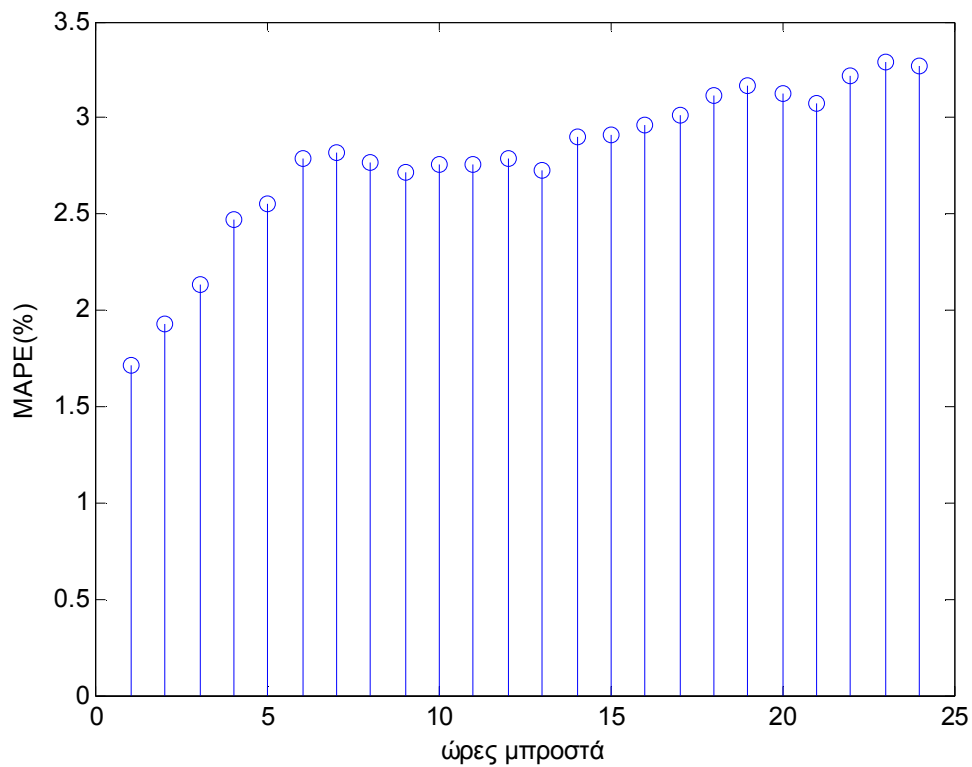
Χειμερινή περίοδος

Το MAPE για το συνολικό 24ωρο παράθυρο κατά τη θερινή περίοδο είναι 2.81% κατά μέσο όρο, όμως ανάλογα με το πόση ώρα μπροστά αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ του 1.71 και του 3.26%. Πιο αναλυτικά (Πίνακας 7.11):

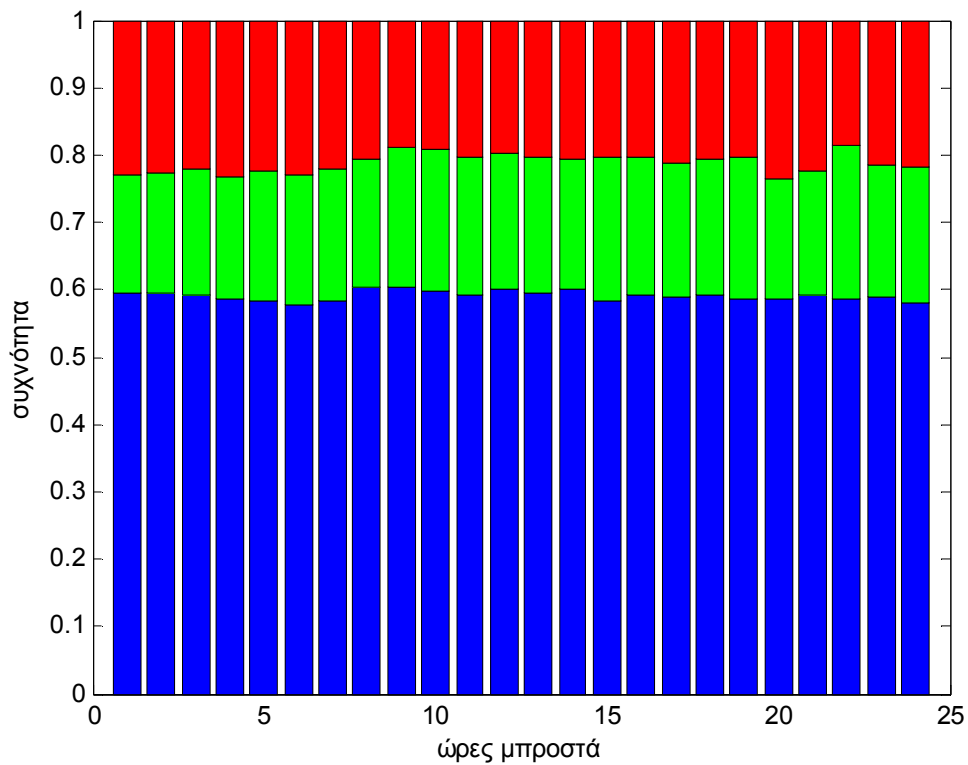
Ωρες μπροστά	MAPE(%)	Μηδενικό σφάλμα(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	1.71	59.6	22.8	17.6
2	1.93	59.4	22.6	18
3	2.13	59.1	22.1	18.8
4	2.47	58.7	23.3	18
5	2.55	58.3	22.5	19.2
6	2.78	57.7	23	19.3
7	2.81	58.4	22.2	19.4
8	2.77	60.3	20.7	19
9	2.71	60.3	18.8	20.9
10	2.75	59.9	19.2	20.9
11	2.75	59.1	20.4	20.5
12	2.78	60.2	19.8	20
13	2.72	59.6	20.2	20.2
14	2.90	60	20.7	19.3
15	2.91	58.4	20.3	21.3
16	2.96	59.1	20.4	20.5
17	3.01	58.9	21.3	19.8
18	3.11	59.3	20.7	20.0
19	3.17	58.6	20.2	21.2
20	3.12	58.6	23.5	17.9
21	3.07	59.1	22.3	18.6
22	3.22	58.7	18.6	22.7
23	3.28	58.9	21.4	19.7
24	3.26	58	21.8	20.2

Πινάκας 7.11 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα

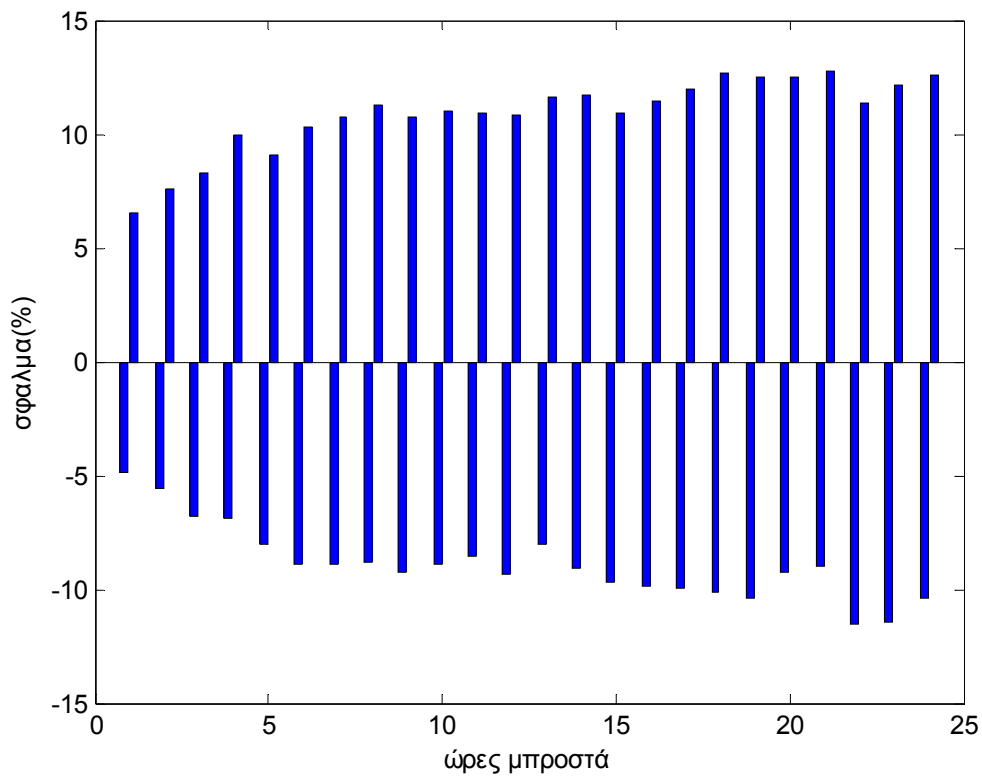
Παρατηρούμε ότι δεν έχει σημασία αν αναφερόμαστε είτε σε όλο το έτος, είτε μόνο στη θερινή είτε μόνο στη χειμερινή περίοδο, όσο πιο μακριά χρονικά γίνει η πρόβλεψη τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμένεται, όπως παρουσιάζεται στα αμέσως επόμενα σχήματα:



Εικόνα 7.54 MAPE ενδιάμεσων προβλέψεων πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα χειμερινής περιόδου



Εικόνα 7.55 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής ενδιάμεσων προβλέψεων πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα χειμερινής περιόδου



Εικόνα 7.56 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% ενδιάμεσων προβλέψεων πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα χειμερινής περιόδου

7.3.3.2 Σφάλματα πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα για κάθε ώρα της ημέρας χωριστά

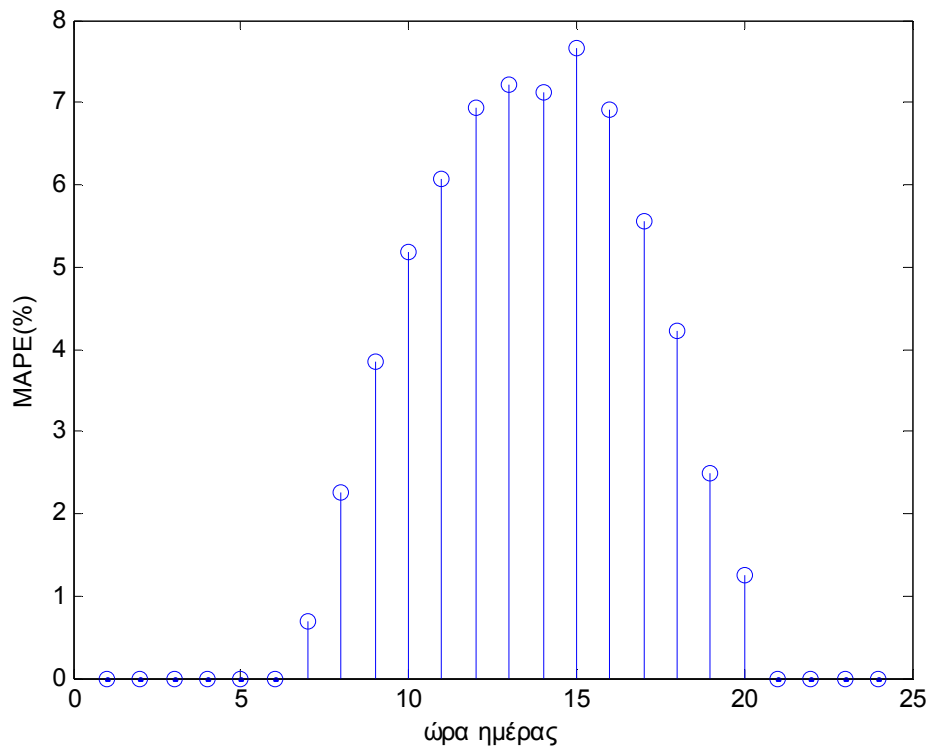
Θερινή περίοδος

Το MAPE για το συνολικό 24ωρο παράθυρο είναι 2.81% κατά μέσο όρο, όμως για κάθε ώρα που αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ 0 και 7.66%. Πιο αναλυτικά(Πίνακας 7.12):

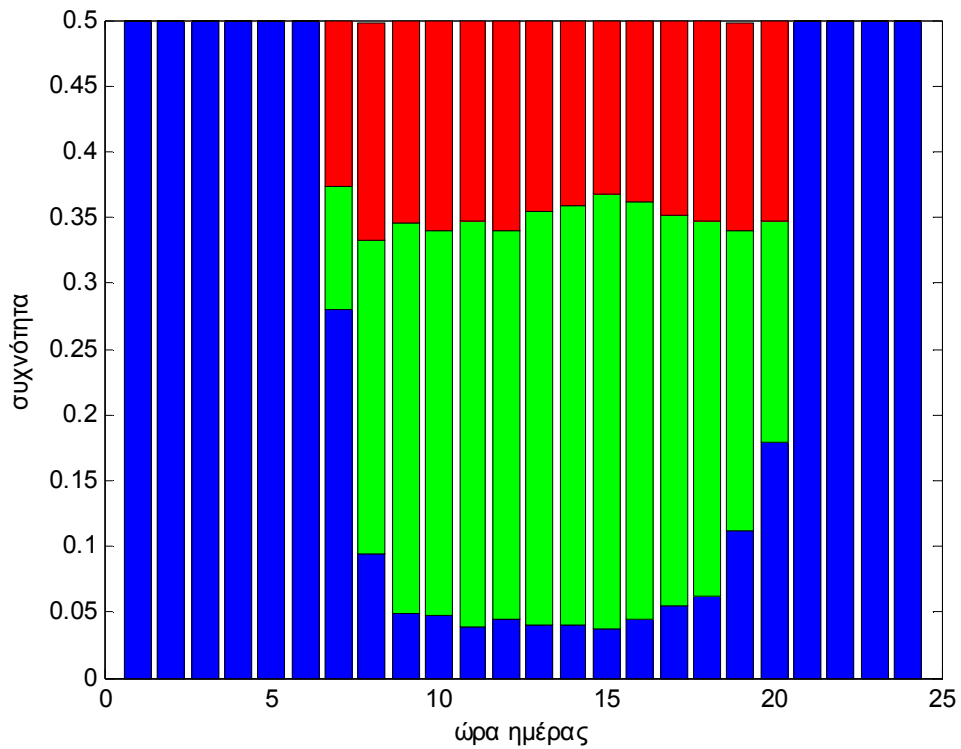
Ωρα Πρόβλεψης	MAPE(%)	Μηδενικό λάθος(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	0	100	0	0
2	0	100	0	0
3	0	100	0	0
4	0	100	0	0
5	0	100	0	0
6	0	100	0	0
7	0.69	56	25	19
8	2.25	19	33.3	47.6
9	3.85	10	30.8	59.2
10	5.18	9.6	31.8	58.6
11	6.06	7.7	30.3	62
12	6.92	8.9	31.8	59.2
13	7.23	8.1	28.7	63.1
14	7.12	8.2	28.1	63.7
15	7.66	7.6	26.3	66.1
16	6.90	8.9	27.3	63.8
17	5.56	11	29.4	59.6
18	4.22	12.3	30.5	57.2
19	2.50	22.3	31.7	46
20	1.24	36	30.5	33.5
21	0	100	0	0
22	0	100	0	0
23	0	100	0	0
24	0	100	0	0

Πινάκας 7.12 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη στην θερινή περίοδο

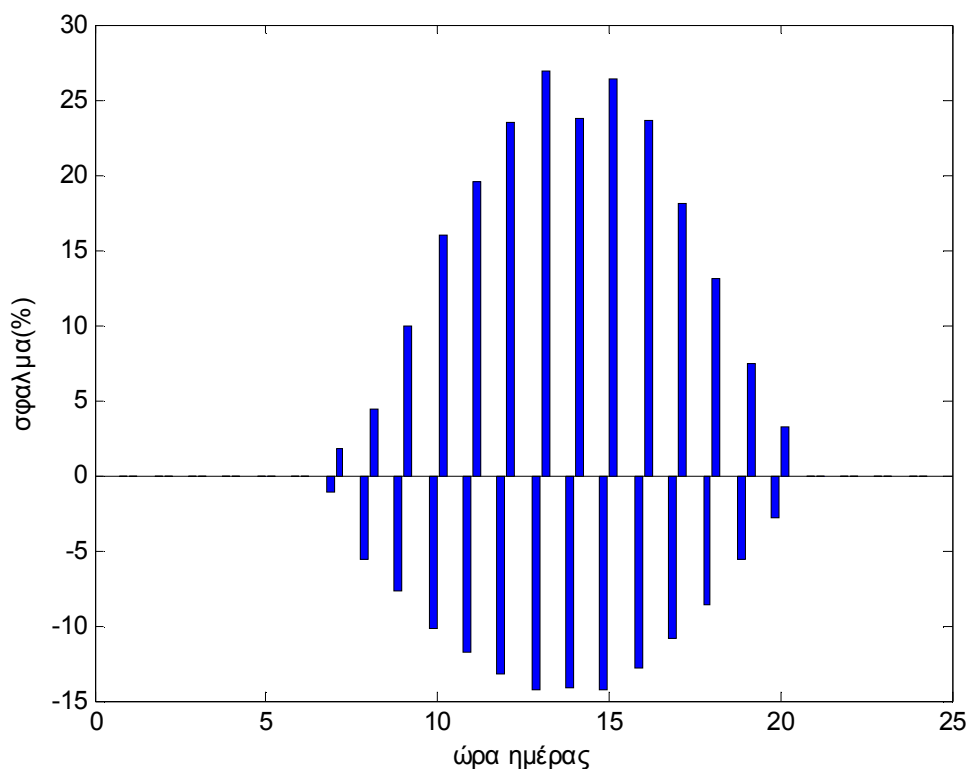
Παρατηρούμε ότι τις νυχτερινές ώρες δεν υπάρχει σφάλμα διότι η παράγωγη είναι 0 κάτι που συμφωνεί και το μοντέλο. Κατά την θερινή περίοδο οι νυχτερινές ώρες είναι 10. Στην θερινή περίοδο η υποεκτίμηση είναι αισθητά πιο έντονη διότι το μοντέλο έχει εκπαιδευτεί για όλο το έτος (συμπεριλαμβανομένων και πιο δυσμενών καιρικών συνθηκών). Επίσης παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά χρονικά στην αιχμή (αιχμή για την θερινή περίοδο έχουμε στις 15:00) αναφέρεται η ώρα πρόβλεψης τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμενόταν, κάτι που παρουσιάζεται στα αμέσως επόμενα σχήματα:



