Τμήμα Φυσικής
Σχολή Θετικών Επιστημών
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σύγχρονος Ηλιακός Χάρτης της Ελλάδος με Εφαρμογή σε Υβριδικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Κοσμάς Α. Καββαδίας

Μηχανολόγος Μηχανικός Τ.Ε., MSc

Ιωάννινα 2016

"*Η έγκριση της παρούσας διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Φυσικής, της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα*"

(Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2)

Επιβλέπων
Αριστείδης Μπαρτζώκας
Καθηγητής

Συμβουλευτική Επιτροπή (αλφαβητικά)
Χαράλαμπος Καμπεζίδης, Ερευνητής Α'
Αριστείδης Μπαρτζώκας, Καθηγητής
Αθανάσιος Παλιατσός, Καθηγητής

Η Ανάπτυξη και υποστήριξη της διδακτορικής διατριβής έγινε ενώπιον της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, την

Την Επιτροπή αποτελούσαν οι κάτωθι (αλφαβητικά):

Χαράλαμπος Καμπεζίδης, *Ερευνητής Α' του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών*
Παύλος Κασσωμένος, *Καθηγητής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων*
Χρήστος Λώλης, *Επίκουρος Καθηγητής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων*
Νικόλαος Μπάκας, *Λέκτορας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων*
Αριστείδης Μπαρτζώκας, *Καθηγητής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων*
Αθανάσιος Παλιατσός, *Καθηγητής του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.*
Νικόλαος Χατζηαναστασίου, *Αναπληρωτής Καθηγητής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων*

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα διατριβή με τίτλο "Σύγχρονος Ηλιακός Χάρτης της Ελλάδος με Εφαρμογή σε Υβριδικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας" εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών "Μετεωρολογία-Κλιματολογία" του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Αριστείδη Μπαρτζώκα. Στην τριμελή Συμβουλευτική Επιτροπή συμμετείχαν επίσης ο Ερευνητής Α' του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών Χαράλαμπος Καμπεζίδης, Φυσικός-Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και ο Καθηγητής του ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ. Αθανάσιος Παλιατσός, Μαθηματικός.

Η εκπόνηση της παρούσας διατριβής δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη βοήθεια, τη συμπαράσταση και την υποστήριξη ανθρώπων που εμπλέκονται, σε διαφορετικό βαθμό ο καθένας τους, στη διαδικασία αυτή και στους οποίους οφείλω ευχαριστίες. Θα ήθελα, αρχικά, να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στα μέλη της τριμελούς επιτροπής για τη συνεχή υποστήριξή τους, τον πολύτιμο χρόνο τους, που μου διέθεσαν απλόχερα, χωρίς ποτέ να μου αρνηθούν συνάντηση ή συνεργασία, αλλά και την κατανόηση που έδειξαν στις ιδιαίτερες συνθήκες κάτω από τις οποίες εκπονήθηκε η παρούσα διατριβή. Επιπρόσθετα, οφείλω να εκφράσω βαθύτατη ευγνωμοσύνη σε καθέναν τους ξεχωριστά, στον Καθηγητή κ. Παλιατσό, στον οποίο οφείλω την εκπόνηση διδακτορικής διατριβής, στον Ερευνητή κ. Καμπεζίδη, ο οποίος ήταν ο βασικός εμπνευστής του θέματος της διατριβής και στον Καθηγητή κ. Μπαρτζώκα, η συμβολή του οποίου ήταν καταλυτική για την ολοκλήρωση της διατριβής εντός των ακαδημαϊκών προτύπων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη ΔΕΠ του Τομέα Αστρογεωφυσικής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χατζηαναστασίου και τον Καθηγητή κ. Κασσωμένο για τη βοήθειά τους, το χρόνο τους και τη αμέριστη συμβολή τους ως διδάσκοντες των πρόσθετων μαθημάτων που όφειλα να εξεταστώ, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λώλη για το χρόνο και την ουσιαστική βοήθειά του κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διατριβής, καθώς επίσης και τα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για το χρόνο τους και τη συμβολή τους στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου.

Οφείλω να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου, μέλη Εκπαιδευτικού Προσωπικού του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ του ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ, για την κατανόηση και τη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής και τις διευκολύνσεις που μου παρείχαν με απαλλαγή πρόσθετων καθηκόντων εις βάρος του δικού τους χρόνου.

Ιδιαίτερα, από τους συναδέλφους μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια Αιμιλία Κονδύλη για τη συνεχή υποστήριξή της, το ανθρώπινο και ανιδιοτελές ενδιαφέρον της, τη συμπαράστασή της και τις συμβουλές της και τον Επίκουρο Καθηγητή Κωνσταντίνο Μουστρή για την αμέριστη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

Ευγνωμοσύνη και θερμές ευχαριστίες οφείλω στον νυν συνάδελφο, αλλά κυρίως Δάσκαλό μου, Καθηγητή Ιωάννη Καλδέλλη του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, ο οποίος κατέχει την πατρότητα της ακαδημαϊκής μου καριέρας, καθώς είναι ο άνθρωπος που πίστεψε στις ικανότητές μου και αποτέλεσε και αποτελεί τη βάση των ερευνητικών μου δραστηριοτήτων. Τα πάνω από 20 έτη συνεργασίας μας έως και σήμερα έχουν διαμορφώσει καθοριστικά τον τρόπο σκέψης μου και τη μεθοδολογία διεξαγωγής της έρευνας, στοιχεία που συνέβαλαν τα μέγιστα στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που έδειξαν ενδιαφέρον και αφιέρωσαν πολύ ή λίγο από το χρόνο τους ώστε να πραγματοποιηθούν οι στόχοι της παρούσας διατριβής. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται:

Ο συνάδελφος και εξαιρετικός συνεργάτης Δημήτριος Ζαφειράκης, ο οποίος ανιδιοτελώς, χωρίς δισταγμό και ανεξάρτητα από το φόρτο εργασίας του δεν μου αρνήθηκε ποτέ τη βοήθειά του, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Οι φοιτητές και συνεργάτες του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ του ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ, Ευστράτιος Σπήλιος, Γεώργιος Τζάνες, Φωτεινή Μαλεβίτη και Χρήστος Ξαφέλης, με τους οποίους συνεργάστηκα, από τη θέση του επιβλέποντα των διπλωματικών τους εργασιών και παρείχαν μέσα από την έρευνά τους σημαντικά στοιχεία για την παρούσα διατριβή.

Τον κ. Ψυλόγλου, Κύριο Ερευνητή του Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, για τις πολύτιμες συμβουλές του στην επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων.

Το Φυσικό Κωνσταντίνο Πετσούνη της εταιρείας Mentor Hellas για την πολύτιμη βοήθειά του στη δημιουργία αυτοματοποιημένων διαδικασιών και στην επεξεργασία μακροχρόνιων χρονοσειρών στο Matlab.

Το Φιλόλογο Γρηγόρη Μαργαρίτη για τη συνεχή ηθική υποστήριξή του και τη βοήθεια που μου παρείχε κατά την ελληνική απόδοση ξενόγλωσσων κειμένων.

Τελευταίους, αλλά σημαντικούς, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους «αφανείς ήρωες» στους οποίους οφείλω την ύπαρξή μου, το χαρακτήρα μου και σημαντικό μέρος των ικανοτήτων και του τρόπου σκέψης μου. Αυτούς που δημιούργησαν το περιβάλλον και τις προϋποθέσεις, σε ανύποπτο χρόνο, χωρίς προγραμματισμό και μόνο από αγάπη, για να ολοκληρώσω την παρούσα διατριβή. Αυτούς που ανέχτηκαν από αγάπη τις ιδιαίτερες συνθήκες που απαιτεί η έρευνα στα πλαίσια μιας διδακτορικής διατριβής και δέχτηκαν να στερηθούν το χρόνο που τους άξιζε, ενθαρρύνοντας και υποστηρίζοντας ηθικά την υλοποίησή της: Αλέξανδρος, Ηλίας, Αγγελική, Αλέξανδρος, Ελένη, Μαρία, Φωτεινή, Λουΐζα.

Κ.Α. Καββαδίας
***Ιανουάριος** 2016*

Πίνακας Περιεχομένων

Λίστα Σχημάτων 8

Λίστα Πινάκων 19

Πίνακας Συμβόλων Βασικών Μεγεθών 23

Συντομογραφίες, Συντμήσεις, Αρκτικόλεξα 27

Απόδοση Ορολογίας στα Ελληνικά 29

Περίληψη 31

Εισαγωγή 35

1 **Δεδομένα** 39

1.1 Συλλογή δεδομένων 39

1.2 Πληρότητα των διαθέσιμων χρονοσειρών 41

1.3 Θερμοκρασία αέρα 44

1.4 Σχετική υγρασία 47

1.5 Ατμοσφαιρική πίεση 50

1.6 Ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας 53

1.7 Ποιοτικός έλεγχος μετρήσεων 55

2 **Συμπλήρωση Ελλειπουσών Τιμών** 59

2.1 Εισαγωγή 59

2.2 Το πρόβλημα των ελλειπουσών μετρήσεων 60

2.3 Κριτήρια αξιολόγησης μεθόδων 63

2.4 Πληρότητα των προς συμπλήρωση χρονοσειρών 63

2.5 Μεθοδολογία 67

2.5.1 Κατηγορία 1: Συμπλήρωση μεμονωμένων κενών 3-ωριαίων μετρήσεων 68

2.5.2 Κατηγορία 2: Συμπλήρωση τριών διαδοχικών κενών 3-ωριαίων μετρήσεων 69

2.5.3 Κατηγορία 3: Συμπλήρωση μακροχρόνιων κενών 3-ωριαίων μετρήσεων 72

2.5.4 Συμπλήρωση χρονοσειρών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας 91

2.6 Δημιουργία ωριαίων χρονοσειρών – Τελική βάση δεδομένων 99

Βιβλιογραφία 100

3 **Υπολογισμός Ηλιακής Ακτινοβολίας** 103

3.1 Εισαγωγή 103

3.2 Επιλογή μοντέλου υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας 104

3.3 Το μοντέλο MRM 106
3.3.1 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού 106
3.3.2 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού 109
3.3.3 Υπολογισμοί της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας 110
3.4 Αξιολόγηση του μοντέλου MRM 114
3.5 Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου MRM 121
3.6 Εφαρμογή του μοντέλου MRM στους επιλεγέντες σταθμούς 127
Βιβλιογραφία 132
4 **Συγκρότηση Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους** 137
4.1 Εισαγωγή 137
4.2 Περιγραφή του ΤΜΕ 137
4.3 Μέθοδοι συγκρότησης ΤΜΕ 140
4.3.1 Μέθοδος Danish 140
4.3.2 Μέθοδος Sandia 143
4.3.3 Σταθμικοί συντελεστές 146
4.4 Αξιολόγηση μεθόδων 151
4.5 Δεδομένα εισόδου 154
4.6 Μεθοδολογία συγκρότησης ΤΜΕ 155
4.7 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων 164
Βιβλιογραφία 171
5 **Ηλιακός Χάρτης Ελλάδας** 173
5.1 Εισαγωγή 173
5.2 Ανάλυση της βάσης δεδομένων 177
5.2.1 Έλεγχος κανονικότητας 177
5.2.2 Χωρική ανάλυση 180
5.3 Χωρική παρεμβολή 193
5.3.1 Μέθοδος της αντίστροφης σταθμισμένης απόστασης 197
5.3.2 Τοπική πολυωνυμική παρεμβολή 201
5.3.3 Μέθοδος kriging 205
5.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων χωρικής παρεμβολής 213
5.5 Δημιουργία μηνιαίων ηλιακών χαρτών 218
Βιβλιογραφία 233
6 **Υβριδικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας** 237
6.1 Εισαγωγή 237
6.2 Αρχή λειτουργίας υβριδικών συστημάτων 245

6.3 Ενεργειακή ανάλυση 248
6.3.1 Φωτοβολταϊκή μονάδα 249
6.3.2 Ανεμογεννήτρια 253
6.3.3 Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας 257
6.3.4 Εξοπλισμός ρύθμισης ισχύος 260
6.4 Οικονομική ανάλυση 263
6.4.1 Αρχικό κόστος εγκατάστασης 263
6.4.2 Σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας 264
6.4.3 Μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας 265
6.4.4 Κόστος παραγόμενης ενέργειας υβριδικού συστήματος 266
6.5 Προφίλ κατανάλωσης 267
6.6 Μεθοδολογία 272
Βιβλιογραφία 277
7 **Προσομοίωση Υβριδικών Συστημάτων ΑΠΕ** 279
7.1 Εισαγωγή 279
7.2 Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης 281
7.2.1 Ενεργειακή παραγωγή Φ/Β μονάδας 281
7.2.2 Ενεργειακή παραγωγή Α/Γ 284
7.2.3 Συμπεριφορά ηλιακού και αιολικού δυναμικού 286
7.2.4 Ο ρόλος του συστήματος αποθήκευσης 287
7.2.5 Συνδυασμοί αυτονομίας 289
7.2.6 Αυτονομία με χρήση Φ/Β ενέργειας μόνο 291
7.3 Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης 296
7.3.1 Οικονομικά δεδομένα 296
7.3.2 Σύγκριση ΤΜΕ με αντίστοιχες πραγματικές χρονοσειρές 298
7.3.3 Επίδραση των ΑΠΕ στο κόστος παραγωγής 300
7.3.4 Επίδραση του αρχικού κόστους αποθήκευσης 302
7.3.5 Μείωση κόστους με επιτρεπόμενες απορρίψεις φορτίου 305
7.3.6 Διαμόρφωση κόστους παραγωγής με επιδότηση αρχικού κεφαλαίου 307
7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία 309
Βιβλιογραφία 310
Επίλογος – Συμπεράσματα 313
Βιβλιογραφία 316

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Χάρτης των χρησιμοποιηθέντων στη διατριβή σταθμών της ΕΜΥ.....40

Σχήμα 1.2: Πληρότητα των χρονοσειρών των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ στο σύνολο των μετεωρολογικών παραμέτρων για την περίοδο 1985-1999.....42

Σχήμα 1.3: Πληρότητα των χρονοσειρών των 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα, ατμοσφαιρικής πίεσης και σχετικής υγρασίας των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ για την περίοδο 1985-1999.....43

Σχήμα 1.4: Πληρότητα των 3-ωριαίων μετρήσεων όλων των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ ανά ώρα μέτρησης κατά την περίοδο 1985-1999.....43

Σχήμα 1.5: Πληρότητα των χρονοσειρών της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999.....44

Σχήμα 1.6: Μεταβλητότητα των 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ σύμφωνα με τις διαθέσιμες χρονοσειρές για την περίοδο 1985-1999..46

Σχήμα 1.7: Συχνότητα εμφάνισης των τιμών θερμοκρασίας αέρα στο σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων όλων των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ, για την περίοδο 1985-1999.....46

Σχήμα 1.8: Μεταβλητότητα ανά μήνα των 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999.....47

Σχήμα 1.9: Μεταβλητότητα των 3-ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999.....48

Σχήμα 1.10: Συχνότητα εμφάνισης τιμών σχετικής υγρασίας στο σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων όλων των σταθμών.....49

Σχήμα 1.11: Μεταβλητότητα ανά μήνα των 3-ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999.....49

Σχήμα 1.12: Μεταβλητότητα των 3-ωριαίων μετρήσεων της ατμοσφαιρικής πίεσης στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999, μετά από την αφαίρεση των ακραίων τιμών.....50

Σχήμα 1.13: Συχνότητα εμφάνισης των τιμών της ατμοσφαιρικής πίεσης στο σύνολο των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999.....52

Σχήμα 1.14: Μεταβλητότητα ανά μήνα των 3-ωριαίων μετρήσεων της ατμοσφαιρικής πίεσης στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999.....52

Σχήμα 1.15: Συχνότητα εμφάνισης των τιμών της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999.....54

Σχήμα 1.16: Μεταβλητότητα ανά μήνα των μετρήσεων της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999.....55

Σχήμα 1.17: Παραδείγματα ελέγχου ορίων 3-ωριαίας μεταβολής των μετεωρολογικών παραμέτρων.....56

Σχήμα 2.1: Διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας μέσης πληρότητας 3-ωριαίων μετρήσεων των χρονοσειρών για το σύνολο των μετρούμενων παραμέτρων 64

Σχήμα 2.2: Πληρότητα 3-ωριαίων μετεωρολογικών μετρήσεων ανά σταθμό 65

Σχήμα 2.3: Πληρότητα μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας στο σύνολο της 15-ετίας..66

Σχήμα 2.4: Συχνότητα εμφάνισης αριθμού διαδοχικών κενών 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα σε τρεις σταθμούς.....67

Σχήμα 2.5: Πληρότητα 3-ωριαίων χρονοσειρών θερμοκρασίας αέρα μετά τη συμπλήρωση των μεμονωμένων κενών 69

Σχήμα 2.6: Διάγραμμα κανονικότητας υπολοίπων από την εφαρμογή της μεθόδου παρεμβολής Hermite για τη συμπλήρωση ελλειπουσών παρατηρήσεων σχετικής υγρασίας 71

Σχήμα 2.7: Πληρότητα 3-ωριαίων χρονοσειρών θερμοκρασίας αέρα μετά από τη συμπλήρωση έως και τριών διαδοχικών κενών 72

Σχήμα 2.8: Συσχέτιση μετρήσεων μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα με την ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας στο σταθμό του Αράξου 73

Σχήμα 2.9: Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα το μήνα Ιανουάριο σε ημέρες με χαμηλή ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας ($SD \leq 1$) στο σταθμό του Αράξου.....74

Σχήμα 2.10: Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα το μήνα Δεκέμβριο σε ημέρες με υψηλή ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας (SD>8) στο σταθμό της Αράξου.....75

Σχήμα 2.11: Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα το μήνα Ιούλιο σε ημέρες με υψηλή ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας, $SD \in 12{,}13$, στο σταθμό του Αράξου 76

Σχήμα 2.12: Συσχέτιση των μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα 15-ετίας μεταξύ των σταθμών 77

Σχήμα 2.13: Διάγραμμα συχνοτήτων του συντελεστή προσδιορισμού R^2 των μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη συμπλήρωση των μακροχρόνιων ελλειπουσών τιμών της θερμοκρασίας αέρα 77

Σχήμα 2.14: Μέση τιμή και μεταβλητότητα των 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα 15-ετίας της συμπληρωμένης βάσης δεδομένων των σταθμών 79

Σχήμα 2.15: Συσχέτιση των μετρήσεων σχετικής υγρασίας 15-ετίας μεταξύ των σταθμών.....80

Σχήμα 2.16: Αξιολόγηση των μοντέλων παλινδρόμησης κατά τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων στις χρονοσειρές σχετικής υγρασίας της 15-ετίας.....80

Σχήμα 2.17: Συσχέτιση μετρήσεων σχετικής υγρασίας 15-ετίας μεταξύ των ετών του σταθμού Μίκρας 81

Σχήμα 2.18: Συσχέτιση των μετρήσεων σχετικής υγρασίας μεταξύ των χρονοσειρών του Ιανουαρίου για τη 15-ετία στο σταθμό της Μίκρας.....82

Σχήμα 2.19: Σύγκριση αποτελεσμάτων συνάρτησης γραμμικής παλινδρόμησης με μετρήσεις σχετικής υγρασίας για το μήνα Μάρτιο 1985 στο σταθμό της Άρτας.....82

Σχήμα 2.20: Έλεγχος των μεθόδων συμπλήρωσης ελλειπουσών μετρήσεων σχετικής υγρασίας το μήνα Ιανουάριο στο σταθμό Αγχιάλου.....83

Σχήμα 2.21: Έλεγχος των μεθόδων συμπλήρωσης ελλειπουσών μετρήσεων σχετικής υγρασίας το μήνα Ιούλιο στο σταθμό Αγχιάλου.....84

Σχήμα 2.22: Μέση τιμή και μεταβλητότητα των 3-ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας 15-ετίας της συμπληρωμένης βάσης δεδομένων των σταθμών 85