Εικόνα 7.57 MAPE για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη στην θερινή περίοδο



Εικόνα 7.58 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη στην θερινή περίοδο



Εικόνα 7.59 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη στην θερινή περίοδο

Βλέποντας το σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% για κάθε ενδιάμεση ώρα πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα θερινής περιόδου (εικόνα 7.59) παρατηρούμε ότι κατά τις μεσημεριανές ώρες είναι ευρύτερο και προς τα πάνω και προς τα κάτω. Στις 13:00 η ώρα παρατηρείται η μεγαλύτερη υπερεκτίμηση παραγωγής μέχρι και 26.9%, ενώ στις 15:00 η ώρα παρατηρείται η μεγαλύτερη υποεκτίμηση παραγωγής μέχρι και 14.3%

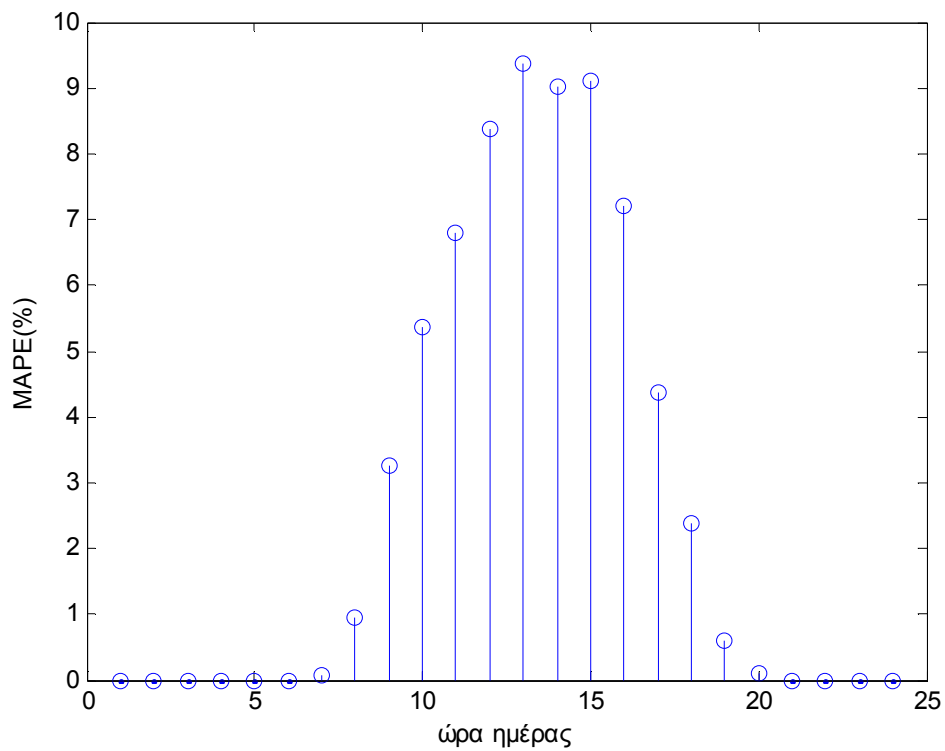
Χειμερινή περίοδος

Το MAPE για το συνολικό 24ωρο παράθυρο είναι 2.79% κατά μέσο όρο, όμως για κάθε ώρα που αναφέρεται η πρόβλεψη το MAPE διαφέρει και τελικά κυμαίνεται μεταξύ των 0 και 9.36%. Πιο αναλυτικά (Πίνακας 7.13):

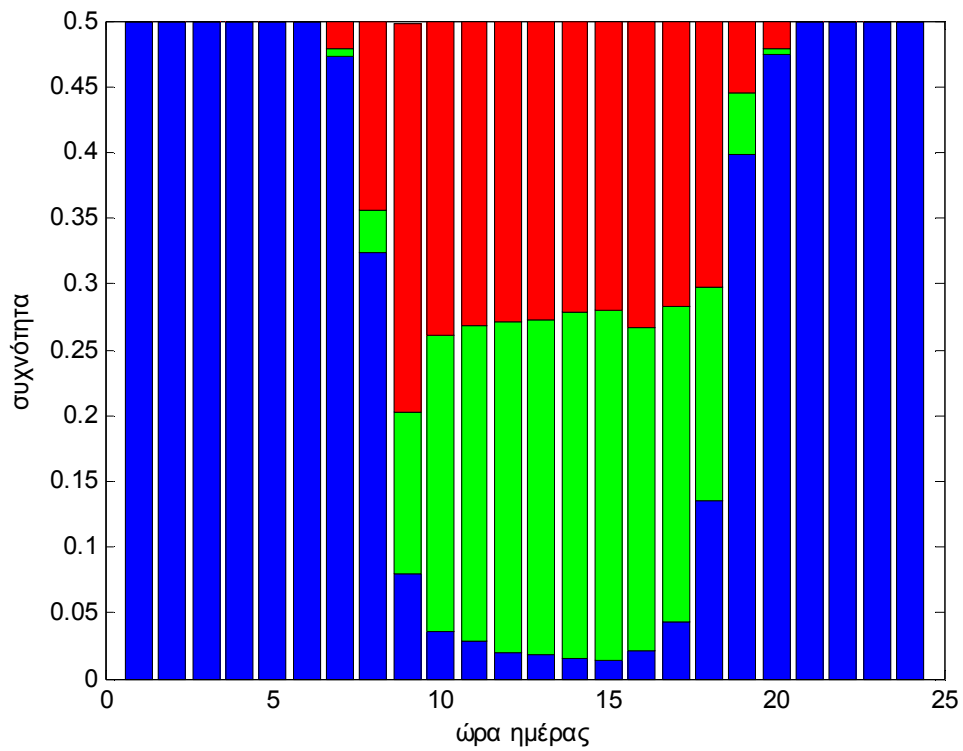
Ωρα Πρόβλεψης	MAPE(%)	Μηδενικό λάθος(%)	Υπερεκτίμηση(%)	Υποεκτίμηση(%)
1	0	100	0	0
2	0	100	0	0
3	0	100	0	0
4	0	100	0	0
5	0	100	0	0
6	0	100	0	0
7	0.09	95	3.9	1.1
8	0.95	65	28.5	6.5
9	3.25	16	59.3	24.7
10	5.36	7.3	47.6	45.1
11	6.79	5.9	46.3	47.8
12	8.38	3.9	45.5	50.6
13	9.36	3.6	45.2	51.2
14	9.03	3.2	44.2	52.6
15	9.12	2.8	43.9	53.3
16	7.21	4.3	46.5	49.2
17	4.36	8.6	43.2	48.2
18	2.39	27.1	40.4	32.5
19	0.60	79.9	10.6	9.5
20	0.11	95.1	4	0.9
21	0	100	0	0
22	0	100	0	0
23	0	100	0	0
24	0	100	0	0

Πινάκας 7.13 MAPE, μηδενικού σφάλματος, υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της παραγωγής για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη στην χειμερινή περίοδο

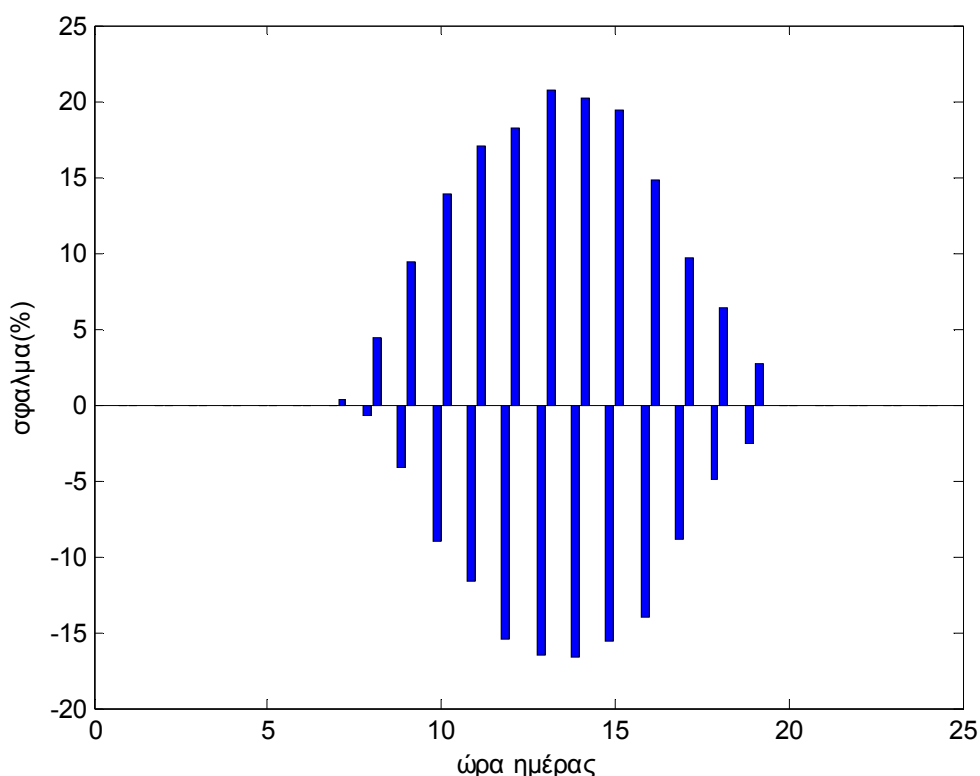
Παρατηρούμε ότι τις νυχτερινές ώρες δεν υπάρχει σφάλμα διότι η παράγωγη είναι 0 κάτι που συμφωνεί και το μοντέλο. Κατά την χειμερινή περίοδο οι νυχτερινές ώρες είναι 14, όχι όμως για όλη τη διάρκεια της, για αυτό και κάποια μικρά σφάλματα στις 7:00 και στις 20:00 (που στην πλειοψηφία της χειμερινής περιόδου δεν έχουμε παραγωγή). Επίσης παρατηρούμε ότι όσο πιο κοντά χρονικά στην αιχμή (αιχμή για την χειμερινή περίοδο έχουμε στις 13:00) αναφέρεται η ώρα πρόβλεψης τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα, όπως άλλωστε αναμενόταν, κάτι που παρουσιάζεται στα αμέσως επόμενα σχήματα:



Εικόνα 7.60 MAPE για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη στην χειμερινή περίοδο



Εικόνα 7.61 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της παραγωγής για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη στην χειμερινή περίοδο



Εικόνα 7.62 Σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% για κάθε ώρα του 24ωρου ορίζοντα που αναφέρεται η πρόβλεψη στην χειμερινή περίοδο

Βλέποντας το σφάλμα εκτίμησης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% για κάθε ενδιάμεση ώρα πρόβλεψης 24ωρου ορίζοντα χειμερινής περιόδου (εικόνα 7.62) παρατηρούμε ότι και πάλι κατά τις μεσημεριανές ώρες είναι ευρύτερο και προς τα πάνω και προς τα κάτω. Στις 13:00 η ώρα παρατηρείται και πάλι η μεγαλύτερη υπερεκτίμηση παραγωγής μέχρι και 20.8%, ενώ στις 14:00 η ώρα παρατηρείται η μεγαλύτερη υποεκτίμηση παραγωγής μέχρι και 16.7%

Το MAPE λοιπόν συνολικά στην χειμερινή περίοδο είναι μικρότερο επειδή και οι ώρες που έχουμε παραγωγή είναι λιγότερες. Όμως για τις ώρες που υπάρχει παραγωγή φαίνεται καθαρά ότι στην θερινή περίοδο το MAPE είναι μικρότερο διότι ο καιρός είναι αρκετά πιο προβλέψιμος, χωρίς απότομες μεταβολές. Βέβαια παρατηρούμε ότι κατά τη θερινή περίοδο παρόλο που υπάρχει μικρότερη τάση υπερεκτίμησης της παραγωγής σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο έχουμε πιο ακραίες υπερεκτιμήσεις παραγωγής. Ομοίως κατά τη χειμερινή περίοδο παρόλο που υπάρχει μικρότερη τάση υποεκτίμησης της παραγωγής σε σχέση με τη θερινή περίοδο έχουμε πιο ακραίες υποεκτιμήσεις παραγωγής.

7.3.4 Συγκεντρωτικά τα σφάλματα πρόβλεψης για τις 2 εποχές και όλο το έτος μαζί

Για να έχουμε μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς του μοντέλου ανά εποχή σε σχέση με το συνολικό έτος δίνουμε τους παρακάτω συγκεντρωτικούς πίνακες. Μπορούμε να δούμε

γρήγορα και να συγκρίνουμε το MAPE και το διάστημα εμπιστοσύνης για κάθε εποχή τους έτους.

	Όλο το έτος	Θερινή περίοδος	Χειμερινή περίοδος
MAE(Watt)	3.59	3.32	3.85
MAPE(%)	1.6	1.5	1.7
Διασπορά(Watt)	7.59	7.26	7.87
μηδενικό σφάλμα(%)	57	54.4	59.5
υπερεκτίμηση(%)	21.3	19.8	22.8
υποεκτίμηση(%)	21.7	25.8	17.7
Διάστημα εμπιστοσύνης 95%(%)	[-4.92 , 5.56]	[-5.07% , 3.94%]	[-4.85% , 6.56%]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90%(%)	[-2.69 , 2.66]	[-2.68% , 1.71%]	[-2.07% , 4.02%]

Πινάκας 7.14 Συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων επόμενης ώρας

	Όλο το έτος	Θερινή περίοδος	Χειμερινή περίοδος
MAE(Watt)	4.92	4.75	5.09
MAPE(%)	2.2	2.1	2.3
Διασπορά(Watt)	10.39	10.45	10.32
μηδενικό σφάλμα(%)	56	53.2	58.8
υπερεκτίμηση(%)	19.4	16.1	22.7
υποεκτίμηση(%)	24.6	30.7	18.5
Διάστημα εμπιστοσύνης 95%(%)	[-6.32 , 7.86]	[-5.98 , 6.53]	[-4.93 , 8.48]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90%(%)	[-3.87 , 3.68]	[-4.04 , 1.88]	[-2.49 , 4.79]

Πινάκας 7.15 Συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων για πρόβλεψη 6ωρου ορίζοντα

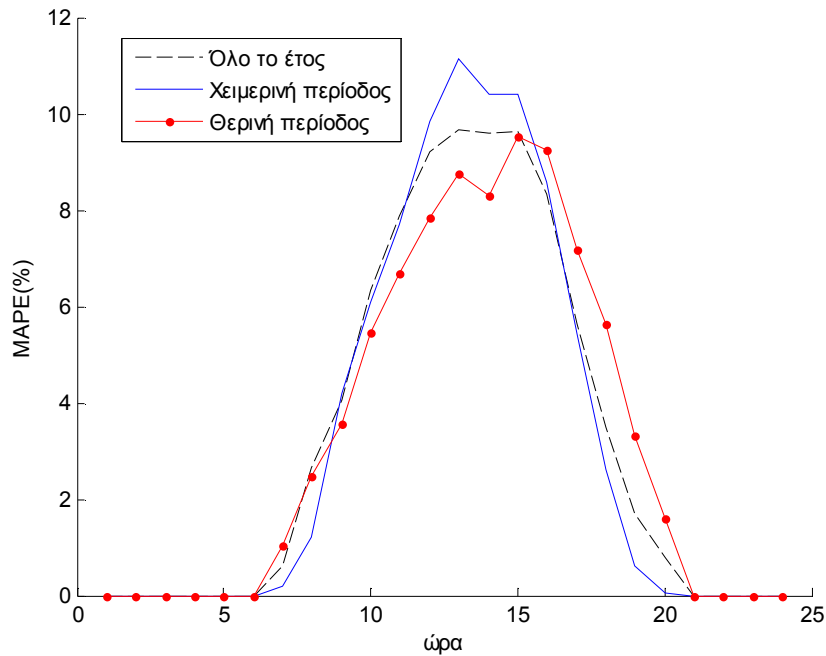
	Όλο το έτος	Θερινή περίοδος	Χειμερινή περίοδος
MAE(Watt)	6.30	6.32	6.28
MAPE(%)	2.8	2.8	2.8
Διασπορά(Watt)	13.36	13.97	12.72
μηδενικό σφάλμα(%)	55.1	53.1	59.1
υπερεκτίμηση(%)	19.2	17.3	19.7
υποεκτίμηση(%)	25.7	29.6	21.2
Διάστημα εμπιστοσύνης 95%(%)	[-8.12 , 10.36]	[-7.40 , 9.71]	[-8.89 , 10.69]
Διάστημα εμπιστοσύνης 90%(%)	[-4.87 , 4.46]	[-4.83 , 2.64]	[-4.93 , 5.72]

Πινάκας 7.16 Συγκεντρωτικός πίνακας σφαλμάτων για πρόβλεψη 24ωρου ορίζοντα

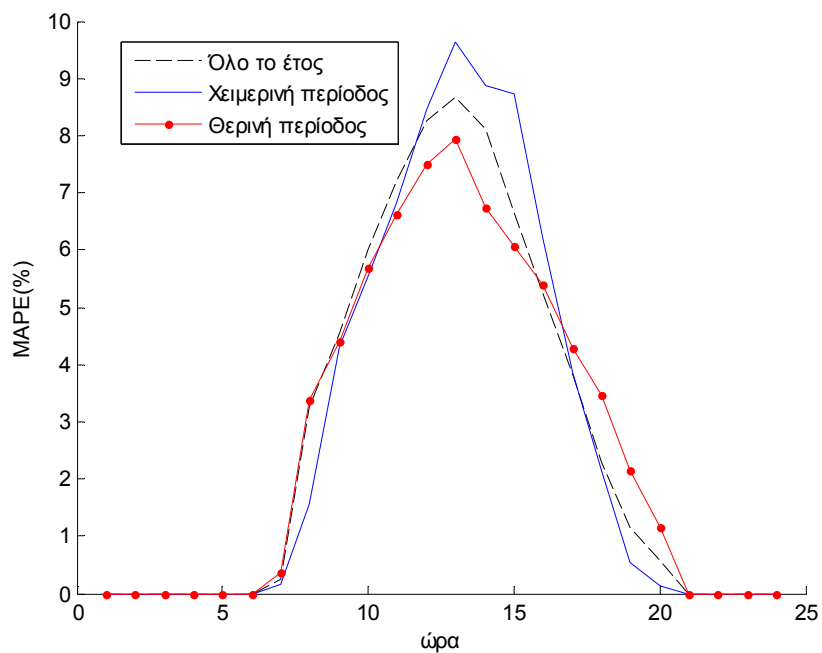
Όπως μπορούμε να δούμε στους πίνακες το MAPE τη χειμερινή περίοδο είναι μεγαλύτερο από τη θερινή και από το συνολικό για το έτος, διότι το χειμώνα ο καιρός είναι πιο ασταθής, οπότε και δυσκολότερη πρόβλεψη των μετεωρολογικών δεδομένων. Ακόμη φαίνεται ότι το διάστημα εμπιστοσύνης σφαλμάτων για τη θερινή περίοδο είναι αρκετά πιο στενό σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο και στενότερο σε σχέση και με το συνολικό για όλο το έτος. Εξαιρέση στα δύο παραπάνω φαίνεται να αποτελεί η πρόβλεψη επόμενης ώρας. Στη χειμερινή περίοδο το MAPE είναι μεγαλύτερο και το διάστημα εμπιστοσύνης λίγο πιο ευρύ αλλά πολύ λίγο για να είναι άξιο να αναφερθεί ως χειρότερο. Τέλος βλέπουμε στη χειμερινή περίοδο ότι έχουμε πιο πολλά μηδενικά σφάλματα διότι είναι και πιο πολλές οι ώρες χωρίς παραγωγή, και γενικά τη χειμερινή περίοδο υπάρχει μια τάση υπερεκτίμησης της παραγωγής, ενώ τη θερινή περίοδο υπάρχει μια τάση υποεκτίμησης της παραγωγής. Αυτό διότι τη

χειμερινή περίοδο τα ΤΝΔ πρόβλεψης μετεωρολογικών δεδομένων είναι «επηηρεασμένα» από δείγματα της θερινής περιόδου και αντίστοιχα για τη θερινή περίοδο είναι «επηηρεασμένα» από τα δείγματα χειμερινής περιόδου.

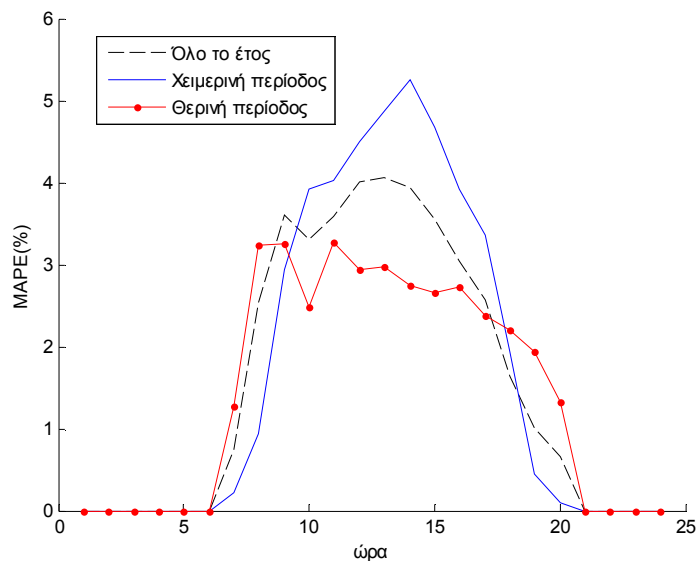
Ας δούμε και το γράφημα με τα MAPE για κάθε ώρα της ημέρας για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης χωριστά:



Εικόνα 7.63 MAPE 24ωρου ορίζοντα πρόβλεψης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας για όλο το έτος, τη θερινή περίοδο και τη χειμερινή περίοδο



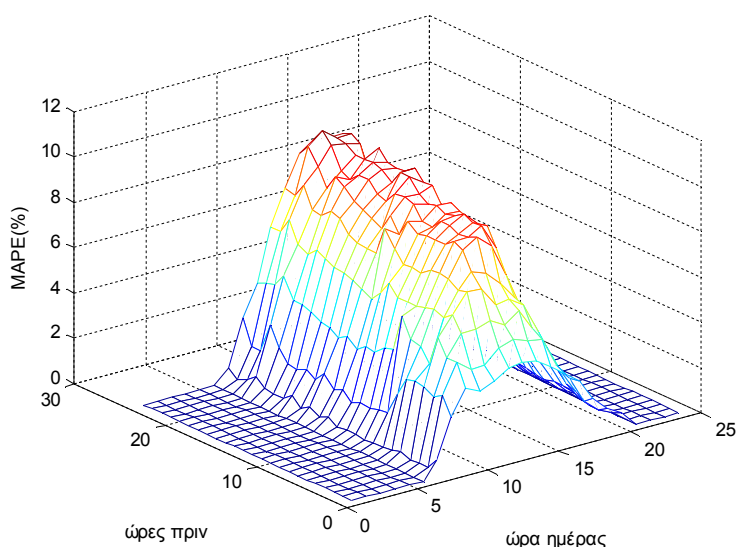
Εικόνα 7.64 MAPE 6ωρου ορίζοντα πρόβλεψης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας για όλο το έτος, τη θερινή περίοδο και τη χειμερινή περίοδο



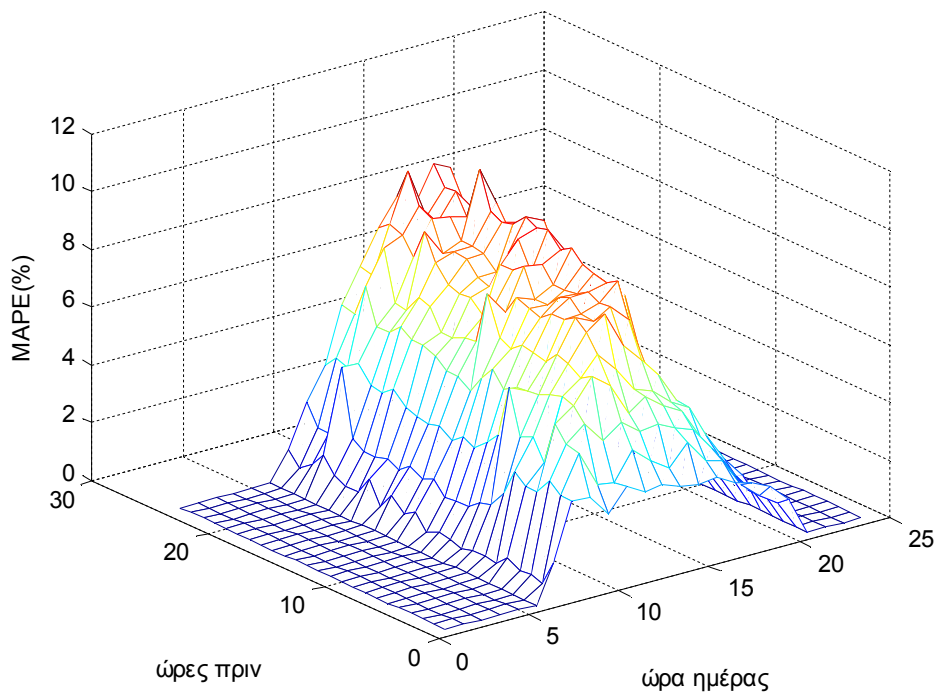
Εικόνα 7.65 MAPE πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας για κάθε ώρα της ημέρας για όλο το έτος, τη θερινή περίοδο και τη χειμερινή περίοδο

Στα σχήματα αυτά διαπιστώνουμε ότι τελικά ακόμα και στην πρόβλεψη επόμενης ώρας τη χειμερινή περίοδο τα σφάλματα είναι αρκετά μεγαλύτερα τις ώρες αιχμής ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με τη θερινή περίοδο, κάτι που παραπλανηθήκαμε λίγο από τον πίνακα που δείχνει το μέσο όρο για όλες τις ώρες. Βλέπουμε επίσης ότι για προβλέψεις που αφορούν τις πρώτες πρωινές ώρες(μέχρι τις 9) και τις τελευταίες βραδινές ώρες(μετά τις 17) κατά τη θερινή περίοδο το MAPE είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τη χειμερινή, διότι κατά τη χειμερινή περίοδο η παραγωγή είναι πολύ μικρή έως και μηδέν. Στις ώρες αιχμής της ηλιακής ακτινοβολίας(12-16) κατά τη θερινή περίοδο, που ο καιρός είναι πιο σταθερός, έχουμε αισθητά καλύτερο MAPE.

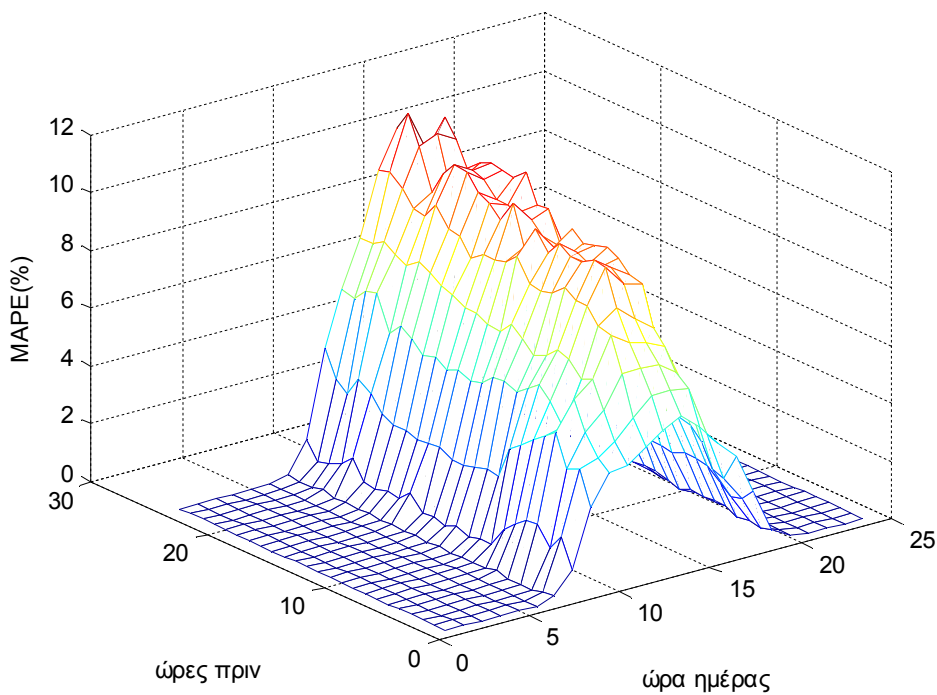
Ενδιαφέρουσα πληροφορία μπορούν μας παρέχουν οι ιστοί εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας και για κάθε ώρα πριν που έγινε η εκτίμηση (Εικόνα 7.63-7.65) :



Εικόνα 7.66 MAPE εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας και για κάθε ώρα πριν που έγινε η εκτίμηση για όλο το έτος συνολικά



Εικόνα 7.67 MAPE εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας και για κάθε ώρα πριν που έγινε η εκτίμηση για τη θερινή περίοδο



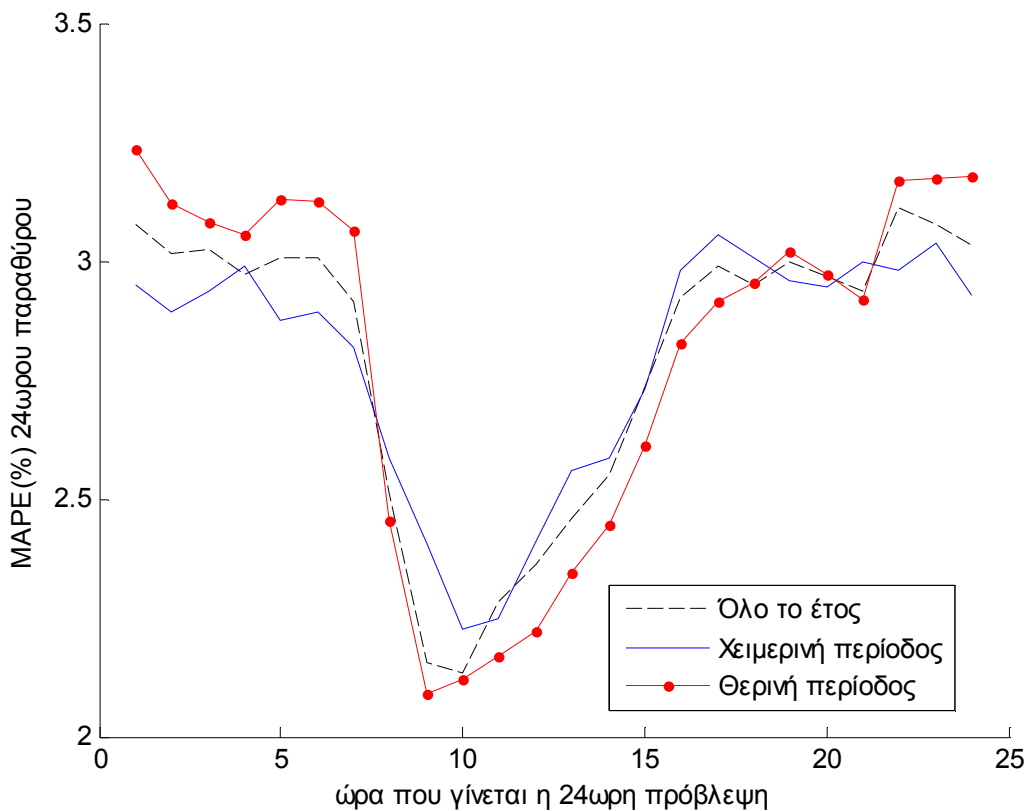
Εικόνα 7.68 MAPE εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας και για κάθε ώρα πριν που έγινε η εκτίμηση για τη χειμερινή περίοδο

Ας συγκρίνουμε τώρα τη συμπεριφορά του μοντέλου για κάθε ώρα που κάνουμε πρόβλεψη για τον επόμενο 24ωρο ορίζοντα:

Ωρα που έγινε η πρόβλεψη	MAPE(%) για όλο το έτος συνολικά	MAPE(%) για τη θερινή περίοδο	MAPE(%) για τη χειμερινή περίοδο
1	3.0779	3.2345	2.9503
2	3.0174	3.1217	2.8926
3	3.0246	3.0826	2.9351
4	2.9697	3.0531	2.9903
5	3.0081	3.1306	2.8750
6	3.0072	3.1238	2.8937
7	2.9162	3.0643	2.8196
8	2.5125	2.4526	2.5859
9	2.1538	2.0898	2.4058
10	2.1345	2.1189	2.2272
11	2.2811	2.1703	2.2486
12	2.3633	2.2233	2.4115
13	2.4571	2.3431	2.5595
14	2.5495	2.4433	2.5868
15	2.7327	2.6123	2.7295
16	2.9212	2.8263	2.9795
17	2.9885	2.9144	3.0553
18	2.9500	2.9540	3.0050
19	2.9970	3.0209	2.9565
20	2.9672	2.9728	2.9471
21	2.9373	2.9208	2.9959
22	3.1135	3.1677	2.9814
23	3.0768	3.1731	3.0380
24	3.0311	3.1781	2.9275

Πίνακας 7.17 MAPE 24ωρου ορίζοντα εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας που έγινε η εκτίμηση

Ο παραπάνω πίνακας μπορεί να δοθεί και σχηματικά ως εξής:



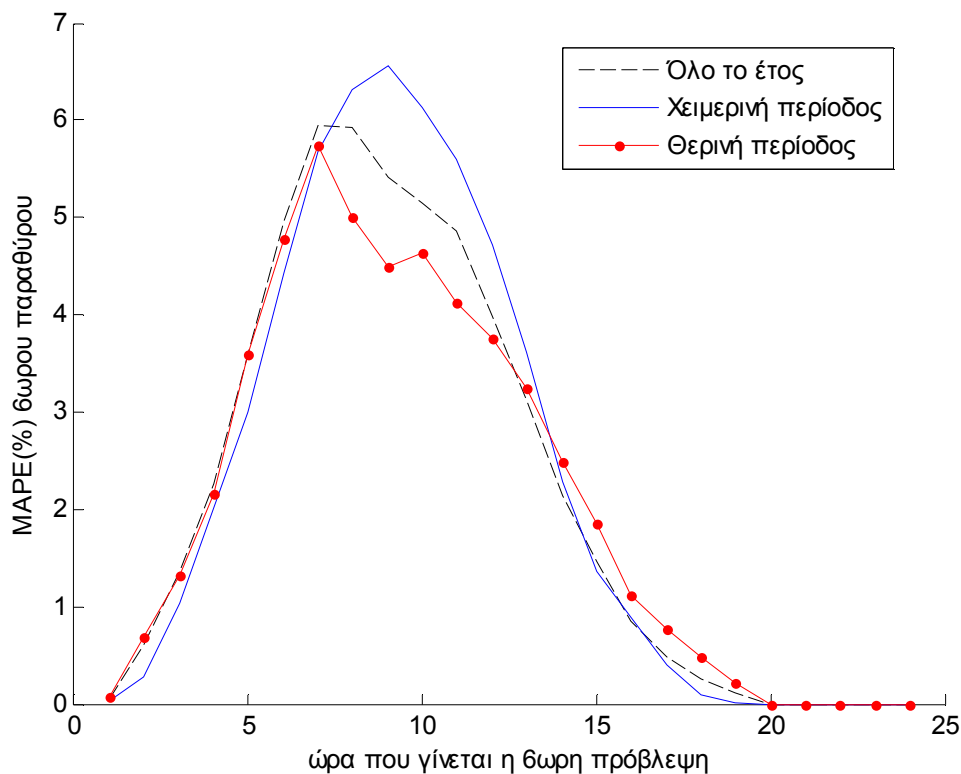
Εικόνα 7.69 MAPE 24ωρου ορίζοντα εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας που έγινε η εκτίμηση

Συνολικά για όλο το έτος, όπως είχε αναφερθεί η καλύτερη πρόβλεψη επόμενου 24ωρου ορίζοντα γίνεται στις 10 το πρωί. Ομοίως και στη χειμερινή περίοδο γίνεται στις 10 το πρωί, ενώ στη θερινή περίοδο γίνεται στις 9 το πρωί. Συνολικά βλέπουμε ότι κατά τη διάρκεια της μέρας στη θερινή περίοδο κάνουμε καλύτερες προβλέψεις επόμενου 24ωρου ορίζοντα σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο, όμως κατά τις βραδινές ώρες συμβαίνει το αντίθετο!