Σχήμα 2.23: Συσχέτιση των μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης 15-ετίας μεταξύ των σταθμών 85

Σχήμα 2.24: Δημιουργία τεχνητών κενών στη χρονοσειρά 3-ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης του μήνα Φεβρουαρίου 1994 του σταθμού του Αράξου.....87

Σχήμα 2.25: Χρονοσειρές διαφορετικής πληρότητας 3-ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης το μήνα Φεβρουάριο 1994 του σταθμού Αράξου.....88

Σχήμα 2.26: Χρονοσειρές διαφορετικής πληρότητας 3-ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης το μήνα Ιούλιο 1994 του σταθμού Αράξου.....89

Σχήμα 2.27: Αξιολόγηση μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με αρχική πληρότητα χρονοσειράς 25% για το μήνα Ιούλιο 1994 στο σταθμό του Αράξου 90

Σχήμα 2.28: Θηκόγραμμα κατανομής τιμών συντελεστή προσδιορισμού R^2 των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης για τη συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών ατμοσφαιρικής πίεσης στη χρονοσειρά του σταθμού Σερρών.....91

Σχήμα 2.29: Μέση τιμή και μεταβλητότητα των 3-ωριαίων τιμών ατμοσφαιρικής πίεσης 15-ετίας της συμπληρωμένης βάσης δεδομένων των σταθμών. Στο σχήμα εντοπίζονται σταθμοί με το μεγαλύτερο υψόμετρο, το οποίο αναφέρεται στην παρένθεση.....92

Σχήμα 2.30: Συσχέτιση των μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας 15-ετίας μεταξύ των ετών του σταθμού του Πύργου 93

Σχήμα 2.31: Συσχέτιση των μετρήσεων 15-ετίας ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μεταξύ των σταθμών 93

Σχήμα 2.32: Σύγκριση των τιμών του R^2 με τις τιμές του RMSE για τα μοντέλα παλινδρόμησης των σταθμών κατά τη συμπλήρωση των ελλειπουσών μετρήσεων διάρκειας ηλιοφάνειας.....96

Σχήμα 2.33: Πληρότητα χρονοσειρών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μετά την εφαρμογή μοντέλων παλινδρόμησης για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων σε όλη την 15-ετία 97

Σχήμα 2.34: Σύγκριση τιμών ημερήσιας ηλιοφάνειας μοντέλου και μετρήσεων κατά τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων στο σταθμό Μίκρας.....97

Σχήμα 2.35: Σύγκριση τιμών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μοντέλου και μετρήσεων κατά τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων στο σταθμό Καλαμάτας 98

Σχήμα 2.36: Πληρότητα χρονοσειράς ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας σταθμών στα διάφορα στάδια συμπλήρωσης των ελλειπουσών μετρήσεων της 15-ετίας.....99

Σχήμα 2.37: Μεταβλητότητα των τιμών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας των σταθμών της τελικής βάσης δεδομένων.....99

Σχήμα 2.38: Χάρτης με τους 39 σταθμούς της βάσης δεδομένων για τη συγκρότηση του ΤΜΕ ..101

Σχήμα 3.1: Ενδοετήσια μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας.....107

Σχήμα 3.2: Μεταβολή της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω της ύπαρξης των μορίων του όζοντος, για διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού όζοντος (Psiloglou & Kambezidis 2007) 112

Σχήμα 3.3: Μεταβολή της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω της ύπαρξης των υδρατμών, για διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης υετήσιμου ύδατος (Psiloglou & Kambezidis 2007).....113

Σχήμα 3.4: Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω της ύπαρξης αερολυμάτων, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή θόλωσης Ångström (Psiloglou & Kambezidis 2007).....114

Σχήμα 3.5: Ωριαίες τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από το σταθμού του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος 2005.....115

Σχήμα 3.6: Ωριαίες τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων από το σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος 2005.....115

Σχήμα 3.7: Μηνιαίες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας από το σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος 2005. Η καμπύλη αποτελεί τη γραμμική συνάρτηση 4^{ου} βαθμού που περιγράφει την ενδοετήσια μεταβολή.....116

Σχήμα 3.8: Σύγκριση υπολογιζόμενων από το μοντέλο MRM τιμών ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με μετρήσεις από το σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο το έτος 2005 σε συνθήκες καθαρού ουρανού.....118

Σχήμα 3.9: Σύγκριση ενδοημερήσιας μεταβολής ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, υπολογιζόμενης από το μοντέλο MRM, με τις μετρήσεις από το σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο, για την περίοδο 25/6/2005-1/7/2005.....119

Σχήμα 3.10: Σύγκριση υπολογιζόμενων από το μοντέλο MRM τιμών ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με τις αντίστοιχες τιμές από τον σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος 2005.....119

Σχήμα 3.11: Σύγκριση υπολογιζόμενων από το μοντέλο MRM ενδοημερήσιων μεταβολών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με αντίστοιχες μετρήσεις από το σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για τρεις ημέρες του μήνα Νοεμβρίου 2005.....120

Σχήμα 3.12: Σύγκριση της υπολογιζόμενης από το μοντέλο MRM ενδοετήσιας μεταβολής της ηλιακής ενέργειας με τις αντίστοιχες τιμές, όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις στο σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος 2005. Οι καμπύλες αποτελούν τις συναρτήσεις 4ου βαθμού που περιγράφουν τις αντίστοιχες ενδοετήσιες μεταβολές.....121

Σχήμα 3.13: Σύγκριση υπολογιζόμενων από το μοντέλο MRM τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με τις αντίστοιχες τιμές από τον σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος 2005, με χρήση ωριαίων τιμών διάρκειας ηλιοφάνειας. Η εστιγμένη ερυθρή ευθεία αντιπροσωπεύει την καλλίτερη προσαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης στο σμήνος των δεδομένων.....123

Σχήμα 3.14: Μεταβολή των διαφορών μεταξύ των υπολογιζόμενων τιμών από το μοντέλο MRM ηλιακής ακτινοβολίας με δεδομένα ημερήσιας ηλιοφάνειας μείον τις αντίστοιχες με δεδομένα ωριαίας ηλιοφάνειας και οι δύο περιπτώσεις αναφέρονται σε μετρήσεις του σταθμού ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος 2005. Η ερυθρά εστιγμένη ευθεία αντιπροσωπεύει την καλλίτερη προσαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης στο σμήνος των δεδομένων. 123

Σχήμα 3.15: Ωριαίες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης του σταθμού ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος 2005.....124

Σχήμα 3.16: Τιμές συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικού O_3 από τον αισθητήρα TOMS του δορυφόρου Earth Probe και υπολογιζόμενες τιμές από το μοντέλο Van Heuklon, για την περιοχή της Αθήνας το έτος 2005.....126

Σχήμα 3.17: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ, την περίοδο 1985-1999, σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM 128

Σχήμα 3.18: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που προέρχεται από υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας μέσω του MRM στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ την περίοδο 1985-1999 129

Σχήμα 3.19: Ενδοετήσια μεταβολή της ημερήσιας ηλιακής ενέργειας σε επιλεγμένους σταθμούς της ΕΜΥ, την περίοδο 1985-1999, σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM 130

Σχήμα 3.20: Θηκογράμματα διακύμανσης της μηνιαίας ηλιακής ενέργειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ, την περίοδο 1985-1999, σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM. Οι σταθμοί παρουσιάζονται κατά φθίνουσα σειρά ως προς το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο βρίσκονται....131

Σχήμα 3.21: Θηκογράμματα της ενδοετήσιας διακύμανσης της ηλιακής ενέργειας στο σύνολο των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ, για την περίοδο 1985-1999, σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM 132

Σχήμα 4.1: Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους της μεθόδου Sandia 148

Σχήμα 4.2:Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους, Bahadori & Chamberlain (1986) 148

Σχήμα 4.3:Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους, NREL (Marion & Urban 1995) 148

Σχήμα 4.4:Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους, Petrakis et al. (1996) 148

Σχήμα 4.5:Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους, Petrakis et al. (1998) 149

Σχήμα 4.6: Ομάδες σταθμικών συντελεστών για την παραγωγή ΤΜΕ από τους Argiriou et al. (1999) 150

Σχήμα 4.7: Μεταβολή απόλυτης ελάχιστης, μέσης και απόλυτης μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα στο σταθμό Αγχιάλου τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο 1986 156

Σχήμα 4.8: Μεταβολή απόλυτης ελάχιστης, μέσης και απόλυτης μέγιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας στο σταθμό Αγχιάλου το μήνα Ιανουάριο 1986 156

Σχήμα 4.9: Μεταβολή απόλυτης ελάχιστης, μέσης και απόλυτης μέγιστης ημερήσιας ατμοσφαιρικής πίεσης στο σταθμό Αγχιάλου το μήνα Ιανουάριο 1986....157

Σχήμα 4.10: Μεταβολή ημερήσιας άμεσης και ολικής ηλιακής ενέργειας στο σταθμό Αγχιάλου τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο 1986 157

Σχήμα 4.11: Τιμές συνάρτησης αθροιστικής κατανομής ολικής ακτινοβολίας για το μήνα Δεκέμβριο στο σταθμό Αγχιάλου....158

Σχήμα 4.12: Ενδοημερήσια μεταβολή ολικής ακτινοβολίας για το μήνα Ιανουάριο στο σταθμό Αγχιάλου....161

Σχήμα 4.13: Ενδοημερήσια μεταβολή ολικής ακτινοβολίας για το μήνα Ιούλιο στο σταθμό Αγχιάλου 161

Σχήμα 4.14: Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα για το μήνα Ιανουάριο στο σταθμό Αγχιάλου....162

Σχήμα 4.15: Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα για το μήνα Ιούλιο στο σταθμό Αγχιάλου 162

Σχήμα 4.16: Μεταβολή θερμοκρασίας κατά την ένωση δύο ΤΜΜ για το σταθμό Αγχιάλου 163

Σχήμα 4.17: Παρεμβολή ομαλοποίησης της μεταβολής θερμοκρασίας κατά την ένωση δύο ΤΜΜ για το σταθμό Αγχιάλου.....163