Ας συγκρίνουμε τώρα τη συμπεριφορά του μοντέλου για κάθε ώρα που κάνουμε πρόβλεψη για τον επόμενο 6ωρο ορίζοντα:

Ωρα που έγινε η πρόβλεψη	MAPE(%) για όλο το έτος συνολικά	MAPE(%) για τη θερινή περίοδο	MAPE(%) για τη χειμερινή περίοδο
1	0.04	0.0616	0.0262
2	0.61	0.6822	0.2695
3	1.36	1.3114	1.0340
4	2.25	2.1545	2.0211
5	3.60	3.6022	3.0048
6	4.96	4.7825	4.4287
7	5.95	5.7329	5.6734
8	5.92	5.0142	6.3129
9	5.41	4.4972	6.5535
10	5.14	4.6273	6.1351
11	4.86	4.1304	5.5886
12	3.99	3.7648	4.7079
13	3.12	3.2384	3.6180
14	2.14	2.4818	2.2796
15	1.45	1.8620	1.3513
16	0.86	1.1211	0.8879
17	0.48	0.7626	0.3968
18	0.25	0.4820	0.0972
19	0.11	0.2214	0.0161
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	0	0

Πίνακας 7.18 MAPE βωρου ορίζοντα εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας που έγινε η εκτίμηση



Εικόνα 7.70 MAPE 6ωρου ορίζοντα εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας που έγινε η εκτίμηση

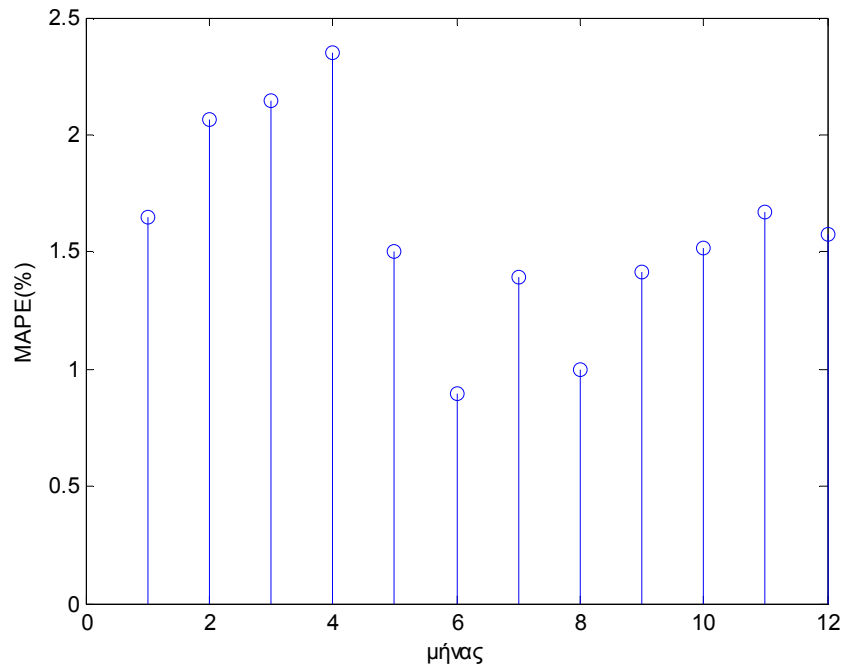
Συνολικά για όλο το έτος, όπως είχε αναφερθεί η χειρότερη πρόβλεψη επόμενου 6ωρου ορίζοντα γίνεται στις 7 το πρωί. Ομοίως και στη θερινή περίοδο γίνεται στις 7 το πρωί, ενώ στη χειμερινή περίοδο γίνεται στις 9 το πρωί. Η πρόβλεψη επόμενου 6ωρου ορίζοντα είναι γενικά καλύτερη τη θερινή περίοδο στις ώρες αιχμής της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι λίγο χειρότερη τις υπόλοιπες ώρες.

7.4 Σφάλματα Πρόβλεψης για τους 12 Μήνες του Έτους

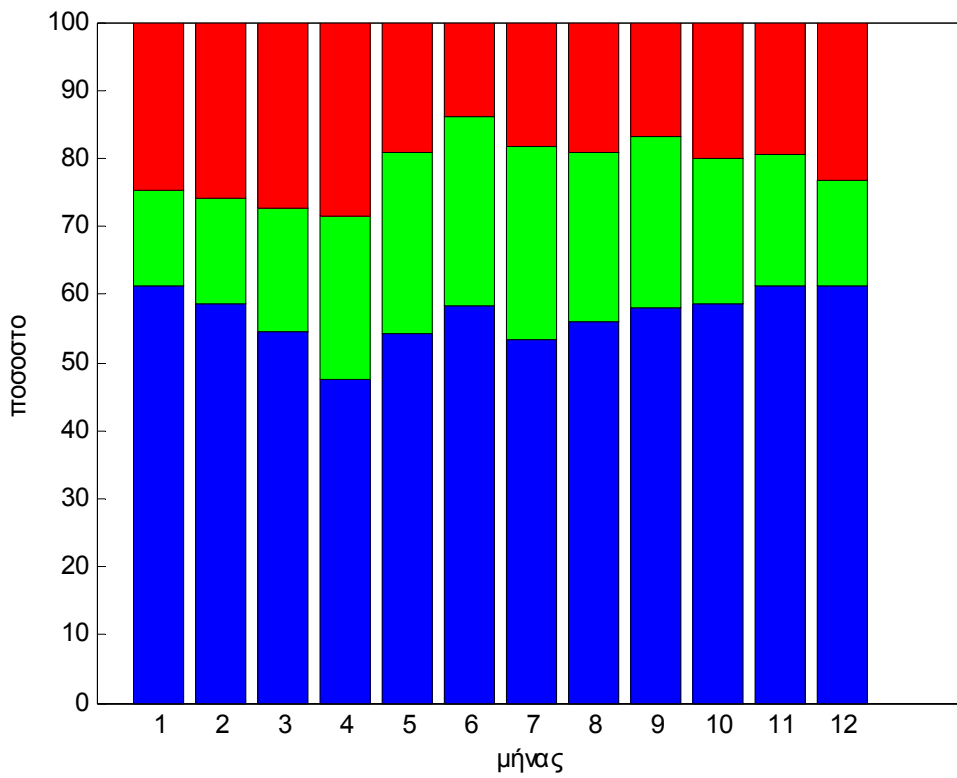
Σε τρίτο επίπεδο εξετάζεται πως συμπεριφέρεται το μοντέλο χωριστά για κάθε μήνα του έτους. Κάθε μήνας έχει διαφορετικές ώρες με ηλιοφάνεια και διαφορετική δυσκολία πρόβλεψης των μετεωρολογικών δεδομένων. Αναλυτική παρουσίαση για κάθε μήνα θεωρήσαμε περιττό να κάνουμε διότι μας ενδιαφέρει να δούμε συγκριτικά σε όλους τους μήνες πως συμπεριφέρεται το μοντέλο. Θα παρουσιάσουμε για επόμενη ώρα, παράθυρο 6 και 24 ωρών.

7.4.1 Σφάλματα Πρόβλεψης Επόμενης Ώρας

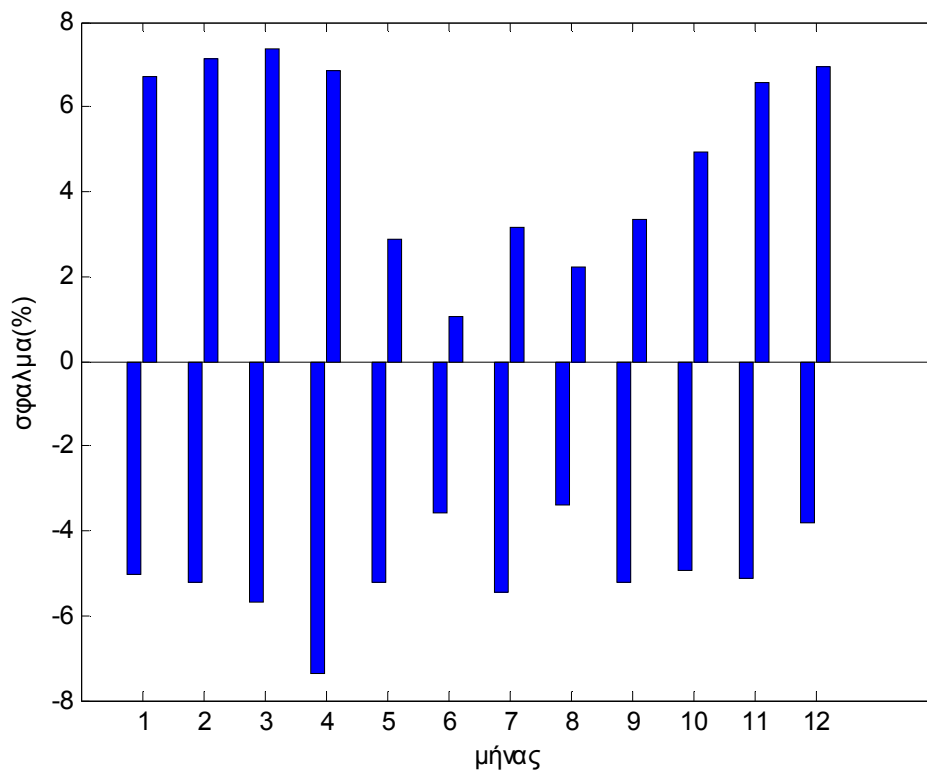
Αρχικά παρουσιάζεται MAPE (εικόνα 7.71), το μηδενικό σφάλμα/υπερεκτίμηση/υποεκτίμηση (εικόνα 7.72) και το διάστημα εμπιστοσύνης 95% (εικόνα 7.73) για όλους τους μήνες σε κοινό σχήμα για την πρόβλεψη επόμενης ώρας.



Εικόνα 7.71 ΜΑΡΕ πρόβλεψης επόμενης ώρας για κάθε μήνα του έτους



Εικόνα 7.72 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας για κάθε μήνα του έτους

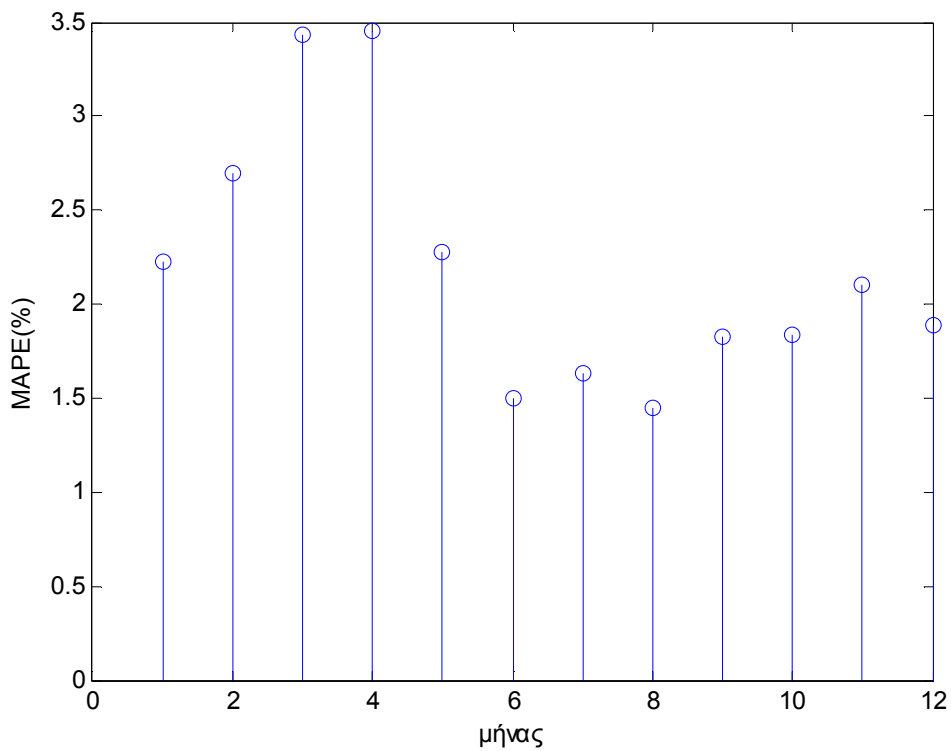


Εικόνα 7.73 Σφάλμα πρόβλεψης παραγωγής επόμενης ώρας για το διάστημα εμπιστοσύνης 95% κάθε μήνα του έτους

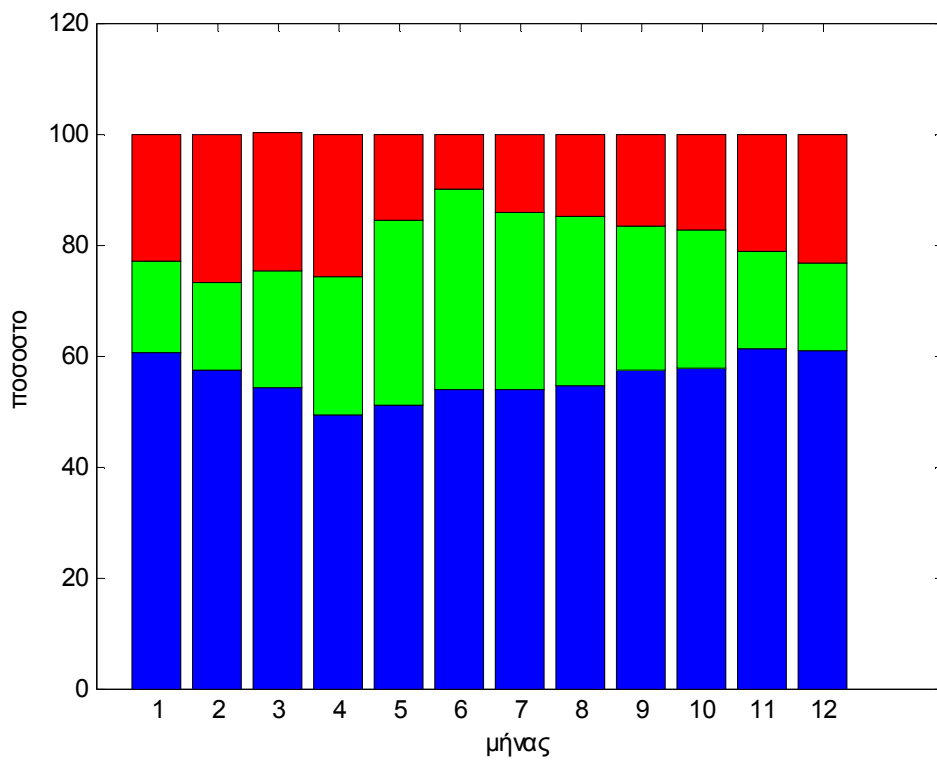
Η πρόβλεψη παραγωγής επόμενης ώρας για τον Ιούνιο είναι πιο αξιόπιστη, παρουσιάζοντας το μικρότερο MAPE και σφάλμα με το στενότερο διάστημα εμπιστοσύνης. Για τον Μάιο μέχρι και Σεπτέμβριο είναι καλύτερη σε σχέση με το υπόλοιπο έτος. Απεναντίας ο Απρίλιος φαίνεται να είναι ο πιο ασταθής μήνας για την πρόβλεψη παραγωγής επόμενης ώρας, έχοντας και μεγαλύτερο MAPE και ευρύτερο διάστημα εμπιστοσύνης.

7.4.2 Σφάλματα Πρόβλεψης βωρου ορίζοντα

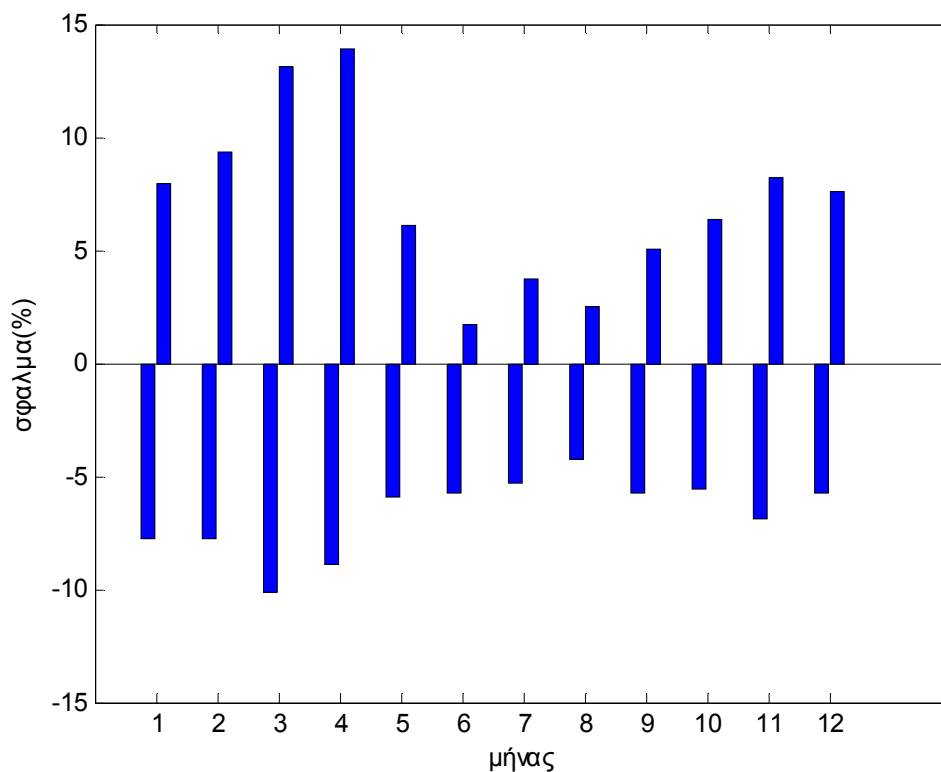
Σε δεύτερη φάση ας δούμε το MAPE (εικόνα 7.74), το μηδενικό σφάλμα/υπερεκτίμηση/υποεκτίμηση (εικόνα 7.75) και το διάστημα εμπιστοσύνης 95% (εικόνα 7.76) για όλους τους μήνες σε κοινό σχήμα για την πρόβλεψη βωρου ορίζοντα.