Σχήμα 4.18: Ετήσια ολική (άμεση + διάχυτη) ηλιακή ενέργεια σε kWh/m^2 στο οριζόντιο επίπεδο σύμφωνα με τα αποτελέσματα συγκρότησης ΤΜΕ 166

Σχήμα 4.19: Ποσοστιαία απόκλιση ετήσιας ηλιακής ενέργειας ΤΜΕ με τις αντίστοιχες τιμές της ΤΟΤΕΕ 167

Σχήμα 4.20: Σύγκριση τιμών μηνιαίας ηλιακής ενέργειας ΤΜΕ και ΤΟΤΕΕ στο σταθμό του Άργους 167

Σχήμα 5.1: Κατανομή της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας Kavadias et al. (2010) 173

Σχήμα 5.2: Ζώνες ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο σε MJ/m^2, σύμφωνα με τον Flocas (1980).....174

Σχήμα 5.3: Ευρωπαϊκός χάρτης ηλιακής ενέργειας και φωτοβολταϊκής παραγωγής 176

Σχήμα 5.4: Γεωγραφική κατανομή των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ 177

Σχήμα 5.5: Ιστόγραμμα συχνοτήτων μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών, για τους μήνες (α) Ιανουάριο και (β) Ιούλιο 178

Σχήμα 5.6: Ιστόγραμμα συχνοτήτων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγμένων σταθμών 178

Σχήμα 5.7: Έλεγχος κανονικότητας των μηνιαίων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας για τους μήνες Ιανουάριο (α) και Ιούνιο (β), των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών 180

Σχήμα 5.8: Έλεγχος κανονικότητας των ετήσιων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών.....180

Σχήμα 5.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση γραμμικών τάσεων των δεδομένων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους 39 επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς 181

Σχήμα 5.10: Τρισδιάστατη απεικόνιση γραμμικών τάσεων των δεδομένων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας με διεύθυνση ΒΒΔ, στους 39 επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς.....182

Σχήμα 5.11: Χωρική ανάλυση των δεδομένων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με τη χρήση των πολυγώνων επιρροής Thiessen 183

Σχήμα 5.12: Χωρική ανάλυση των δεδομένων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με εφαρμογή ομαδοποιημένων πολυγώνων επιρροής.....184

Σχήμα 5.13: Νέφος και επιφάνεια βαριογράμματος των τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών 185

Σχήμα 5.14: Ζεύγη μετεωρολογικών σταθμών που παρουσιάζουν ασυνήθιστα υψηλές τιμές ημιδιακύμανσης σε σχέση με ζεύγη που βρίσκονται σε αντίστοιχο εύρος αποστάσεων ..186

Σχήμα 5.15: Νέφος βαριογράμματος των μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται κατά μήκος της διεύθυνσης 75^o δεξιόστροφα του βορρά 187

Σχήμα 5.16: Μεταβατικές κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα με κριτήριο την ετήσια μεταβολή του μέσου μηνιαίου αριθμού καταιγίδων (Kotinis-Zambakas et al. 1984) 187

Σχήμα 5.17: Νέφος και επιφάνεια βαριογράμματος των μηνιαίων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας Ιανουαρίου των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών 188

Σχήμα 5.18: Όπως το Σχήμα 5.17, αλλά για τον Ιούλιο 188

Σχήμα 5.19: Επιφάνειες βαριογραμμάτων των μηνιαίων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας για κάθε μήνα του έτους των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών 189

Σχήμα 5.20: Νέφος συνδιακύμανσης όλων των ζευγών τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας των 39 υπό μελέτη μετεωρολογικών σταθμών 190

Σχήμα 5.21: Όπως στο Σχήμα 5.20, αλλά για τον Ιανουάριο 191

Σχήμα 5.22: Όπως στο Σχήμα 5.20, αλλά για τον Ιούλιο 191

Σχήμα 5.23: Επεξηγηματικό διάγραμμα κατανομής τιμών συντελεστή I του Moran 192

Σχήμα 5.24: Επεξηγηματικό διάγραμμα λειτουργίας των μεθόδων χωρικής παρεμβολής κατά την αναζήτηση γειτόνων για τη δημιουργία συναρτήσεων εκτίμησης της παραμέτρου H στη θέση (φ', l') 198

Σχήμα 5.25: Χάρτης ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με εφαρμογή της IDW σε δεδομένα 39 μετεωρολογικών σταθμών 199

Σχήμα 5.26: Διάγραμμα διασποράς εκτιμώμενων, με τη μέθοδο IDW, τιμών με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους 39 επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς 200

Σχήμα 5.27: Χάρτης πρόβλεψης ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με εφαρμογή της LPI σε δεδομένα 39 μετεωρολογικών σταθμών 203

Σχήμα 5.28: Διάγραμμα διασποράς εκτιμώμενων, με τη μέθοδο LPI, τιμών προς τις αντίστοιχες τιμές της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους 39 επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς 204

Σχήμα 5.29: Επεξηγηματικό διάγραμμα χαρακτηριστικών περιοχών ενός βαριογράμματος. Στο σχήμα δίνονται σε παρένθεση οι αντίστοιχοι καθιερωμένοι στη διεθνή βιβλιογραφία όροι 206

Σχήμα 5.30: Θεωρητική προσομοίωση του νέφους βαριογράμματος των τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών 207

Σχήμα 5.31: Χάρτης πρόβλεψης ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με την εφαρμογή της μεθόδου OK σε δεδομένα 39 μετεωρολογικών σταθμών 209

Σχήμα 5.32: Διάγραμμα διασποράς εκτιμώμενων τιμών προς τις αντίστοιχες τιμές ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους 39 επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς με την εφαρμογή της μεθόδου OK 210

Σχήμα 5.33: Χάρτης πρόβλεψης της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο, με εφαρμογή της μεθόδου EBK σε δεδομένα 39 μετεωρολογικών σταθμών 212

Σχήμα 5.34: Διάγραμμα διασποράς εκτιμώμενων, με τη μέθοδο EBK, τιμών προς τις αντίστοιχες τιμές ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους 39 επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς 213

Σχήμα 5.35: Χάρτης σύγκρισης των αποτελεσμάτων της IDW (χρωματικές ζώνες) και της LPI (ισοήλιες γραμμές) 214

Σχήμα 5.36: Χάρτης σύγκρισης των αποτελεσμάτων της μεθόδου ΟΚ (χρωματικές ζώνες) και της ΕΒΚ (ισοήλιες γραμμές).....215

Σχήμα 5.37: Σύγκριση των βέλτιστων ευθειών παλινδρόμησης των μοντέλων χωρικής παρεμβολής 217

Σχήμα 5.38: Χάρτης τυποποιημένου σφάλματος εκτίμησης της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας με τη μέθοδο ΕΒΚ 218

Σχήμα 5.39: Χάρτης πρόβλεψης της μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο, τον Ιανουάριο, με εφαρμογή της μεθόδου ΕΒΚ σε δεδομένα 39 μετεωρολογικών σταθμών..221

Σχήμα 5.40: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Φεβρουάριο.....222

Σχήμα 5.41: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Μάρτιο 223

Σχήμα 5.42: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Απρίλιο.....224

Σχήμα 5.43: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Μάιο.....225

Σχήμα 5.44: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το, Ιούνιο.....226

Σχήμα 5.45: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Ιούλιο.....227

Σχήμα 5.46: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Αύγουστο.....228

Σχήμα 5.47: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Σεπτέμβριο 229

Σχήμα 5.48: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Οκτώβριο 230

Σχήμα 5.49: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Νοέμβριο 231

Σχήμα 5.50: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Δεκέμβριο 232

Σχήμα 6.1: Ημερήσια ηλιακή ενέργεια και μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου στην Κρήτη (Kaldellis et al. 2009).....239

Σχήμα 6.2: Σχηματική διάταξη του υβριδικού συστήματος της Κύθνου (Strauss et al. 2001) 241

Σχήμα 6.3: Διάγραμμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος Ικαρίας (ΔΕΗ Ανανεώσιμες 2015)...242

Σχήμα 6.4: Συνολική εικόνα του έργου μετατροπής τού Αη Στράτη σε «πράσινο νησί» (Green Agenda 2011).....243

Σχήμα 6.5: Σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος της Τήλου (Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος 2015) 244

Σχήμα 6.6: Εγκαταστάσεις υβριδικών συστημάτων όπως έχουν καταχωρηθεί στον ιστότοπο go100re.net (100%RE 2015) 245

Σχήμα 6.7: Τυπική διάταξη υβριδικού συστήματος.....246

Σχήμα 6.8: Διάγραμμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος ΑΠΕ, αποτελούμενο από Α/Γ εναλλασσόμε-νου ρεύματος (ΑC), Φ/Β μονάδα και συσσωρευτές καθώς και κατάλληλο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό για τη διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα διαγράμματα απεικονίζουν τις καμπύλες λειτουργίας των επιμέρους συνιστωσών της εγκατάστασης, βάσει των οποίων πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση του συστήματος. Οι γραμμές με κυανό χρώμα απεικονίζουν τα τμήματα της εγκατάστασης που

διαρρέονται από συνεχές ρεύμα και με ερυθρό χρώμα τα τμήματα που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. 247

Σχήμα 6.9: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας Φ/Β πλαισίου, για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας 249

Σχήμα 6.10: Διάγραμμα ισχύος Φ/Β πλαισίου για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας 251

Σχήμα 6.11: Επίδραση της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά ενός Φ/Β στοιχείου 252

Σχήμα 6.12: Συντελεστής μεταβολής της μέγιστης απόδοσης των Φ/Β πλαισίων λόγω γήρανσης για κάθε έτος λειτουργίας 253

Σχήμα 6.13: Συντελεστής απόδοσης λόγω σκίασης Φ/Β μονάδας σε συνάρτηση με το ποσοστό κάλυψης του εδάφους (επιφάνεια Φ/Β πλαισίων προς επιφάνεια του εδάφους που καταλαμβάνει η Φ/Β μονάδα)....253