Εικόνα 7.74 MAPE πρόβλεψης παραγωγής δωρου ορίζοντα για κάθε μήνα του έτους



Εικόνα 7.75 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της πρόβλεψης παραγωγής δωρου ορίζοντα για κάθε μήνα του έτους

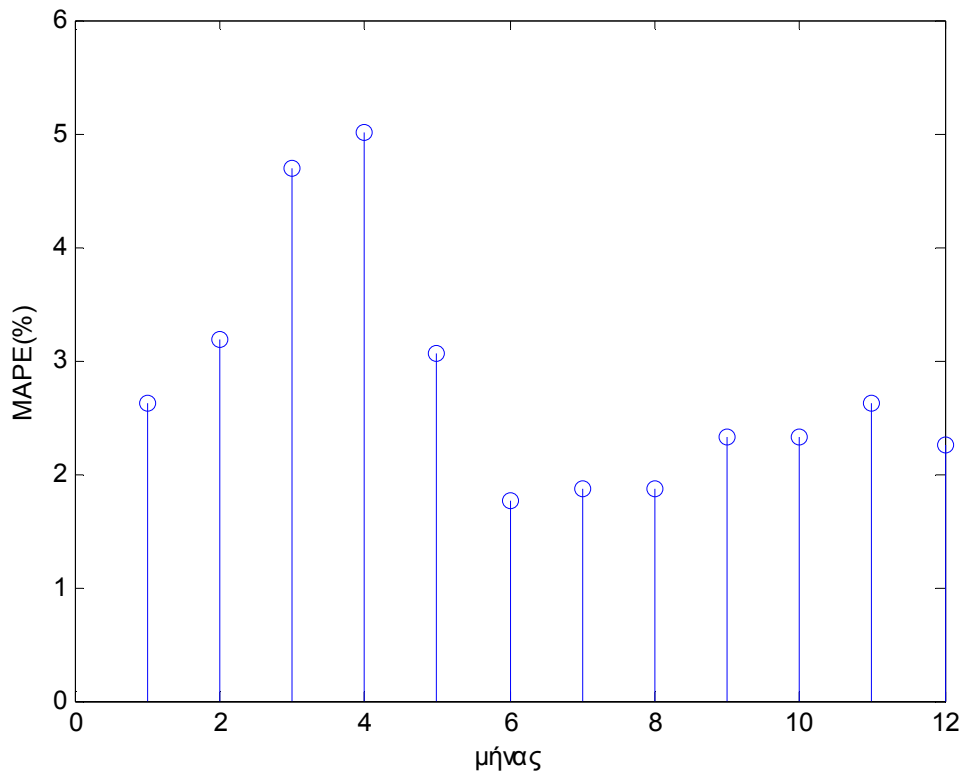


Εικόνα 7.76 Σφάλμα πρόβλεψης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% 6ωρου ορίζοντα για κάθε μήνα του έτους

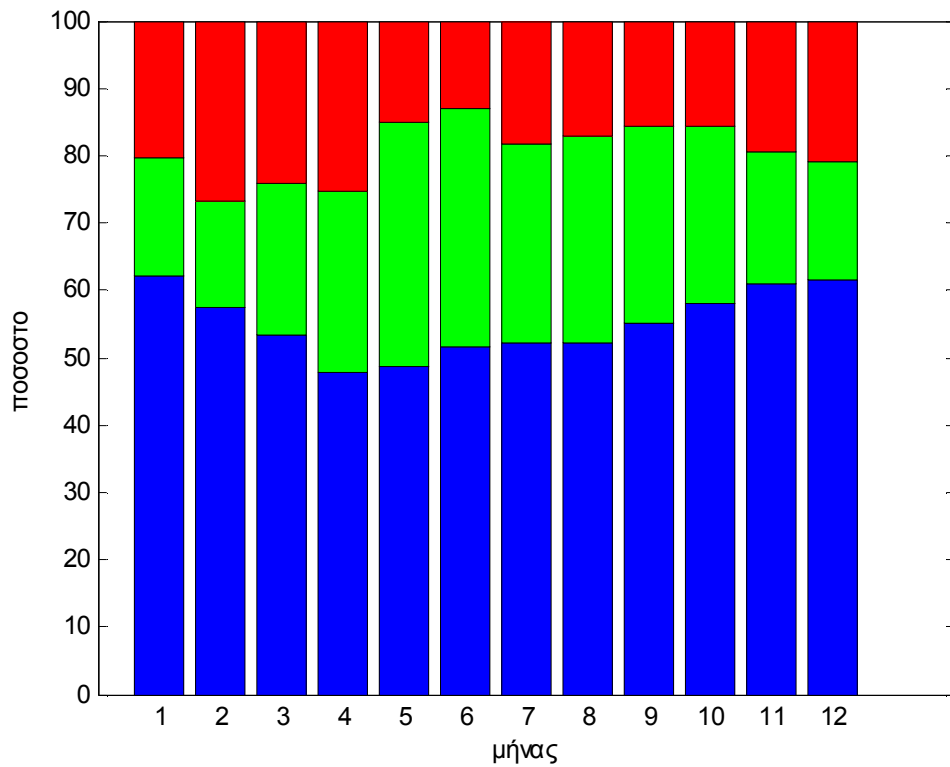
Η πρόβλεψη 6ωρου ορίζοντα παραγωγής φαίνεται να είναι εξίσου καλή και αξιόπιστη και για τους 3 καλοκαιρινούς μήνες, ξεχωρίζοντας εκείνη του Ιουνίου. Για τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο φαίνεται επίσης καλύτερη σε σχέση με το υπόλοιπο έτος. Εκτός από τον Απρίλιο, που ήταν ο μήνας που ξεχώριζε για την αστάθεια πρόβλεψης, στον 6ωρο ορίζοντα πρόβλεψης πολύ ασταθής φαίνεται να είναι και ο Μάρτιος.

7.4.3 Σφάλματα Πρόβλεψης 24ωρου

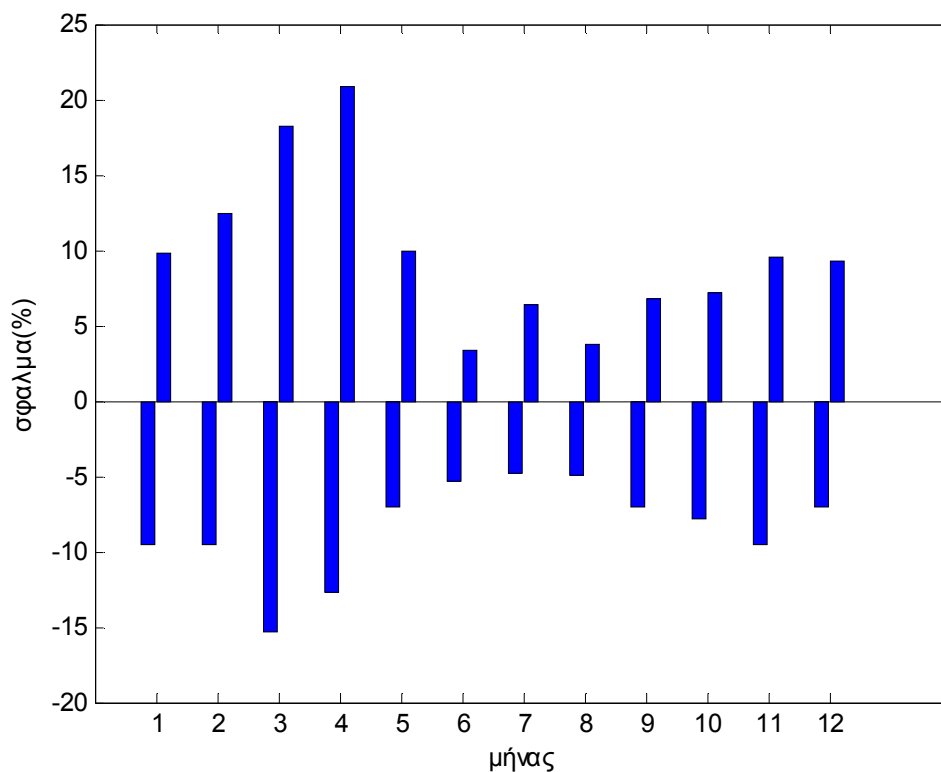
Σε τρίτη φάση ας δούμε το MAPE (εικόνα 7.77), το μηδενικό σφάλμα/υπερεκτίμηση/υποεκτίμηση (εικόνα 7.78) και το διάστημα εμπιστοσύνης 95% (εικόνα 7.79) για όλους τους μήνες σε κοινό σχήμα για την πρόβλεψη 24ωρου ορίζοντα.



Εικόνα 7.77 MAPE πρόβλεψης παραγωγής 24ωρου ορίζοντα για κάθε μήνα του έτους



Εικόνα 7.78 Κατανομή μηδενικού σφάλματος(μπλε), υπερεκτίμησης(κόκκινο) και υποεκτίμησης (πράσινο) της πρόβλεψης παραγωγής 24ωρου ορίζοντα για κάθε μήνα του έτους

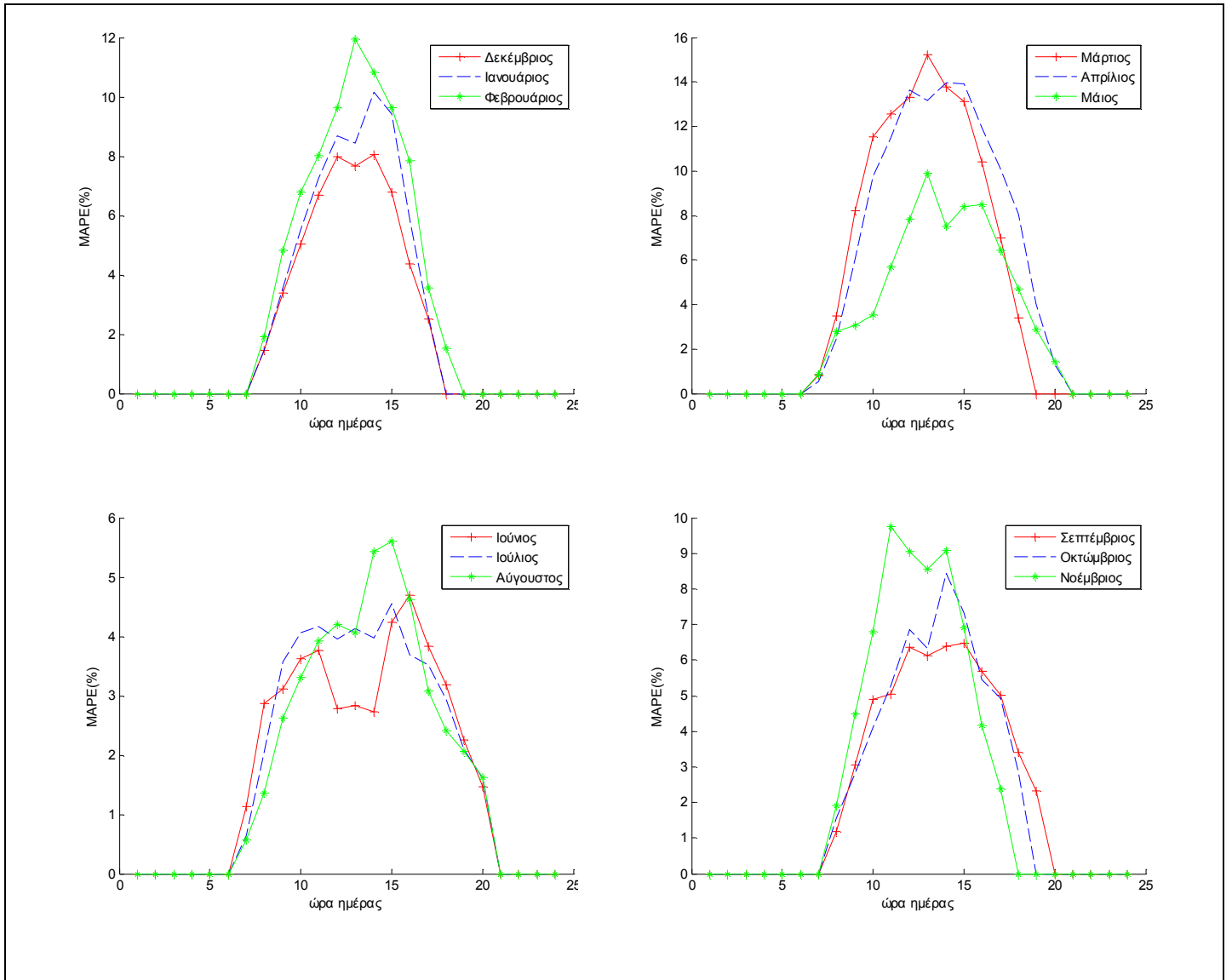


Εικόνα 7.79 Σφάλμα πρόβλεψης παραγωγής στο διάστημα εμπιστοσύνης 95% 24ωρου ορίζοντα για κάθε μήνα του έτους

Η πρόβλεψη 24ωρου ορίζοντα παραγωγής είναι όπως είναι και του 6ωρου. Την ίδια συμπεριφορά που είχαν οι μήνες έχουν και εδώ. Η πρόβλεψη φαίνεται να είναι εξίσου καλή και αξιόπιστη και για τους 3 καλοκαιρινούς μήνες. Για τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο φαίνεται επίσης καλύτερη σε σχέση με το υπόλοιπο έτος. Πολύ ασταθής πρόβλεψη φαίνεται να έχει και ο Μάρτιος και ο Απρίλιος. Από την ανά μήνα κατανομή των σφαλμάτων πρόβλεψης παραγωγής 6ωρου και 24ωρου ορίζοντα (MAPE και διαστήματα εμπιστοσύνης) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο είναι ευσταθέστερο την περίοδο που γενικά έχουμε μεγαλύτερη παραγωγή.

Από την εικόνα 7.79, οι πιο αξιόπιστοι μήνες είναι οι 3 μήνες του καλοκαιριού με σταθερότερο τον Ιούνιο που το διάστημα εμπιστοσύνης του 95% έχει εύρος 8,7% (μέχρι 5,3% υποεκτίμηση και μέχρι 3,4% υπερεκτίμηση). Αντίθετα τον Απρίλιο και το Μάρτιο το διάστημα εμπιστοσύνης του 95% έχει εύρος 33,5%. Η υπερεκτίμηση τον Απρίλιο φτάνει το 20,8%, ενώ η υποεκτίμηση τον Μάρτιο φτάνει το 15,3%. Άρα και οι δυο μήνες χαρακτηρίζονται και από τη μικρότερη αξιοπιστία στην πρόβλεψη.

Γενικά τους 3 καλοκαιρινούς μήνες η πρόβλεψη φαίνεται να είναι αξιόπιστη και από άποψη MAPE και από άποψη διαστήματος εμπιστοσύνης. Τον Απρίλιο και το Μάρτιο η πρόβλεψη είναι λιγότερο αξιόπιστη και για αυτό χαλάσει η συνολική αξιοπιστία (διάστημα εμπιστοσύνης) της θερινής περιόδου, όπως είδαμε στην εικόνα 7.59. Το MAPE για κάθε ώρα και κάθε μήνα του έτους απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα 7.80. Πάλι τον Μάρτιο παρατηρούμε το μέγιστο MAPE στις 13:00 ίσο με 15,2% ενώ τον Ιούνιο παρατηρούμε το ελάχιστο MAPE, με μέγιστη τιμή το 4,7% στις 16:00.



Εικόνα 7.80 MAPE πρόβλεψης 24ωρου παραθύρου για κάθε ώρα της ημέρας ανά μήνα με τους μήνες κάθε εποχής ανά διάγραμμα

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, στόχος της, ήταν η όσο το δυνατόν αποδοτικότερη πρόβλεψη της ωριαίας παραγωγής Φ/Β για ορίζοντα 6 και 24 ωρών. Η πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής είναι απαραίτητη στον προγραμματισμό λειτουργίας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Τα προηγούμενα χρόνια, η πρόβλεψη ίσως ήταν λιγότερο σημαντική, διότι η εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς ήταν αμελητέο ποσοστό της συνολικής. Όμως στις μέρες μας παρουσιάζεται σημαντική αύξηση των Φ/Β σταθμών παραγωγής ενέργειας (7.3% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στο ΣΗΕ της υπηρετικής Ελλάδας και το 6.9% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στο μη συνδεδεμένο ΣΗΕ Κρήτης). Πρακτική εφαρμογή της εργασίας αυτής λοιπόν, μπορεί να γίνει τόσο από τους διαχειριστές των ΣΗΕ και ειδικά για μικρά ΣΗΕ με υψηλή διείσδυση Φ/Β, όσο και από τους κατόχους Φ/Β πάρκων σε περίπτωση υποβολής προσφορών στην αγορά ηλεκτρισμού.