Σχήμα 6.14: Αδιάστατες καμπύλες λειτουργίας Α/Γ 254

Σχήμα 6.15: Διαχρονική μεταβολή τού συντελεστή τεχνικής διαθεσιμότητας αιολικών εγκαταστάσεων 1 και 10 Α/Γ....257

Σχήμα 6.16: Εύρος ισχύος, χρόνου εκφόρτισης και αποθηκευτικής ικανότητας διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης (Kavadias 2012)....258

Σχήμα 6.17: Συχνότητα εμφάνισης διαστημάτων συνεχόμενης νημενίας, για χρονική περίοδο ενός έτους, στην Άνδρο (Kaldellis et al. 2007) 259

Σχήμα 6.18: Εύρος μεταβολής βαθμού απόδοσης κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης συσσωρευτών (Kavadias 2012)....260

Σχήμα 6.19: Καμπύλη μεταβολής τού βαθμού απόδοσης ενός αντιστροφέα σε σχέση με την αδιάσταστη τιμή της ισχύος εξόδου του (ισχύς εξόδου/ονομαστική ισχύ) 261

Σχήμα 6.20: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης σταθεροποιητή τάσης σε σχέση με την αδιάσταστη ισχύ 262

Σχήμα 6.21: Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης ρυθμιστή φόρτισης σε σχέση με την αδιάσταστη ισχύ 263

Σχήμα 6.22: Ωραίες μετρήσεις κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για ένα έτος....269

Σχήμα 6.23: Μέσο προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατοικίας 270

Σχήμα 6.24: Καμπύλες μέσης ενδοημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατοικίας....270

Σχήμα 6.25: Διάγραμμα πυκνότητας ημερήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης κατοικίας 271

Σχήμα 6.26: Ενδοετήσια μεταβολή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας....271

Σχήμα 6.27 : Μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση Φ/Β πάρκων στην Ελλάδα (ΣΕΦ 2015) 273

Σχήμα 6.28: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης υβριδικού συστήματος....276

Σχήμα 7.1 : Θέσεις επιλεγέντων σταθμών που χρησιμοποιούνται κατά την ενεργειακή-οικονομική ανάλυση υβριδικών συστημάτων 280

Σχήμα 7.2: Φωτογραφίες εγκαταστάσεων Φ/Β μονάδων σε ηλιοστάτες (αριστερά) και σε βάσεις σταθερής κλίσης (δεξιά)....281

Σχήμα 7.3: Μεταβολή της ετήσιας ηλιακής ενέργειας για διαφορετικές τιμές τής γωνίας κλίσης Φ/Β πλαισίων στην περιοχή του Ελληνικού 282

Σχήμα 7.4: Βέλτιστη γωνία κλίσης Φ/Β πλαισίων για τους επιλεγέντες σταθμούς 282

Σχήμα 7.5: Διακύμανση του συντελεστή φορτίου των Φ/Β μονάδων σύμφωνα με τα ΤΜΕ κάθε σταθμού 283

Σχήμα 7.6: Ενδοετήσια μεταβολή της μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου στις επιλεγμένες περιοχές 284

Σχήμα 7.7: Επίδραση της πυκνότητας του αέρα στην ενεργειακή παραγωγή τής Α/Γ 285

Σχήμα 7.8: Διάγραμμα συχνοτήτων των υπό μελέτη περιπτώσεων αιολικού δυναμικού και αδιάστατη καμπύλη λειτουργίας Α/Γ 285

Σχήμα 7.9: Μηνιαίες τιμές ενεργειακής παραγωγής Α/Γ και Φ/Β για διαφορετικούς συνδυασμούς περιπτώσεων αιολικού και ηλιακού δυναμικού 286

Σχήμα 7.10: Μεταβολή ενεργειακής παραγωγής Α/Γ και Φ/Β μονάδας στην περιοχή τού Ελληνικού με χαμηλό αιολικό δυναμικό το μήνα Ιανουάριο 287

Σχήμα 7.11: Ελάχιστη απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα συσσωρευτών για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας ενός καταναλωτή σε 4 περιοχές της Ελλάδας θεωρώντας 3 σενάρια αιολικού δυναμικού 288

Σχήμα 7.12: Συχνότητα εμφάνισης ελλείματος ενέργειας που καλείται να καλυφθεί από τους συσσωρευτές (περίπτωση Ηρακλείου Κρήτης σε συνδυασμό με χαμηλό αιολικό δυναμικό) 288

Σχήμα 7.13: Καμπύλες αυτονομίας υβριδικών συστημάτων σε συνθήκες χαμηλού αιολικού δυναμικού 289

Σχήμα 7.14: Όπως Σχήμα 7.13, αλλά για συνθήκες υψηλού αιολικού δυναμικού 290

Σχήμα 7.15: Ωριαία κατανομή ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του υπό μελέτη οικιακού καταναλωτή 291

Σχήμα 7.16: Συνδυασμοί Φ/Β πλαισίων και συσσωρευτών που εξασφαλίζουν πλήρη αυτονομία στις περιοχές μελέτης 292

Σχήμα 7.17: Ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού συστήματος Φ/Β-συσσωρευτών (ελαχιστοποιώντας τη συμμετοχή των συσσωρευτών) σε 4 διαδοχικές ημέρες το μήνα Ιανουάριο στην περιοχή της Καστοριάς 293

Σχήμα 7.18: Κατανομή παραγόμενης Φ/Β ενέργειας υβριδικού συστήματος Φ/Β-συσσωρευτών ελαχιστοποιώντας τη συμμετοχή των συσσωρευτών 294

Σχήμα 7.19: Όπως στο Σχήμα 7.18, αλλά με αυξημένη συμμετοχή των συσσωρευτών 294

Σχήμα 7.20: Όπως στο Σχήμα 7.17, αλλά με αυξημένη συμμετοχή των συσσωρευτών 295

Σχήμα 7.21: Μεταβολή των διαστάσεων Φ/Β και συσσωρευτών σε περιπτώσεις απώλειας φορτίου στην περιοχή της Καστοριάς 296

Σχήμα 7.22 : Μεταβολή του κόστους παραγωγής υβριδικού συστήματος στην Καστοριά, ανάλογα με τις τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και 3 σενάρια αιολικού δυναμικού 298

Σχήμα 7.23: Όπως στο Σχήμα 7.22, αλλά στη Μίκρα 299

Σχήμα 7.24: Όπως στο Σχήμα 7.22, αλλά στο Ελληνικό 300

Σχήμα 7.25: Όπως στο Σχήμα 7.22, αλλά στο Ηράκλειο Κρήτης.....300

Σχήμα 7.26: Διαμόρφωση κόστους παραγωγής σε περιπτώσεις μεμονωμένης χρήσης Φ/Β και Α/Γ 301

Σχήμα 7.27: Σύγκριση κόστους παραγωγής διαφορετικών συνδυασμών Φ/Β, Α/Γ και συσσωρευτών σε περίπτωση χαμηλού αιολικού δυναμικού 302

Σχήμα 7.28: Κόστος συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (αναπαραγωγή από Zafirakis 2010) .303

Σχήμα 7.29: Μεταβολή τού κόστους παραγωγής για διαφορετικές επιλογές κόστους συστήματος αποθήκευσης σε συνθήκες χαμηλού αιολικού δυναμικού 304

Σχήμα 7.30: Όπως στο Σχήμα 7.29, αλλά σε συνθήκες υψηλού αιολικού δυναμικού 304

Σχήμα 7.31 : Μεταβολή του κόστους παραγωγής με την αύξηση των ωρών απορρίψεων φορτίου σε περιπτώσεις χαμηλού, μέτριου και υψηλού αιολικού δυναμικού 306

Σχήμα 7.32: Ισοζύγιο ενέργειας τις ώρες απόρριψης φορτίου στο σταθμό της Καστοριάς σε συνθήκες χαμηλού αιολικού δυναμικού 306

Σχήμα 7.33: Επίδραση της επιδότησης του αρχικού κόστους του υβριδικού συστήματος στο κόστος παραγωγής για πλήρη αυτονομία στις περιπτώσεις χαμηλού και υψηλού αιολικού/ηλιακού δυναμικού 307

Σχήμα 7.34: Επίδραση της επιδότησης του αρχικού κόστους του υβριδικού συστήματος στο κόστος παραγωγής – περίπτωση επιτρεπόμενης απόρριψης φορτίου έως 24 ώρες το έτος (α) και επιπρόσθετα επιλογή αποθήκευσης κόστους μειωμένο κατά 50% (β) στις περιπτώσεις χαμηλού και υψηλού αιολικού/ηλιακού δυναμικού 308

Σχήμα 7.35: Μείωση κόστους παραγωγής με επιδότηση 50% για διαφορετικά σενάρια κόστους και λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων σε σχέση με την αρχική τιμή στις περιπτώσεις χαμηλού και υψηλού αιολικού/ηλιακού δυναμικού 308

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.I: Στοιχεία σταθμών του Σχήματος 1.1 39

Πίνακας 1.II: Στατιστικά χαρακτηριστικά των πρωτογενών μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ για την περίοδο 1985-1999 45

Πίνακας 1.III: Στατιστικά χαρακτηριστικά πρωτογενών μετρήσεων σχετικής υγρασίας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999 48

Πίνακας 1.IV: Στατιστικά χαρακτηριστικά πρωτογενών μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999, μετά από την αφαίρεση των ακραίων τιμών 51

Πίνακας 1.V: Στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο 1985-1999 53

Πίνακας 1.VI: Αριθμός τιμών 3-ωριαιας μεταβολής των μετεωρολογικών παραμέτρων που ελέγχθησαν 57

Πίνακας 2.I: Πληρότητα (%) ανά μήνα τεσσάρων σταθμών με τη χαμηλότερη μέση πληρότητα 3-ωριαίας καταγραφής μετεωρολογικών παραμέτρων 65

Πίνακας 2.II: Πληρότητα καταγραφής μετεωρολογικών μετρήσεων σταθμών ανά ώρα παρατήρησης 66

Πίνακας 2.III: Στατιστική αξιολόγηση μεθόδων συμπλήρωσης τριών διαδοχικών μετρήσεων 70

Πίνακας 2.IV: Συντελεστές της αρμονικής συνάρτησης ενδοημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας αέρα του μήνα Ιανουαρίου για τις ημέρες με χαμηλή ηλιοφάνεια 74

Πίνακας 2.V: Συντελεστές της αρμονικής συνάρτησης ενδοημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας αέρα του μήνα Δεκεμβρίου σε ημέρες υψηλής ηλιοφάνειας 75

Πίνακας 2.VI: Συντελεστές της αρμονικής συνάρτησης ενδοημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας αέρα του μήνα Ιουλίου σε ημέρες υψηλής ηλιοφάνειας 76

Πίνακας 2.VII: Αξιολόγηση της συνάρτησης παλινδρόμησης στην ακρίβεια συμπλήρωσης τιμών θερμοκρασίας αέρα για το μήνα Οκτώβριο στο σταθμό της Λήμνου 78

Πίνακας 2.VIII: Δείκτες αξιολόγησης του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συμπλήρωση ελλειπουσών 3-ωριαίων παρατηρήσεων το μήνα Φεβρουάριο 1994 στο σταθμό του Αράξου 88

Πίνακας 2.IX: Στοιχεία μοντέλων παλινδρόμησης κάθε σταθμού 94

Πίνακας 2.X: Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης μοντέλων παλινδρόμησης 96

Πίνακας 2.XI: Σύγκριση μεθόδων μετατροπής 3-ωριαίας χρονοσειράς μετρήσεων σχετικής υγρασίας σε ωριαία 100

Πίνακας 3.I: Τυπικές τιμές της εμπειρικής παραμέτρου K για διάφορα γεωγραφικά πλάτη 110

Πίνακας 3.II: Τιμές των συντελεστών A, B, C και D της γενικής σχέσης διαπερατότητας της ατμόσφαιρας για τα μόρια των διαφόρων συστατικών της.....111

Πίνακας 3.III: Τιμές ολικής συγκέντρωσης μορίων, l_i, του εκάστοτε συστατικού της ατμόσφαιρας σε κατακόρυφη ατμοσφαιρική στήλη 111

Πίνακας 3.IV: Πρόσθετα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται από το μοντέλο MRM.....117

Πίνακας 3.V: Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης από το μοντέλο MRM τιμών ηλιακής ακτινοβολίας για διαφορετικής διάρκειας δεδομένα ηλιοφάνειας 122

Πίνακας 3.VI: Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης από το μοντέλο MRM τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με την ύπαρξη ή μη μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης.....124

Πίνακας 3.VII: Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης από το μοντέλο MRM τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με χρήση δεδομένων ή υπολογισμό των τιμών της στήλης ατμοσφαιρικού O_3 126

Πίνακας 3.VIII: Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης από το μοντέλο MRM τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με χρήση διαφορετικών τιμών στήλης CO_2 στην ατμόσφαιρα 127

Πίνακας 3.IX: Αποτελέσματα αξιολόγησης της ακρίβειας του μοντέλου MRM, στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ για το έτος 2005, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή λευκαύγειας του εδάφους 127

Πίνακας 3.X: Χαρακτηριστικά της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα, την περίοδο 1985-1999, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM 128

Πίνακας 4.I: Βιβλιογραφικές αναφορές δημιουργίας TME 140

Πίνακας 4.II: Σταθμικοί συντελεστές για την επιλογή του TME.....147

Πίνακας 4.III: Σταθμικοί συντελεστές για τη δημιουργία TME (αναπαραγωγή πίνακα από τους Argiriou et al. 1999) 149

Πίνακας 4.IV: Πίνακας κατάταξης TME (αναπαραγωγή πίνακα από τους Argiriou et al. 1999)....150

Πίνακας 4.V: Πίνακας συνολικής κατάταξης TME (αναπαραγωγή από Argiriou et al. 1999) 151

Πίνακας 4.VI: Σταθμικοί συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή TME 153

Πίνακας 4.VII: Πίνακας πληρότητας ανά μήνα της ωριαίας χρονοσειράς του σταθμού Καστοριάς 154

Πίνακας 4.VIII: Πληρότητα ανά μήνα της χρονοσειράς του σταθμού της Σούδας 154

Πίνακας 4.IX: Πληρότητα της βάσης δεδομένων εισαγωγής στη διαδικασία επιλογής TME 155

Πίνακας 4.X: Σταθμικά αθροίσματα WS του σταθμού Αγχιάλου 158

Πίνακας 4.XI: Σταθμικοί συντελεστές ανά παράμετρο.....159

Πίνακας 4.XII: Τελική βαθμολογία και επιλογή TMM για το σταθμό Αγχιάλου 159

Πίνακας 4.XIII: Μήνες που εμφανίζουν ελάχιστο σταθμικό άθροισμα WS σε αντιστοιχία με τους μήνες που εμφανίζουν την υψηλότερη σύνθετη βαθμολογία SS.....160

Πίνακας 4.XIV: Επιλογή μηνών που συγκροτούν το TME για το σταθμό Αγχιάλου.....161

Πίνακας 4.XV: Στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας των αποτελεσμάτων συγκρότησης ΤΜΕ....164

Πίνακας 4.XVI: Στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας ΤΜΕ επιλεγμένων σταθμών....165

Πίνακας 4.XVII: Μέση μηνιαία θερμοκρασία (^oC)....168

Πίνακας 4.XVIII: Μηνιαία διάχυτη ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο ($kWh/m^2/mo$)....169

Πίνακας 4.XIX: Μηνιαία ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο ($kWh/m^2/mo$)....170

Πίνακας 5.I: Στατιστικοί δείκτες μηνιαίων και ετήσιων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο στους 39 επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς....178

Πίνακας 5.II: Τιμές του δείκτη Moran's I των μηνιαίων και ετήσιων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 υπό μελέτη μετεωρολογικών σταθμών....193

Πίνακας 5.III: Συνοπτικός πίνακας κατάλληλων μεθόδων χωρικής παρεμβολής για περιβαλλοντικές εφαρμογές....194

Πίνακας 5.IV: Μέγιστα σφάλματα εκτίμησης της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας με τη μέθοδο IDW....200

Πίνακας 5.V: Αξιολόγηση των τεσσάρων συναρτήσεων πυρήνα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της LPI στις ετήσιες τιμές ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών....202

Πίνακας 5.VI: Μετεωρολογικοί σταθμοί με τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας που προέκυψαν με τη μέθοδο LPI....204

Πίνακας 5.VII: Μετεωρολογικοί σταθμοί με τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας που προέκυψαν με τη μέθοδο OK....210

Πίνακας 5.VIII: Μετεωρολογικοί σταθμοί με τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου EBK....213

Πίνακας 5.IX: Συγκεντρωτικός πίνακας μετεωρολογικών σταθμών που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης (επί τοις εκατό) στην εφαρμογή των μεθόδων χωρικής παρεμβολής....215

Πίνακας 5.X: Συγκεντρωτικός πίνακας δεικτών αξιολόγησης της ικανότητας των μοντέλων χωρικής παρεμβολής στην εκτίμηση τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των 39 επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών....216

Πίνακας 5.XI: Αξιολόγηση της εκτίμησης τιμών μηνιαίας ηλιακής ενέργειας με την εφαρμογή της EBK στις τιμές των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών....218

Πίνακας 6.I: Αριθμητικές τιμές των παραμέτρων των σχέσεων 6.25 έως 6.28....264

Πίνακας 7.I: Τιμές συντελεστή ισχύος και μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου για τις υπό μελέτη περιπτώσεις αιολικού δυναμικού....285

Πίνακας 7.II : Απαιτούμενη Φ/Β ισχύς για την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων αποθήκευσης προς επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας....292

Πίνακας 7.III: Τιμές επιτοκίων της οικονομικής ανάλυσης....296

Πίνακας 7.IV: Συντελεστές υπολογισμού του μεταβλητού κόστους συντήρησης και λειτουργίας του υβριδικού συστήματος....296

Πίνακας Συμβόλων Βασικών Μεγεθών

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
c	Κόστος ενέργειας	*€/kWh*
CF	Συντελεστής φορτίου ενεργειακής μονάδας	
D	Ημερήσια γωνία	*rad*
DN	Αύξων αριθμός της ημέρας του έτους (Ιουλιανή ημέρα)	
DOD	Βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών	
e	Μερική πίεση (τάση) των υδρατμών	*Pa*
e_s	Πίεση των κορεσμένων υδρατμών	*hPa*
es	Τάση των κορεσμένων υδρατμών	*Pa*
FC	Σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας	
FS	Στατιστικός συντελεστής Finkelstein-Schäfer της μεθόδου Sandia για τη συγκρότηση ΤΜΕ	
g	Πληθωρισμός	
h	Ύψος τοποθέτησης πτερωτής της Α/Γ	*M*
h_o	Ώρες αυτονομίας συσσωρευτών	*h*
I	Ένταση ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο	W/m^2
… με δείκτη b	… άμεση	W/m^2
… με δείκτη d	… διάχυτη	W/m^2
… με δείκτη dm	… συνιστώσα διάχυτης ηλιακή ακτινοβολίας που προέρχεται από πολλαπλή ανάκλαση της άμεσης ακτινοβολίας	W/m^2
… με δείκτη ds	… συνιστώσα διάχυτης ηλιακή ακτινοβολίας που προέρχεται από σκέδαση της άμεσης ακτινοβολίας από τα μόρια της ατμόσφαιρας και τα σωματίδια των αερολυμάτων	W/m^2
… με δείκτη ex	… στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας	W/m^2
… με δείκτη T	… σε κεκλιμένο επίπεδο	W/m^2
… με τόνο	… υπό νεφοσκεπή ουρανό	W/m^2
i	Κόστος κεφαλαίου	
IC	Αρχικό κόστος	*€*
I_{mod}	Ένταση Φ/Β πλαισίου	*A*
l_i	Ολική συγκέντρωση των μορίων του εκάστοτε συστατικού *i* της ατμόσφαιρας	*cm* *atm-cm*