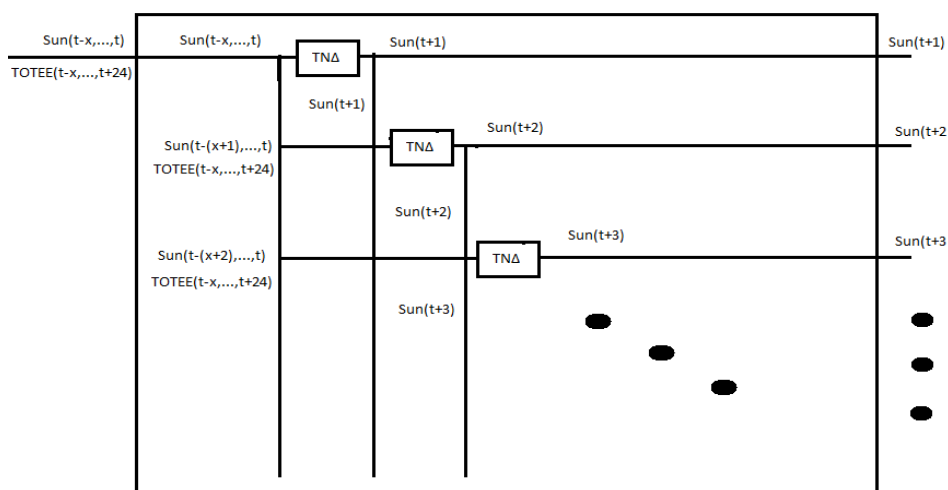
Για την υλοποίηση του μοντέλου πρόβλεψης παραγωγής αρχικά απαιτείται ένα μαθηματικό μοντέλο ενεργειακής παραγωγής Φ/Β στοιχείων. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά μοντέλα εκτίμησης της ενεργειακής παραγωγής Φ/Β. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το μοντέλου που αναπτύχθηκε στα Sandia National Laboratories (περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 4.2). Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε επειδή παίρνει σαν εισόδους ωριαίες τιμές έντασης ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ωριαίων τιμών παραπάνω παραμέτρων, από μετρήσεις για ολόκληρο το 2003 στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Το μοντέλο αυτό επίσης απαιτεί τη γνώση συντελεστών που προκύπτουν από τα ηλεκτρικά, θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά του πλαισίου, του οποίου θα προσομοιωθεί η παραγωγή, δεδομένα που παρέχονται από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή. Επιλέχθηκε ένα πλαίσιο από την ελληνική εταιρία Excel Group, το ESP series60 poly 225W. Εισάγαμε στο μοντέλο της Sandia National Laboratories τους συντελεστές που προκύπτουν από τα δικά του χαρακτηριστικά, όπως μας τα δίνει η κατασκευάστρια εταιρία (αναλυτικότερα στην ενότητα 4.4). Το μοντέλο μας είναι σε θέση να υπολογίσει την παραγωγή του ESP series60 poly 225W με δεδομένες τιμές έντασης ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου. Όμως εμείς υλοποιούμε πρόβλεψη σε μελλοντικές ώρες, οπότε δεν μπορούμε να έχουμε μετρήσεις των τιμών αυτών.

Η πρόβλεψη της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας δεν απαιτεί την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και της ταχύτητας ανέμου και είναι η κυριότερη παράμετρος που επηρεάζει την πρόβλεψη της παραγωγής του Φ/Β. Στην απλούστερη περίπτωση θα μπορούσαν να θεωρηθούν τιμές της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου στα NOCT επίπεδα καθώς η επίδραση τους είναι μικρή (ενότητα 4.2.7 και 4.2.8). Για να έχουμε περισσότερο ακριβή αποτελέσματα πρόβλεψης της παραγωγής, απαιτείται πρόβλεψη για τις ωριαίες τιμές του επόμενου 24ωρου, για κάθε μετεωρολογικό δεδομένο χωριστά. Δόθηκε διαφορετική βαρύτητα σε καθένα από αυτά, ανάλογα με την συνεισφορά του στην εκτίμηση της παραγωγής.

Η πρόβλεψη των 24 αυτών τιμών, για κάθε ένα από τα μετεωρολογικά δεδομένα, έγινε με χρήση μιας ομάδας 24 ΤΝΔ (η θεωρία των οποίων περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5), συγκεκριμένα με κλειστού βρόγχου μη-γραμμικά αυτοπαλίνδρομα νευρωνικά δίκτυα(ενότητα 6.2.2). Άρα συνολικά έχουμε κάνει χρήση 72 ΤΝΔ. Η υλοποίηση και εκπαίδευση των ΤΝΔ έγινε σε MATLAB script, αρχικά με τη βοήθεια του Neural Network Toolbox Ixiii και στη συνέχεια με χρήση script, για περισσότερη ευελιξία επιλογών. Στην πρόβλεψη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας έγιναν περισσότερες δοκιμές, διότι η Φ/Β παράγωγη εξαρτάται κυρίως από αυτήν, σε αντίθεση με την θερμοκρασία και την ταχύτητα

του άνεμου. Για την εκπαίδευση όλων των ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκαν οι διαθέσιμες χρονοσειρές των μετεωρολογικών δεδομένων, όμως για την εκπαίδευση των ΤΝΔ, εκτίμησης τιμής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον 2 είσοδοι (1. χρονοσειρές ωριαίων τιμών μέσης ημερήσιας έντασης ακτινοβολίας που προκύπτουν από τη μέση μηνιαία ηλιοφάνεια της περιοχής των Χανίων σύμφωνα με τα στοιχεία της TOTEE 20701-3/2010xii και 2. χρονοσειρές με τις ώρες στις οποίες αντιστοιχούν οι τιμές των δεδομένων και προβλέψεων).

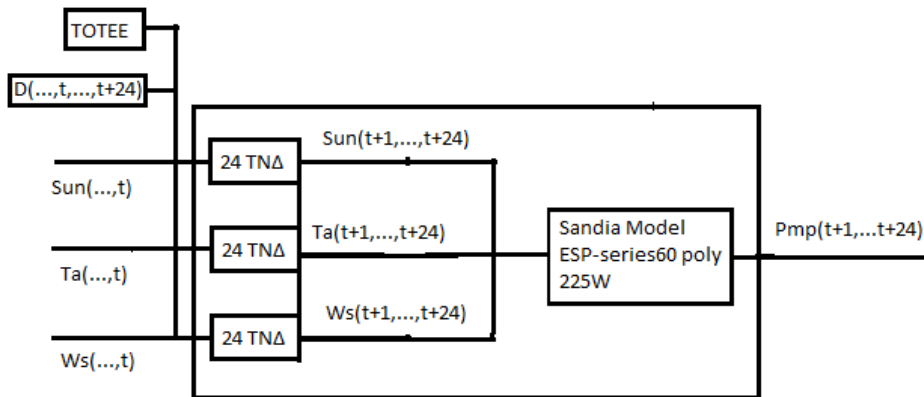
Κάθε ΤΝΔ της ίδιας ομάδας είναι όμοιο με τα υπόλοιπα σε διαστάσεις και βάρη. Το πρώτο ΤΝΔ κάθε ομάδας κάνει πρόβλεψη επόμενης ώρας και η έξοδος του μπαίνει σαν είσοδος στο επόμενο που με τη σειρά του κάνει πρόβλεψη για μια ώρα μετά (εικόνα 8.1). Όπως είναι προφανές το σφάλμα διαδίδεται και μεγαλώνει όσο πιο μακροπρόθεσμα χρονικά είναι η πρόβλεψη. Δοκιμάστηκαν ΤΝΔ με διαφορετικό αριθμό νευρώνων κρυφού επιπέδου και διαφορετικό αριθμό εισόδων. Το ΤΝΔ που επιλέχτηκε είναι αυτό το οποίο θα δώσει το μικρότερο MAE 24 ώρες μπροστά.



Εικόνα 8.1 Σχηματική αναπαράσταση ομάδας ΤΝΔ για πρόβλεψη ακτινοβολίας

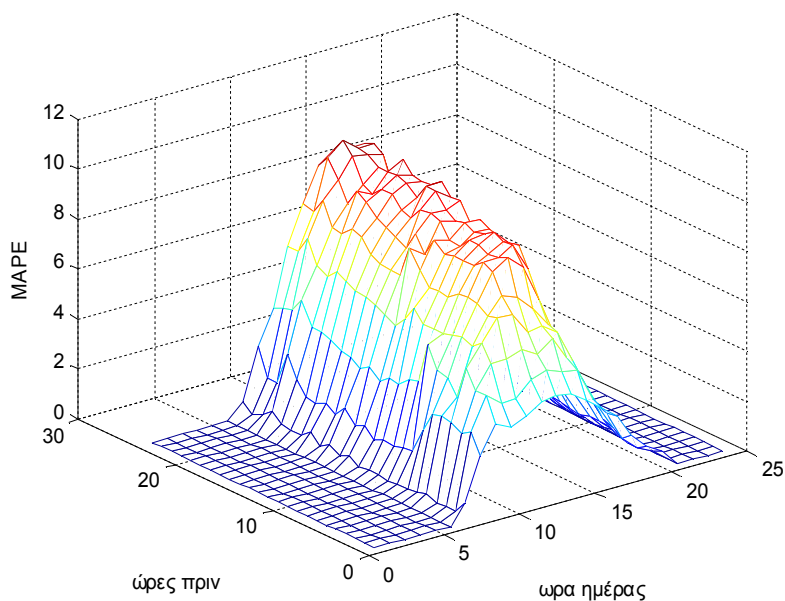
Μετά την εκπαίδευση των ΤΝΔ αναλύοντας τα αποτελέσματα και την επιρροή τους στην τελική πρόβλεψη παραγωγής καταλήξαμε σε κάποια συμπεράσματα. Όπως ήταν αναμενόμενο διαπιστώνουμε ότι τα ΤΝΔ πρόβλεψης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας πάνε τόσο καλά όσο ευσταθέστερος είναι ο καιρός. Η πρόβλεψη τους όμως είναι ικανοποιητική και για τις μέρες με ασταθή καιρό. Η πρόβλεψη θερμοκρασίας ως ένα βαθμό είναι σημαντική για την τελική πρόβλεψη παραγωγής. Όμως δεν μας δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα στην εκτίμηση της παραγωγής, δεν θα είχαμε αισθητή βελτίωση της τελικής πρόβλεψης παραγωγής αν πετυχαίναμε καλύτερη πρόβλεψη θερμοκρασίας. Η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου φαίνεται να είναι πολυτέλεια που θα μπορούσαμε και να είχαμε αποφύγει, καθώς έχει αμελητέα επίδραση στα τελικά αποτελέσματα πρόβλεψης παραγωγής.

Όπως και να έχει οι έξοδοι των 3 ομάδων ΤΝΔ είναι οι εκτιμήσεις ωριαίων τιμών των μετεωρολογικών δεδομένων για το επόμενο 24ωρο και αποτελούν την είσοδο στο μοντέλο της Sandia. Η έξοδος από αυτό το μοντέλο είναι και η τελική εκτίμηση ωριαίας παραγωγής του ESP series60 poly 225W για το επόμενο 24ωρο (εικόνα 8.2). Συνολικά το μοντέλο μας, ανά πάσα «παρούσα» ώρα του έτους κάνει πρόβλεψη ωριαίας παραγωγής για όλο το επόμενο 24ωρο. Αυτό σημαίνει ότι η πρόβλεψη για την παραγωγή κάθε ώρας του έτους έχει ανανεωθεί 24 φορές, και κάθε φορά η ώρα από την οποία προήρθε η πρόβλεψη είναι πλησιέστερη στην ώρα πρόβλεψης άρα και η πρόβλεψη βελτιώνεται.



Εικόνα 8.2 Σύνοψη του Μοντέλου Πρόβλεψης

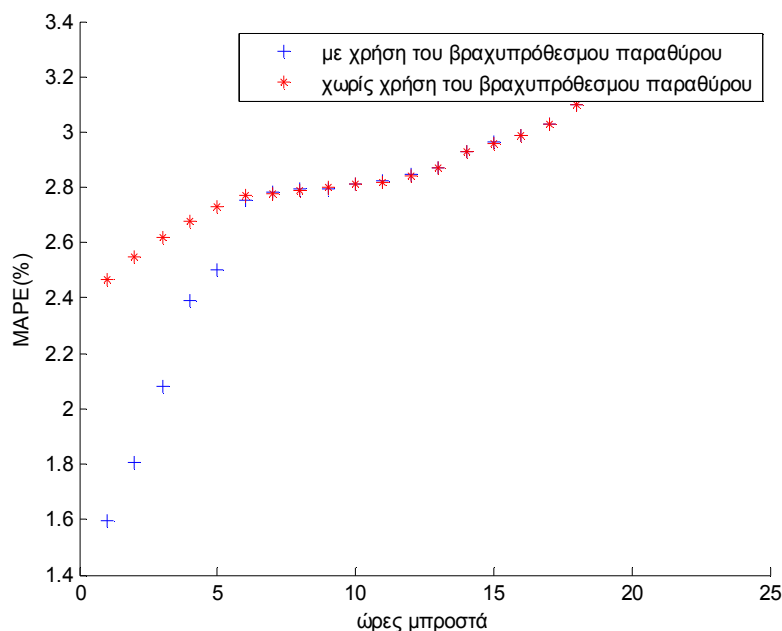
Επιτεύχθηκε πολύ καλή πρόβλεψη στην παραγωγή Φ/Β πλαισίων, με μικρότερο σφάλμα από άλλες έρευνες προπτυχιακού επιπέδου. Πιο συγκεκριμένα για τον μακροπρόθεσμο ορίζοντα 24 ωρών το μοντέλο μας κάνει πρόβλεψη με MAPE = 2.8% (αναλυτικά στην ενότητα 7.2.3), για τον βραχυπρόθεσμο ορίζοντα 6 ωρών το μοντέλο μας κάνει πρόβλεψη με MAPE = 2.2% (αναλυτικά στην ενότητα 7.2.2). Το MAPE για τις ώρες με ηλιοφάνεια ισούται με 5.5% στον 24ωρο ορίζοντα πρόβλεψης και είναι αρκετά καλό, σε σχέση με το 4-12% που παρουσιάζουν άλλες πτυχιακές χωρίς να προσδιορίζουν αν αναφέρεται σε αυτές τις ώρες ή όχι. Στις πιο πολλές περιπτώσεις υποεκτιμούμε την παραγωγή, κάτι που είναι θετικό για το διαχειριστή του ΣΗΕ που αρκετά συχνά προτιμά να είναι συντηρητικός αναφορικά με τη συνεισφορά των ΑΠΕ. Η εικόνα 8.3 συνοψίζει τα MAPE της πρόβλεψης του μοντέλου μας για όλο το έτος.



Εικόνα 8.3 MAPE εκτίμησης παραγωγής για κάθε ώρα της ημέρας και για κάθε ώρα πριν που έγινε η εκτίμηση

Πιθανός λόγος βελτίωσης των αποτελεσμάτων του μοντέλου που αναπτύχθηκε είναι η πρόβλεψη τιμών ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας, αντί για χρήση μέσης τιμής του μήνα και ώρας, ή απλά συνθήκες NOCT. Επίσης πραγματοποιήθηκε εκτενέστερη έρευνα σχετικά με την εκπαίδευση της ομάδας των ΤΝΔ που υλοποιούν την πρόβλεψη της τιμής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Δε δόθηκε περισσότερη έμφαση στις διαστάσεις των ΤΝΔ (διότι αυξάνεται η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου εκπαίδευσης χωρίς αξιοσημείωτη βελτίωση^{lxv}) όσο στις επιπλέον εισόδους που μπορούν να κατευθύνουν την πρόβλεψη καλύτερα liii. Χωρίς τις 2 επιπλέον εισόδους (1. χρονοσειρές τιμών έντασης ακτινοβολίας η οποία εξάγονται από το HOMER, αν σε αυτό βάλουμε τις κατάλληλες μέσες τιμές έντασης ημερήσιας ακτινοβολίας για κάθε μήνα που προέρχονται από την οδηγία TOTEE 20701-3/2010xii και 2. χρονοσειρές με τις ώρες στις οποίες αντιστοιχούν οι τιμές των δεδομένων και προβλέψεων) η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας για 24ώρο χρονικό ορίζοντα, παρουσίαζε MAE ίσο με 44.57 W/m², ενώ μετά την προσθήκη αυτής της εισόδου το MAE περιορίστηκε στα 34.52 W/m². Αυτή η σημαντική βελτίωση του MAE πρόβλεψης παραγωγής είχε σαν συνέπεια την μείωση του MAPE πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής κατά περίπου 1-1.5%, MAPE!

Κάτι άλλο που αξίζει να επισημανθεί είναι η βαρύτητα στη βελτίωση της πρόβλεψης παραγωγής για το βραχυπρόθεσμο ορίζοντα 6 ωρών. Δόθηκε έμφαση στην βελτίωση της πρόβλεψη τιμών έντασης ηλιακής ακτινοβολίας για το πρώτο 6ωρο πρόβλεψης. Την πρόβλεψη για τις πρώτες 6 ώρες δεν την λαμβάνουμε από τις εξόδους των 6 πρώτων ΤΝΔ τις 24αδας πρόβλεψης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Υλοποιήθηκαν 6 «κρυφά» ΤΝΔ τα οποία εκπαιδεύτηκαν ώστε να ελαχιστοποιούν το σφάλμα για την 6ωρη πρόβλεψη. Έτσι τελικά, στην 24ωρη πρόβλεψη έντασης ηλιακής ακτινοβολίας τα 6 κρυφά ΤΝΔ εξάγουν τα αποτελέσματά τους για τις πρώτες 6 ώρες. Σε διαφορετική περίπτωση αντί για 2.8% MAPE για το χρονικό παράθυρο θα αυξανόταν σε 2.91% όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στην εικόνα 8.4.



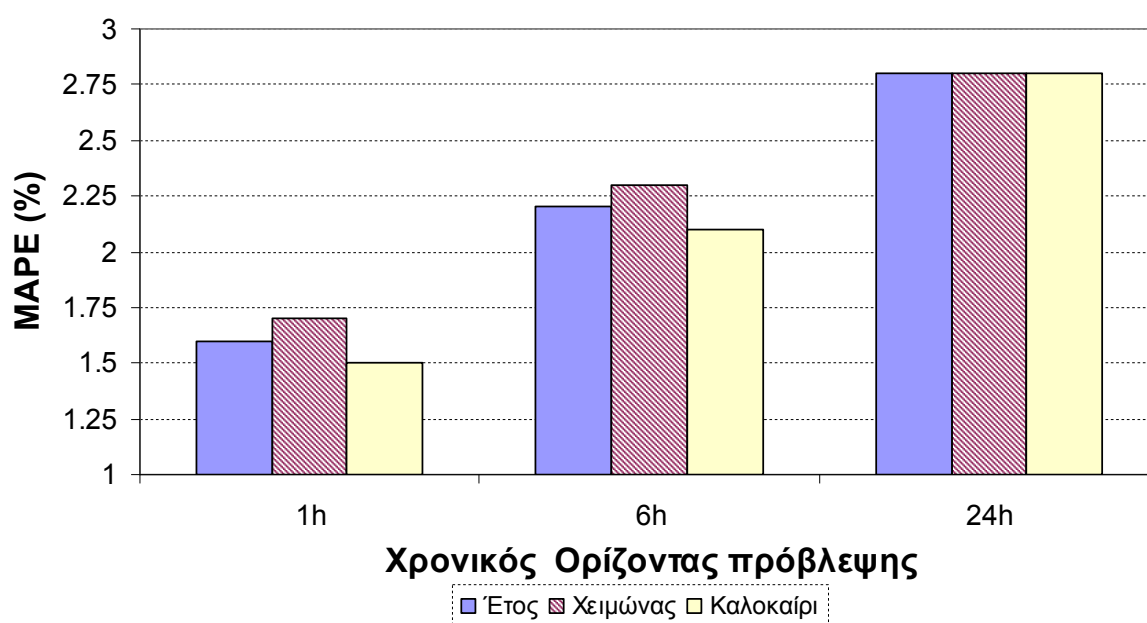
Εικόνα 8.4 MAPE ενδιάμεσων προβλέψεων 24ωρης πρόβλεψης

Η μικρή αυτή βελτίωση για τον βραχυπρόθεσμο ορίζοντα μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες στην οικονομική κατανομή μικρών αυτόνομων ΣΗΕ. Τα ΣΗΕ αυτά βασίζονται σε μικρές και γρήγορες σε απόκριση μονάδες παραγωγής χωρίς αποθηκευτική διάταξη. Οπότε

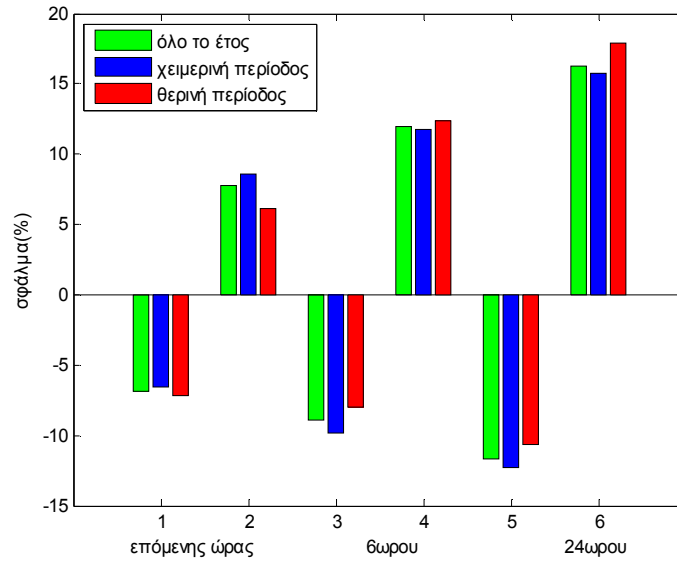
έχουν ανάγκη από ακριβείς βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, ενώ η ανάγκη της μακροπρόθεσμης πρόβλεψη είναι σχετικά περιορισμένη, αφού οι μονάδες μπορούν αρκετά γρήγορα να ανταποκριθούν στις αλλαγές και δεν χρειάζεται ειδική προετοιμασία για την εκκίνησή τους iv.

8.1 Ανάλυση συμπεριφοράς του μοντέλου

Η εργασία δεν έμεινε όμως μόνο στην πρόβλεψη της παραγωγής, διότι όπως αναφέρθηκε στη εισαγωγή το βασικό πρόβλημα που έχουν οι διαχειριστές, σχετικά με τις ΑΠΕ, είναι η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της παραγωγής τους. Για αυτό το σκοπό διερευνήθηκαν διάφορες παράμετροι που βοηθούν στην εκτίμηση της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής που πραγματοποιήθηκε (κεφάλαιο 7). Παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα αρχικά για όλο το έτος, μετά για δυο περιόδους του έτους (χωρισμένες βάση τις ημέρες της ισημερίας) και τέλος για κάθε μήνα του έτους χωριστά. Έμφαση δόθηκε στις ώρες κατά τις οποίες αναμένεται Φ/Β παραγωγή. Σε κάθε περίπτωση εκτός από το MAPE της συνολικής πρόβλεψης παρουσιάζεται και το MAPE τόσο για κάθε ενδιάμεση ώρα της ημέρας που αναφέρεται η πρόβλεψη όσο και για το πόσες ώρες πριν πραγματοποιήθηκε η πρόβλεψη. Παρουσιάστηκαν τόσο τα όρια που κυμαίνεται το σφάλμα στο 90 και 95% των περιπτώσεων. Εξετάστηκαν εκτενώς για όλο το έτος, κάθε εποχή και κάθε μήνα χωριστά κατά πόσο οι προβλέψεις μας είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες της πραγματικής τιμής. Στις περισσότερες περιπτώσεις το σφάλμα πρόβλεψης είναι μηδενικό (δηλαδή μικρότερο του 0.5%), επειδή στις μισές ώρες της ημέρας δεν έχουμε ηλιοφάνεια. Στις υπόλοιπες ώρες συχνότερα, υποεκτιμούμε την παραγωγή παρά την υπερεκτιμούμε. Στα παρακάτω διαγράμματα (8.5,8.6 και 8.7) απεικονίζουμε συγκεντρωτικά τα MAPE σφαλμάτων, σφάλματα στα διαστήματα εμπιστοσύνης 95% και ποσοστά μηδενικού σφάλματος, υποεκτίμησης και υπερεκτίμησης παραγωγής για προβλέψεις από όλο το έτος, χειμερινή και θερινή περίοδο χωριστά.

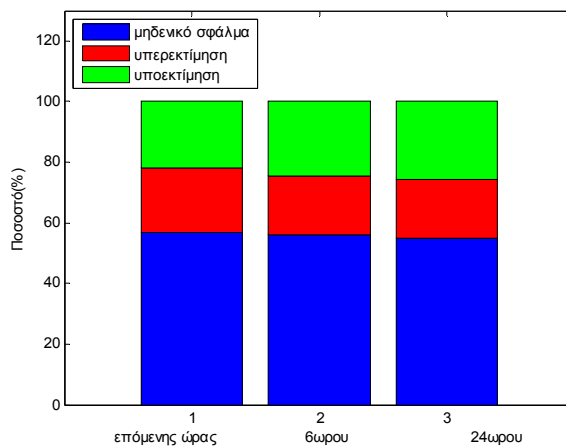


Εικόνα 8.5 Σύνοψη του Μοντέλου Πρόβλεψης-MAPE κατά περιόδους

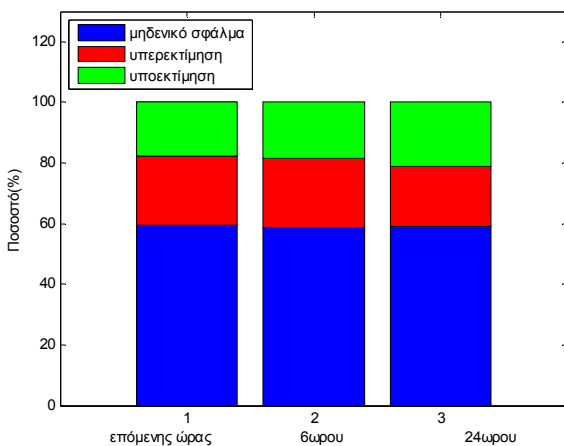


Εικόνα 8.6 Σύνοψη του Μοντέλου Πρόβλεψης-Διαστήματα εμπιστοσύνης

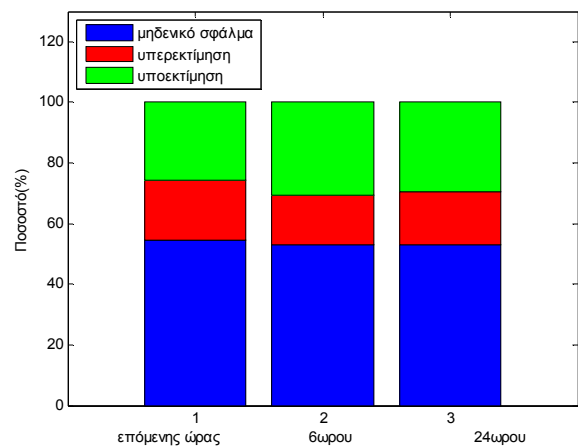
Για όλο το έτος



Για τη χειμερινή περίοδο



Για τη θερινή περίοδο



Εικόνα 8.7 Σύνοψη του Μοντέλου Πρόβλεψης-Υποεκτίμηση-Υπερεκτίμηση

Όλα αυτά δίνουν τους διαχειριστές του ΣΗΕ πιο αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με την αξιοπιστία της πρόβλεψης τη δεδομένη χρονική στιγμή(εποχή, μήνας και ώρα) για τις επόμενες ώρες, ώστε να βελτιωθεί η εκτίμηση σχετικά με την στρεφόμενη εφεδρεία του ΣΗΕ, που πρέπει να διατηρηθεί εξαιτίας της διείδυσης της Φ/Β παραγωγής.

Περισσότερη πληροφορία δίνουμε με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά εποχή του έτους. Το MAPE τη χειμερινή περίοδο είναι μεγαλύτερο από τη θερινή και από το συνολικό για το έτος, διότι το χειμώνα ο καιρός είναι πιο ασταθής, οπότε και δυσκολότερη πρόβλεψη των μετεωρολογικών δεδομένων. Ακόμη φαίνεται ότι το διάστημα εμπιστοσύνης σφαλμάτων για τη θερινή περίοδο είναι αρκετά πιο στενό σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο και στενότερο σε σύγκριση με τα σφάλματα για όλο το έτος. Στη χειμερινή περίοδο ότι έχουμε πιο πολλά μηδενικά σφάλματα διότι είναι και πιο πολλές οι ώρες χωρίς παραγωγή, και γενικά τη χειμερινή περίοδο υπάρχει μια τάση υπερεκτίμησης της παραγωγής, ενώ τη θερινή περίοδο υπάρχει μια τάση υποεκτίμησης της παραγωγής. Αυτό διότι τη χειμερινή περίοδο τα ΤΝΔ πρόβλεψης μετεωρολογικών δεδομένων είναι «επηρασμένα» από δείγματα της θερινής περιόδου και αντίστοιχα για τη θερινή περίοδο είναι «επηρασμένα» από τα δείγματα χειμερινής περιόδου.

Ακόμα περισσότερη πληροφορία δίνουμε στην ανά μήνα ανάλυση της πρόβλεψης παραγωγής. Η πρόβλεψη φαίνεται να είναι εξίσου καλή και αξιόπιστη και για τους 3 καλοκαιρινούς μήνες. Για τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο φαίνεται επίσης καλύτερη σε σχέση με το υπόλοιπο έτος. Πολύ ασταθής πρόβλεψη φαίνεται να έχει και ο Μάρτιος και ο Απρίλιος. Από την ανά μήνα κατανομή των σφαλμάτων πρόβλεψης παραγωγής μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μοντέλο είναι ευσταθέστερο την περίοδο που γενικά αναμένουμε μεγαλύτερη παραγωγή.

Για να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο στην πράξη ώστε να δώσει πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής αυτής της επίδοσης, θα πρέπει να διαθέτουμε αισθητήρες που να μετρούν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή που είναι εγκατεστημένα τα Φ/Β. Τα δεδομένα θα πρέπει να συλλέγονται και να λειτουργούν ως είσοδοι στο μοντέλο. Συγκεκριμένα για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας το μοντέλο απαιτεί ως είσοδο την τιμή της παρούσας ώρας και των 18 προηγούμενων ωρών, για τη θερμοκρασία την τιμή της παρούσας ώρας και των 16 προηγούμενων ωρών και για την ταχύτητα του ανέμου την τιμή της παρούσας ώρας και των 10 προηγούμενων ωρών. Θα χρειαστεί και μια επιπλέον είσοδος, αυτή που είχε χρησιμοποιηθεί για να κατευθύνει κάπως την πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι η χρονοσειρά τιμών έντασης ακτινοβολίας η οποία εξάγεται από το HOMER, αν σε αυτό βάσουμε τις κατάλληλες μέσες τιμές έντασης ημερήσιας ακτινοβολίας για κάθε μήνα που προέρχονται από την οδηγία TOTEE 20701-3/2010xii (όπως αναλύσαμε στην ενότητα 6.2.2). Το μοντέλο που υλοποιήθηκε μπορεί να βρει πρακτική εφαρμογή στα λογισμικά συστημάτων ελέγχου λειτουργίας των ΣΗΕ. Αυτά χρησιμοποιούν προβλέψεις φορτίου και παραγωγής ΑΠΕ για να εφαρμόσουν το κριτήριο ένταξης μονάδων (Unit Commitment) και υπολογίσουν το σημείο βέλτιστης λειτουργίας των μονάδων (Economic Dispatch).

Για αυτόνομα ΣΗΕ με υψηλή διείδυση ΑΠΕ, έχει προταθεί η βελτιστοποίηση της λειτουργίας συστημάτων ελέγχου σε δύο κύκλους, έναν πολύ βραχυπρόθεσμο και έναν μακροπρόθεσμο [lxvi, lxvii]. Η λειτουργία σε δύο τέτοιους κύκλους βοηθάει στην επιλογή των κατάλληλων μονάδων για να λειτουργούν ως μονάδες βάσης για το μακροπρόθεσμο κύκλο, ενώ ο βραχυπρόθεσμος κύκλος μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικότερα τις πιο γρήγορες μεταβολές της παραγωγής από ΑΠΕ σε σύντομο χρονικό διάστημα καθώς και τις μονάδες αιχμής.

Ο μακροπρόθεσμος ορίζοντας πρόβλεψης που υλοποιεί το μοντέλο, με ωριαία ανανέωση, προτείνεται για τον μακροπρόθεσμο κύκλο που λειτουργεί με μακροπρόθεσμες προβλέψεις με ορίζοντα 24/48 ωρών σε ΑΠΕ και φορτίο. Για τον βραχυπρόθεσμο κύκλο

χρήσιμος είναι ο βραχυπρόθεσμος ορίζοντας πρόβλεψη, διότι λειτουργεί με βραχυπρόθεσμες προβλέψεις ορίζοντα αναλόγως με το είδος των συμβατικών μονάδων του ΣΗΕ. Για το βραχυπρόθεσμο κύκλο προβλέπεται η ανανέωση ανά 15-20 λεπτά των προβλέψεων, όμως το μοντέλο μας κάνει ωριαία ανανέωση. Τα ενδιάμεσα σημεία μπορούν να προκύψουν με γραμμική παρεμβολή για την ωριαία πρόβλεψη.

Επίσης θα μπορούσε να ήταν χρήσιμο για κατόχους Φ/Β πάρκων στην περίπτωση μελλοντικής συμμετοχής τους στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και την κατάλληλη υποβολή προσφορών σε αυτήν.

8.2 Ανάλυση Ευαισθησίας Αποτελεσμάτων

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε, υλοποιεί πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής για ένα ESP series60 poly 225W πλαίσιο εγκατεστημένο σε ταράτσα ενός κτηρίου του Πολυτεχνείου Κρήτης στο οριζόντιο επίπεδο. Το μοντέλο μπορεί εύκολα να μετατραπεί και να κάνει ευρύτερη πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής ώστε να ικανοποιήσει ευρύτερες ανάγκες:

- Η πρόβλεψη μπορεί να μεταφερθεί εύκολα από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο χωρίς επανεκπαίδευση των ΤΝΔ. Το πρώτο στάδιο του μοντέλου παραμένει το ίδιο. Τα ΤΝΔ υπολογίζουν την πρόβλεψη μετεωρολογικών δεδομένων, όπως είναι εκπαιδευμένα για το οριζόντιο επίπεδο. Έπειτα οι τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας επεξεργάζονται περαιτέρω (ενότητα 4.4.3.1) για να τις μετατραπούν σε τιμές κεκλιμένου επιπέδου γωνίας που καθορίζεται από το χρήστη. Στο τελικό στάδιο, που είναι το μοντέλο προσομοίωσης Φ/Β παραγωγής εισάγονται οι τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας τις τιμές που υπολογίστηκαν από την επιπλέον επεξεργασία.
- Το μοντέλο μπορεί να κάνει πρόβλεψη για όλους τους τύπους Φ/Β πλαισίων, χωρίς επανεκπαίδευση των ΤΝΔ. Το πρώτο στάδιο του μοντέλου παραμένει το ίδιο. Τα ΤΝΔ υλοποιούν την πρόβλεψη μετεωρολογικών δεδομένων όπως είναι εκπαιδευμένα. Αλλάζουν κάποιοι από τους συντελεστές στο δεύτερο στάδιο, στο μοντέλο προσομοίωσης Φ/Β παραγωγής. Στην εργασία αυτή υπάρχει έτοιμη υλοποίηση για 3 διαφορετικά Φ/Β πλαίσια, όμως υπάρχει και η δυνατότητα χειροκίνητης εισαγωγής συντελεστών ώστε να μπορεί να γίνει η προσομοίωση για κάθε πλαίσιο της αγοράς και κάθε τρόπου εγκατάστασης του, αρκεί να είναι γνωστά τα ηλεκτρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και τους θερμοκρασιακούς συντελεστές είτε από τον κατασκευαστή ή από τυπικές τιμές από την βάση δεδομένων της Sandia National Laboratories.
- Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πρόβλεψη πολλών Φ/Β πλαισίων, συστοιχιών, πάρκων και συνδυασμούς τους. Αν συνδυαστούν τα δυο παραπάνω βήματα μπορούμε να πάρουμε πρόβλεψη παραγωγής για κάθε πλαίσιο εγκατεστημένο με κάθε γωνία. Οπότε με απλούς γραμμικούς συνδυασμούς, πολλαπλασιασμούς για μετατροπή πρόβλεψης παραγωγής από πλαίσιο σε συστοιχία και πάρκο και προσθέσεις για μετατροπή της παραγωγής σε διαφορετικών ειδών πλαίσια, μπορούμε να κάνουμε πρόβλεψη Φ/Β παραγωγής συνολικά για μια περιοχή.