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
m	Οπτική αέρια μάζα	
... με τόνο	... διορθωμένη ως προς την πίεση	
m	Συντελεστής σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας	
n	Έτη λειτουργίας ενεργειακής μονάδας	
P	Ατμοσφαιρική πίεση	*hPa*
... με δείκτη o	... στη μέση στάθμη της θάλασσας	*hPa*
P_{mod}	Ισχύς Φ/Β πλαισίου	*W*
$P_{PV\,0}$	Ονομαστική ισχύς Φ/Β μονάδας	*W*
$P_{W\,0}$	Ονομαστική ισχύς Α/Γ	*W*
Q	Χωρητικότητα συσσωρευτών	*Ah*
RH	Σχετική υγρασία	
r_k	Συντελεστής κόστους αντικατάστασης του εξοπλισμού k της ενεργειακής μονάδας	
SD	Ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας	*h*
... με δείκτη t	... μέγιστη (αστρονομική) διάρκεια ηλιοφάνειας	*h*
T	Θερμοκρασία αέρα	^oC
t_a	Θερμοκρασία αέρα (Υβριδικά Συστήματα)	^{o}
T_{aa}	Συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης από ατμοσφαιρικά αερολύματα	
T_{as}	Συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω σκέδασης των αερολυμάτων	
T_c	Συντελεστής διαπερατότητας των νεφών στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία	
t_c	Θερμοκρασία επιφάνειας Φ/Β πλαισίου	^{o}
T_{H_2O}	Συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης από τους υδρατμούς	
T_{mg}	Συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης από τα ομοιόμορφα κατανεμημένα αέρια	
$T_{O\,3}$	Συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης από το όζον	
T_r	Συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω σκέδασης Rayleigh	
U_{DC}	Τάση συστήματος	*V*
U_{mod}	Τάση Φ/Β πλαισίου	*V*
V	Ταχύτητα ανέμου	*m/s*
VC	Μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας	

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
WS	Σταθμικός συντελεστής της μεθόδου Sandia για τη συγκρότηση ΤΜΕ	
z	Αριθμός Φ/Β πλαισίων	
… με δείκτη 1	… στοιχειοσειράς	
… με δείκτη 2	… παράλληλες στοιχειοσειρές	
α	Ύψος του ήλιου	^{o}
γ	Ποσοστό επιδότησης	
Δ	Τεχνική διαθεσιμότητα Α/Γ	
E_d	Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τον καταναλωτή	*Wh*
E_{pv}	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από Φ/Β	*Wh*
E_w	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από Α/Γ	*Wh*
H	Μηνιαία ή ετήσια τιμή ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο επίπεδο	kWh/m^2
η_{dst}	Συντελεστής απόδοσης ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή τής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων λόγω επικάθησης σκόνης	
η_{inv}	Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα	
$\eta_{PV_{ag}}$	Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη γήρανση των Φ/Β	
η_{shd}	Συντελεστής απόδοσης λόγω σκίασης των Φ/Β πλαισίων	
η_{ss_o}	Συνολικός βαθμός απόδοσης συστήματος αποθήκευσης	
η_{UPS}	Βαθμός απόδοσης του σταθεροποιητή τάσης	
ϑ	Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια	^{o}
ϑ_z	Ηλιακή ζενίθια γωνία	^{o}
ρ_a	Λευκαύγεια της ατμόσφαιρας (ή πυκνότητα του αέρα)	(kg/m^3)
$\rho_{a\alpha}$	Λευκαύγεια λόγω σκέδασης από τα αερολύματα της ατμόσφαιρας	
ρ_c	Συντελεστής λευκαύγειας των νεφών	
ρ_g	Λευκαύγεια του εδάφους	
ρ_α	Πυκνότητα του υγρού αέρα	kg/m^3
ρ_v	Πυκνότητα των υδρατμών	kg/m^3
T_α	Συντελεστής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης από ατμοσφαιρικά αερολύματα	
T_α	Θερμοκρασία αέρα	K
φ	Γεωγραφικό πλάτος	^{o}
ω	Συντελεστής ισχύος Α/Γ	

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
β	Παράμετρος θόλωσης Ångström (Υπολογισμός Ηλιακής Ακτινοβολίας)	
β	Γωνία κλίσης Φ/Β πλαισίων (Υβριδικά Συστήματα)	^{o}

Συντομογραφίες, Συντμήσεις, Αρκτικόλεξα

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CDF	Cumulative distribution function
DRY	Design Reference Year
EBK	Empirical Bayesian Kriging
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
IA	Index of Agreement
IDW	Inverse Distance Weighted
IEA	International Energy Agency
LPI	Local Polynomial Interpolation
MBE	Mean Bias Error
MRM	Meteorological Radiation Model
NCDC	National Climatic Data Center (USA)
NOA	National Observatory of Athens
NREL	National Renewable Energy Laboratory (USA)
OK	Ordinary Kriging
PVGIS	Photovoltaic Geographic Information System
RMSD	Root Mean Square Difference
RMSE	Root Mean Square Error
TMY	Typical Meteorological Year
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer
TRY	Test Reference Year
UTC	Coordinated Universal Time
WYEC	Weather Year for Energy Calculations
Α/Γ	Ανεμογεννήτρια/τριες
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
ΕΜΥ	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία

ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ	Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών
ΚΕΝΑΚ	Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων
ΤΜΕ	Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος
ΤΜΜ	Τυπικός Μετεωρολογικός Μήνας
ΤΟΤΕΕ	Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό/κα

Απόδοση Ορολογίας στα Ελληνικά

Albedo	Λευκαύγεια
Artificial neural networks	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα
Classical least squares univariate parametric regression	Κλασσική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων μονοπαραγοντικής παραμετρικής παλινδρόμησης
Cumulative Distribution Function	Συνάρτηση αθροιστικής κατανομής
Design Reference Year	Πρότυπο Έτος Αναφοράς
Empirical Bayesian Kriging	Εμπειρική κατά Bayes μέθοδος kriging
Expectation-maximization	Μεγιστοποίηση της προσδοκίας
Index of Agreement	Δείκτης συμφωνίας
Instance based learning and additive regression	Μέθοδος στιγμιαίας μάθησης και προσθετικής παλινδρόμησης
Inverse Distance Squared Weighted	Αντίστροφη τετραγωνική σταθμισμένη απόσταση
Inverse Distance Weighted	Αντίστροφη σταθμισμένη απόσταση
Listwise deletion	Διαγραφή καταλόγου
Local Polynomial Interpolation	Τοπική πολυωνυμική παρεμβολή
Look-up-tables	Πίνακες αναζήτησης
Maximum likelihood estimation	Εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας
Mean Bias Error	Μέσο σφάλμα προκατάληψης
Mean Standardized Error	Μέσο τυποποιημένο σφάλμα
Mean substitution	Αντικατάσταση με το μέσο
Model trees	Δένδρα προσομοίωσης

Multiple imputation	Πολλαπλός καταλογισμός
Ordinary Kriging	Συνήθης kriging
Pairwise deletion	Διαγραφή κατά ζεύγη
Ranked regression	Παλινδρόμησης κατάταξης
Residual Kriging	Μέθοδος kriging με απομάκρυνση των υπολοίπων
Root Mean Square Difference	Ρίζα της μέσης τετραγωνικής διαφοράς
Root Mean Square Error	Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος
Run lengths	Μήκη διαδρομών
Splines	Κυβικές τμηματικά πολυωνυμικές καμπύλες
Test Reference Year	Δοκιμαστικό Έτος Αναφοράς
Turbidity parameter	Παράμετρος θόλωσης
Typical Meteorological Year	Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος
US National Climatic Data Center	Εθνικό Κέντρο Κλιματικών Δεδομένων των ΗΠΑ
Weather Year for Energy Calculations	Έτος Καιρού για Ενεργειακούς Υπολογισμούς
Weighted equation	Σταθμική συνάρτηση
Weighted sum	Σταθμικό άθροισμα

Σύγχρονος Ηλιακός Χάρτης της Ελλάδος με Εφαρμογή σε Υβριδικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Κοσμάς Α. Καββαδίας

Διδακτορική Διατριβή

Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή έχει δύο διακριτούς στόχους. Ο πρώτος στόχος αφορά στη δημιουργία αξιόπιστων χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων, οι οποίες απαιτούνται κατά την προσομοίωση της λειτουργίας υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αλλά και γενικότερα στη μακροχρόνια αξιολόγηση ηλιακών συστημάτων. Ο δεύτερος στόχος αφορά στη διερεύνηση της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης των υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ στον ελλαδικό χώρο αξιοποιώντας τη βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της διατριβής.

Για την επίτευξη των στόχων, πραγματοποιήθηκε έρευνα σε διάφορα πεδία συμβάλλοντας στη διάδοση της επιστημονικής γνώσης σε κάθε ένα από αυτά. Ειδικότερα, η παρούσα διατριβή περιλαμβάνει μία δομημένη μεθοδολογία για τη δημιουργία αξιόπιστων χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων και τυπικών μετεωρολογικών ετών (ΤΜΕ), τα κριτήρια και τη μέθοδο χωρικής παρεμβολής που μπορούν με αξιοπιστία να περιγράψουν τη χωρική κατανομή του ηλιακού δυναμικού στην ελληνική επικράτεια, συγκεκριμένη μεθοδολογία για την ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ που αξιοποιούν την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, την ενεργειακή και οικονομική απόδοση των υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ σε διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας με καθορισμό των όριων μεταβολής τού μεγέθους και του κόστους που επιτυγχάνεται υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργία τους.

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, συλλέχθηκαν 3-ωριαίες χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων καθώς και ημερήσιων τιμών ηλιοφάνειας για 15 έτη, από 44 σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) που διαθέτουν μακροχρόνιες παρατηρήσεις ηλιοφάνειας. Οι μετρήσεις αυτές, μετά από ποιοτικό έλεγχο, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο Μετεωρολογικό Μοντέλο Ακτινοβολίας (Meteorological Radiation Model, MRM), το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Ατμοσφαιρικής Έρευνας του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, εμπλουτίζοντας τη βάση δεδομένων με τιμές ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στη θέση του κάθε μετεωρολογικού σταθμού.