Το μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τα ίδια αποτελέσματα επίδοσης για πρόβλεψη παραγωγής σε διαφορετική περιοχή από την περιοχή του Ακρωτηρίου Χανίων που έγινε η υλοποίηση του. Αυτό γιατί τα ΤΝΔ είναι εκπαιδευμένα ώστε να ελαχιστοποιούν το σφάλμα πρόβλεψης για μετεωρολογικά δεδομένα στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Αν θέλουμε να κάνουμε χρήση του μοντέλου για πρόβλεψη Φ/Β άλλων περιοχών τα σφάλματα πιθανότατα θα είναι μεγαλύτερα. Μπορεί να γίνει χρήση του σχεδίου υλοποίησης του μοντέλου, αλλά απαιτείται η επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία επανεκπαίδευσης των ΤΝΔ

Αν δεν υπάρχει η δυνατότητα επανεκπαίδευσης των ΤΝΔ και ταυτόχρονα απαιτείται η χρήση του μοντέλου για πρόβλεψη παραγωγής σε διαφορετική περιοχή τότε υπάρχουν προτάσεις που θα μπορούσαν να βελτιώσουν την επίδοση του μοντέλου. Πρώτα από όλα να παρακαμφθεί η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου και να χρησιμοποιηθεί ως τιμή πρόβλεψης, για όλο το χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης, η τιμή που έχει η ταχύτητα του ανέμου την χρονική στιγμή που γίνεται η πρόβλεψη (persistence). Επίσης να παρακαμφθεί και η πρόβλεψη θερμοκρασίας και να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που είχε η θερμοκρασία, το τελευταίο 24ωρο πριν την πρόβλεψη, ως τιμές πρόβλεψης του επόμενου 24ωρου ορίζοντα. Τέλος η πρόβλεψη της τιμής της ακτινοβολίας να γίνει κανονικά, με την προϋπόθεση ότι σαν είσοδος στα ΤΝΔ θα χρησιμοποιηθεί η μέση ωριαία μηνιαία τιμή ηλιακής ακτινοβολίας για εκείνη την περιοχή και όχι για την περιοχή του Ακρωτηρίου που έγινε η αρχική εκπαίδευση.

8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μια πρώτη προσθήκη στο μοντέλο που θα ήταν πολύ χρήσιμη είναι η προσθήκη αντιστροφέα (inverter). Τα αποτελέσματα του μοντέλου μας είναι σε DC παραγωγή που δεν γίνεται να χρησιμοποιηθεί άμεσα από το δίκτυο. Η ύπαρξη αντιστροφέα είναι απαραίτητη, για να μετατραπεί η παραγωγή σε AC ώστε να μπορεί να συνδεθεί η Φ/Β εγκατάσταση με το δίκτυο. Η επίδοση του αντιστροφέα εξαρτάται και από το ποσοστό παραγωγής των συνδεδεμένων πάνελ, αλλά και από την αλλαγή χαρακτηριστικών του πλαισίου εξαιτίας της θερμοκρασίας, π.χ τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc})^{lxviii}.

Μια προσθήκη ακόμα θα ήταν αυτή της πρόβλεψης παραγωγής σε Φ/Β πλαίσια που είναι εγκατεστημένα με tracker. Αυτό σημαίνει προσθήκη εξισώσεων στο μαθηματικό μοντέλο της Sandia ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο μεταβλητής γωνίας.

Μια άλλη προσθήκη στο μοντέλο θα ήταν επιπλέον είσοδοι στα ΤΝΔ, ειδικά σε αυτά που εκτιμούν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Να χρησιμοποιηθεί δηλαδή κάποια επιπλέον πληροφορία σχετικά με τον καιρό της περιοχής. Μια γρήγορη δοκιμή, έδειξε ότι με μια επιπλέον μεταβλητή με δυο μόνο τιμές, που απλά αντιστοιχεί στον αν ο καιρός την επόμενη μέρα είναι λιγότερο ή περισσότερο νεφελώδης μειώνει το MAE πρόβλεψης ηλιακής ακτινοβολίας κατά 10-20W/m². Αυτό σημαίνει μικρότερο MAPE παραγωγής κατά τουλάχιστον 1-2%.

Το μοντέλο θα μπορούσε να τροποποιηθεί για να βοηθήσει περισσότερο τους διαχειριστές ΣΗΕ. Πρώτα από όλα να ανανεώνει την πρόβλεψη κάθε 20λεπτα και όχι κάθε ώρα, γιατί κάθε τόσο χρόνο συνήθως εφαρμόζονται το κριτήριο της ένταξης μονάδων και ο υπολογισμός του σημείου βέλτιστης λειτουργίας των μονάδων. Επιπλέον θα βοηθούσε και η αύξηση του μακροπρόθεσμου ορίζοντα πρόβλεψης από 24 σε 48 ώρες.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- i ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ Συνοπτικό Πληροφοριακό Δελτίο για το 2012, ΛΑΓΗΕ
- ii Πληροφοριακό δελτίο παραγωγής στα μη διασυνδεδεμένα νησιά για το έτος 2012, ΔΕΑΔΗΕ, Δεκέμβριος 2012
- iii Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market
- iv Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης, διδακτορική διατριβή, Αντώνιος Γ. Τσικαλάκης, Αθήνα, Ιούλιος 2008
- v ARMINES, NTUA, INESC, RAL, PPC Development and implementation of an advanced control system for the optimal operation and management of medium-sized power systems with a large penetration from renewable power sources, Final report of JOULE II project JOU2-CT92-0053. Edited by the Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 1996
- vi R.A.Schlueter,G.L.Park,T.W.Reddoch,p.R.Barnes,J.S.Lawler, "A modified unit commitment and generation control for utilities with large wind penetrations", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, PAS-104,No7,July1985
- vii Hatzigiorgiou N. "The Care System Overview: Advanced control Advice for Power Systems with Large-scale integration of Renewable Energy Sources", J.Wind Engineering, Vol 23, pp 57-68, 1999.
- viii Φυσική του Ήλιου και Ηλιακή Ενέργεια Γιάννης Κατσιγιάννης Ρέθυμνο, Ιανουάριος 2011
- ix Solar Energy Engineering, Soteris A.Kalogirou, Jun 2009
- x ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ, Σημειώσεις ΑΠΕ Ι Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας του ΤΕΙ Αθήνας Δρ Π. Αζαπούλος
- xi Αρκουδής Γεώργιος, «Τεχνικοοικονομική Αξιολόγηση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στην Ελλάδα», Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Αθήνα Οκτώβριος 2007
- xii ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 «Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών» Α' έκδοση, Αθήνα 2010.
- xiii Γκοράκης Αντώνης «Μελέτη, προσομοίωση και βελτιστοποίηση λειτουργίας ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Κεντρική Ελλάδα», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012
- xiv Concentrating Solar Power (CSP) Technologies and Applications in the Middle East & North Africa (MENA) Countries Ch. Malamatenios, G. Vezirgianni, El. Giakoumelos, Antonis Tsikalakis, Th.Tomtsi and N. Hatzigiorgiou, DEMSEE Conference Sitia, Sept 2010
- xv Cesi EuroDish solar Generator, DISPOWER Project Highlight no 8, Διαθέσιμο: www.dispower.org
- xvi Φωτοβολταϊκά Συστήματα Ι. Ε. Φραγκιαδάκης
- xvii "Nonlinear optical response of silicon nanocrystals", E. Koudoumas, O. Kokkinaki, M. Konstantaki, N. Kornilios, S. Couris, S. Korovin, V. Pustovoi, V.E. Ogluzdin, Opt. Materials, 30 (2), pp. 260-263, 2007.
- xviii <http://www.mechatron.gr/index.php/el/>
- xix Νούλης Κων/νος, «ΜΕΙΩΣΗ ΑΙΧΜΗΣ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥΣ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ», Χανιά, Οκτώβριος 2011.
- xx Τζουλιανιάκη Τερψιχόρη «Αυτόνομα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας βασισμένα σε ΑΠΕ. Συνιστώσες και συνεισφορά στον εξηλεκτρισμό απομονωμένων περιοχών», Ιούνιος 2012
- xxi Λαοκωνοστανάκης Νικόλαος, «Επίδραση σημαντικής εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών σε υποσταθμό υψηλής/μέσης τάσης», Χανιά, Ιούλιος 2011.
- xxii Ανδρουλάκης Δημήτριος «Μείωση Εκπομπής Ρύπων από την Εγκατάσταση Φ/Β στα Σχολικά Συγκροτήματα της Αττικής και Οικονομική Μελέτη Επένδυσης», Νοέμβριος 2006
- xxiii Κουρκοτάς Αλέξανδρος, «Αποτίμηση αξίας παραγωγής από Φωτοβολταϊκό Πάρκο. Εφαρμογή στο νησί της Κύθου», Σεπτέμβριος 2009.
- xxiv Επενδύσεις Φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα Στόχοι – Οφέλη – Εμπόδια Δρ. Αλέξανδρος Ζαχαρίου Αναπλ. Γραμματέας ΣΕΦ από το Συνέδριο "Ενέργεια: Σημερινή εικόνα-σχεδιασμός-προοπτικές" ΤΕΕ, 8-10 Μαρτίου 2010
- xxv Farivar, G , "Photovoltaic module single diode model parameters extraction based on manufacturer datasheet parameters", 2010 IEEE International Conference on Nov. 29 2010-Dec. 1 2010
- xxvi D. King, et al., "Experimental Optimization of the FireFly 600 Photovoltaic Off-Grid System," Sandia National Laboratories Report, SAND2003-3493, October 2003
- xxvii PHOTOVOLTAIC ARRAY PERFORMANCE MODEL , D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185-0752
- xxviii Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α159/Σ9/11.04.2011 της Διοικούσας Επιτροπής
- xxix D. King, W. Boyson, and J. Kratochvil, "Analysis of Factors Influencing the Annual Energy Production of Photovoltaic Systems," 29th IEEE PV Specialists Conference, 2002.
- xxx ASTM E 1036, "Testing Electrical Performance of Non-concentrator Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells," American Society for Testing and Materials.
- xxxi ExelGroup_Company_Profile_greek
- xxxii ExelGroup_ESPseries60_poly_greek

- xxiii «Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα ΗΜΜΥ, Τομέας Συστημάτων, Δρ. Μανώλης Χριστοδούλου
- xxvii ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ - ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΑΣΠΡΟΥΛΗΣ
- xxxv W.McCulloch θαη Walter Pitts, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943
- xxxvi D.O.Hebb, The Organization of Behavior", New York, Willey, 1949
- xxxvii M.Minsky, S.Papert, Perceptrons, Cambridge, MIT Press, 1969
- xxxviii "Analog VLSI and Neural Systems", Carver Mead, Addison Wesley Publishing Company, January 1989
- xxxix «ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Βιολογίας, Γλαροπούλος Αλέξιος
- xl Ρίζος Γιώργος, «Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα Θεωρία & Εφαρμογές», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΠΕ, Αθήνα 1996
- xli Ανδρέας Σ. Παπαθανασίου, «Μελέτη, σχεδιασμός και υλοποίηση αλγορίθμων εντοπισμού θέσης και αναγνώρισης χαρακτήρων σε τυπομένες εικόνες», διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2010
- xlii Σοφία Ν. Εξαρχου, Μαρία Χ. Κερκιδου, «Σύστημα Επεξεργασίας και Κατηγοριοποίησης ψηφιακής μαστογραφίας», διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2003
- xliii "Predicting the Power Output of Distributed Renewable Energy Resources within a Broad Geographical Region" Athanasios Aris Panagopoulos, Georgios Chalkiadakis, Eftichios Koutroulis
- xliv K Kalaizakis, G. S. Stavrakakis, E. M. Anagnostakis, "Short-term load forecasting based on artificial neural networks parallel implementation" J. Electric Power Systems Research, Vol. 63, Issue 3, 2002, pp 185-196.
- xlv Kariniotakis G et al. Load, wind and hydro power forecasting functions of the More-Care EMS system. Proceedings of MedPower Conference, Athens, Greece, Nov. 2002, Paper MED02/003.
- xlvi G. Kariniotakis, "Short-Term Load Forecasting Using a NeuroFuzzy Model Based on Entropy Maximisation", Proceedings of the IEEE/IEE MedPower2002 Conference, Athens, Greece, 4-6 November 2002, MED02/071.
- xlvii Zbigniew Gontar, George Sideratos, N.Hatziargyriou, "Short Term Load Forecasting using Radial Basis Function Network", Lecture Notes in Computer Science, Methods and Applications of Artificial Intelligence, Volume 3025/2004 Springer-Verlag pp 432-438.
- xlviii Wang, X.; Hatziargyriou, N.; Tsoukalas, L.H, "A new methodology for nodal load forecasting in deregulated power systems", IEEE Power Engineering Review, Vol 22, Iss 5, May 2002, pp:48 – 51.
- xlix Hippert, H.S.; Pedreira, C.E.; Souza, R.C "Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation", IEEE Trans. on Power Systems Vol. 16, Iss 1, Feb 2001 pp:44 – 55.
- l G Zhang, B. Eddy Patuwo, Michael Y. Hu "Forecasting with Artificial neural networks: The state of the Art", Int. J. of Forecasting Vol 14, 1998, pp 35–62.
- li «Greenhouse Energy Consumption Prediction using Neural Networks Models», MARIO TREJO-PEREA1, GILBERTO HERRERA-RUIZ, JOSE RIOS-MORENO, RODRIGO CASTAÑEDA MIRANDA AND EDGAR RIVASARAIZA, Biontronics Laboratory, School of Engineering, University of Querétaro, C.U. Cerro de las Campanas, Querétaro, Mexico, Dec 2008
- lii Αγγλική Βλάστη.» Πρόβλεψη Ηλιακής Ακτινοβολίας με χρήση Νευρωνικών Δικτύων και κάλυψη με ΦΒ Συστήματα», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2010
- liii Takashi Hiyama, «Neural Network Based Estimation of maximum Power generation from PV module using Environmental information", IEEE transaction on energy conversion, sept 1997
- liv "Forecasting of preprocessed daily solar radiation time series using neural networks», Christophe Paoli a, Cyril Voyant, Marc Muselli, September 2010
- lv S. J. Yao, Y. H. Song, L. Z. Zhang, X. Y. Cheng,, Wavelet transform and neural networks for short-term electrical load forecasting , Energy Conversion and Management, Volume 41, Issue 18, 1 December 2000, Pages 1975-1988
- lvi G. Kariniotakis, E. Nogaret, and G. Stavrakakis, "Advanced Short-Term Forecasting of Wind Power Production," in Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC'97, Dublin, Ireland, pp. 751–754, October 1997.
- lvii Yiannis A. Katsigiannis, Antonis G. Tsikalakis, Pavlos S. Georgilakis, Nikos D. Hatziargyriou, "Improved Wind Power Forecasting Using a Combined Neuro-Fuzzy and Artificial Neural Network Model", Springer-Verlag, Lecture Notes on Artificial Intelligence (LNAI) 3955, 2006, pp105-115.
- lviii «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ», ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ν. ΣΙΔΕΡΑΤΟΣ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2010
- lix «ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΔΡΟΜΙΚΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΚΤΙΝΩΤΗΣ ΒΑΣΗΣ», ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΤΟΓΕΛΟΥ Ι. ΑΛΕΞΙΑ-ΑΘΑΝΑΣΙΑ, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2010
- lxN.Papageorgiou, D.Prapas, B.Sotiropoulos, "Evaluation of solar irradiation measurements of Solar Village 3", In Proc of the 4th National Conference on RES, Xanthi, October 1992 (in Greek), pp1-8
- lxi http://www.exelgroup.gr/img/ESP_series60_poly_gr_low_res.pdf
- lxii <http://homerenergy.com/>
- lxiii <http://www.mathworks.com/products/neural-network/index.html>

Ixiv «Οικονομική αξιολόγηση της λειτουργίας νησιωτικών συστημάτων με μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας με χρήση προηγμένων συστημάτων ελέγχου N», Δ.Χατζηαργυρίου, Ι.Σταφανάκης, Α.Γιγαντίδου, Ε.Θαλασσινάκης, Α.Γ.Τσικαλάκης, Α.Δημέας, Σύνοδος Ε.Ε Cigre Αθήνα 2003, Αθήνα 27 & 28 Νοεμβρίου 2003

Ixv "Forecasting of preprocessed daily solar radiation time series using neural networks", Christophe Paoli, Cyril Voyant, Marc Muselli, Marie-Laure Nivet, September 2010

Ixvi R.A.Schlueter,G.L.Park,T.W.Reddoch,p.R.Barnes,J.S.Lawler, "A modified unit commitment and generation control for utilities with large wind penetrations", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, PAS-104,No7,July1985

Ixvii Hatziaargyriou N. "The Care System Overview: Advanced control Advice for Power Systems with Large-scale integration of Renewable Energy Sources", J.Wind Engineering, Vol 23, pp 57-68,1999.

Ixviii «Optimized MPP tracking for a higher energy yield», SMA Solar Technology OptiTrac