Αξιοποιώντας τις μακροχρόνιες χρονοσειρές μετεωρολογικών παραμέτρων, δημιουργήθηκαν Τυπικά Μετεωρολογικά Έτη (ΤΜΕ) για κάθε έναν από τους σταθμούς. Τα ΤΜΕ περιλαμβάνουν ωριαίες τιμές άμεσης, διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης.

Από τα ΤΜΕ δημιουργήθηκε επικαιροποιημένος ηλιακός χάρτης της Ελλάδας, με μηνιαίες και ετήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ. Ο χάρτης αυτός αποτελεί μία σύγχρονη αποτύπωση του ηλιακού δυναμικού στην ελληνική επικράτεια και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς η γεωφυσική θέση της Ελλάδας την καθιστά μία από τις περιοχές της Ευρώπης με εξαιρετικό ενδιαφέρον στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Παράλληλα, ο επιμερισμός της Ελλάδας σε κλιματικές ζώνες ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί

βασική παράμετρο για την προκαταρκτική αξιολόγηση και μοντελοποίηση των ηλιακών συστημάτων παραγωγής ενέργειας.

Για την ανάδειξη της χρησιμότητας των ΤΜΕ σε εφαρμοσμένους τομείς της επιστήμης, η βάση δεδομένων ΤΜΕ χρησιμοποιείται σε μια εκτεταμένη έρευνα που αφορά στην αξιολόγηση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων που αξιοποιούν κατά βάση την ηλιακή ενέργεια αλλά και τον άνεμο συνδυάζοντας φωτοβολταϊκά πλαίσια και ανεμογεννήτριες. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται βάσει ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού και οικονομικού μοντέλου, το οποίο εξετάζει σε ωριαίο βήμα την ενεργειακή συμπεριφορά του υβριδικού συστήματος και υπολογίζει το μακροχρόνιο κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα εξετάζονται σε διαφορετικές θέσεις στην Ελλάδα με βασικό κριτήριο την παροχή αδιάλειπτης ηλεκτρικής ενέργειας σε οικιακό καταναλωτή ο οποίος επιλέγει να καλύψει τις ηλεκτρικές του ενεργειακές ανάγκες αποκλειστικά από ΑΠΕ.

Εν κατακλείδι, η καινοτομία της παρούσας διατριβής και η συνεισφορά της στην επιστημονική γνώση συνίστανται στα εξής:

- Δημιουργήθηκαν για πρώτη φορά στην Ελλάδα ΤΜΕ που καλύπτουν σε μεγάλο ποσοστό την ελληνική επικράτεια.
- Η διαθεσιμότητα ΤΜΕ σε μεγάλο εύρος περιοχών αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη ενεργειακής κατανάλωσης των κτηρίων και της ενεργειακής παραγωγής συστημάτων ΑΠΕ καθώς έως και σήμερα οι αντίστοιχες μελέτες βασίζονται σε παλαιά δεδομένα και σε μικρό αριθμό περιοχών, που δεν καλύπτουν επαρκώς την ελληνική επικράτεια.
- Χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στην Ελλάδα ο κώδικας MRM για την παραγωγή τιμών ηλιακής ακτινοβολίας σε περιοχές που δεν υφίστανται αντίστοιχες μετρήσεις.
- Δημιουργήθηκαν ηλιακοί χάρτες για την ελληνική επικράτεια, που για πρώτη φορά βασίζονται σε μεγάλο αριθμό δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας, με συνέπεια να καθίστανται πιο ακριβείς σε σχέση με τους υπάρχοντες στη βιβλιογραφία.
- Αξιολογείται η ενεργειακή και η οικονομική απόδοση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ που συνδυάζουν Φ/Β πλαίσια και Α/Γ με τη χρήση χρονοσειρών ΤΜΕ, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες αξιοποίησής τους στις διαφορετικές κλιματικές ζώνες της Ελλάδας.

Contemporary Solar Energy Map of Greece with Application in Hybrid Renewable Energy Systems

Kosmas A. Kavadias

PhD Thesis

Department of Physics
University of Ioannina

Abstract

The specific PhD thesis has two discrete objectives. The first objective concerns the creation of a reliable database of meteorological parameters. The developed database can be used to support the advanced simulation of the operation of Renewable Energy Sources (RES) hybrid systems which utilize solar energy and also for the long term assessment of solar energy systems' performance. The second objective concerns the evaluation of RES hybrid systems in Greece in terms of both energy performance and economic efficiency by implementing the database created in the context of the first objective of the thesis.

More specifically, this thesis includes: a structured methodology that can be applied in order to create reliable time series of meteorological parameters and Typical Meteorological Years (TMY); the criteria and the method of geospatial interpolation, which can reliably describe the spatial distribution of the solar energy potential in Greece; a defined methodology for the evaluation of efficiency and energy consumption of RES hybrid systems that utilize solar and wind energy; the energy and efficiency performance of hybrid RES systems in different regions of Greece through the identification of limits in size and costs that can be achieved under specific circumstances.

For the above mentioned objectives, 3-hour time series of meteorological data have been collected along with daily sunshine values, for a period of 15 years, from 44 different meteorological stations of the Hellenic National Meteorological Service (HNMS). The meteorological stations were chosen on the basis of long-term availability of sunshine observations, since sunshine is the basic parameter in calculating the solar radiation from the broadband atmospheric model used in this thesis. These measurements, having undergone quality control, have been used as input data at the Meteorological Radiation Model (MRM), which has been developed by the Atmospheric Research Team of the National Observatory of Athens. With the use of the MRM, the diffuse and global radiation for each meteorological station and time period under study were estimated at the horizontal plane, allowing in this way to enrich the initial database.

By implementing the long term data series of meteorological parameters, Typical Meteorological Years (TMY) were produced for each one of the corresponding stations. The TMY includes values of direct, diffuse and global solar radiation, air temperature, relative humidity and atmospheric pressure.

Based on the TMY an updated solar map of Greece was created, containing monthly and annual values of solar energy at the locations of the chosen meteorological stations of the HNMS. This map provides an up to date description of the solar potential in Greece and is of particular interest since Greece's geographical location renders it as one of the most interesting areas of Europe with a special interest in the utilization of solar energy. Additionally, the definition of solar energy zones

provides a fundamental parameter for the initial assessment of solar energy systems as well as for their modeling.

TMY were used for the evaluation of autonomous hybrid systems that utilize mainly solar, but also wind energy, through a combination of photovoltaic panels and wind turbines. The evaluation is conducted on the basis of a complete energy and efficiency model, through which examination of the hybrid systems' hourly performance is carried out, and which in turn can allow evaluation in terms of energy production costs. The hybrid systems considered cover different locations throughout Greece and are dedicated to the complete satisfaction of a typical, domestic consumer's energy needs, solely with use of RES.

In conclusion, the specific thesis contributes to scientific knowledge and applied engineering by providing TMY which cover almost the whole Greek territory, by highlighting the reliability of the MRM code which is applied in numerous locations where solar radiation measurements do not exist, by producing solar maps which are based on a large amount of solar energy data and by reflecting the energy and economic sustainability of RES hybrid systems which consider solar and wind energy assessment based on reliable meteorological data.

Εισαγωγή

Ο άνθρωπος επιδόθηκε τις τελευταίες δεκαετίες σε εκτεταμένη χρήση ενέργειας, καθώς την συνέδεσε με το βιοτικό του επίπεδο. Η παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα, καθώς αυτά παρουσιάζουν υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο και ευκολία στη χρήση τους. Αυτές οι ενεργειακές επιλογές είχαν ως αποτέλεσμα την εντατικοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, περιορίζοντας αισθητά τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων. Παράλληλα, η εξόρυξη, η μεταφορά και η ενεργειακή μετατροπή των ορυκτών καυσίμων έχουν προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στην ποιότητα του περιβάλλοντος. Σύμφωνα με ολοένα αυξανόμενες ενδείξεις, η χρήση των ορυκτών καυσίμων συνδέεται άμεσα με την κλιματική αλλαγή και με την επιτάχυνση της εξέλιξης του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου. Η παγκόσμια ενεργειακή αγορά βρίσκεται σε κρίσιμο ιστορικά σημείο, καθιστώντας αναγκαία τη μεταστροφή του συμβατικού ενεργειακού μοντέλου προς καθαρές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Ωστόσο, η συμμετοχή των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο παραμένει ακόμα και σήμερα περιορισμένη, κυρίως λόγω του αυξημένου αρχικού κόστους επένδυσης που απαιτείται, αλλά και της στοχαστικής συμπεριφοράς, καθώς η παραγωγή τους εξαρτάται από μια σειρά μετεωρολογικών, γεωλογικών και εν γένει φυσικών παραγόντων που ο άνθρωπος δεν μπορεί να ελέγξει στο βαθμό που τον ικανοποιεί (ταχύτητα ανέμου, παροχή ποταμού, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας κ.λπ.).

Το μειονέκτημα της διαλειπτόμενης παραγωγής των ΑΠΕ είναι εντονότερο σε μικρά αυτόνομα ηλεκτρικά δίκτυα˙ μπορεί, ωστόσο, να αντιμετωπισθεί σε μεγάλο βαθμό με συνδυασμό περισσότερων της μιας τεχνολογιών ΑΠΕ (υβριδικά συστήματα ΑΠΕ). Με τα υβριδικά συστήματα ΑΠΕ επιτυγχάνεται άρση των περιορισμών, που διέπουν τη λειτουργία τής κάθε μιας μονάδας ξεχωριστά, καθώς η μία πηγή ενέργειας συμπληρώνει την έλλειψη διαθεσιμότητας της άλλης. Για τη συμπίεση του κόστους της αρχικής επένδυσης εγκατάστασης ενός υβριδικού συστήματος ΑΠΕ απαιτείται αναλυτική προσομοίωση πολλαπλών συνδυασμών των μονάδων παραγωγής που το συνθέτουν (ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά πλαίσια κ.λπ.), προκειμένου να εντοπισθεί ο συνδυασμός που θα παρέχει τη μέγιστη ενεργειακή παραγωγή με το ελάχιστο κόστος. Η προσομοίωση των υβριδικών συστημάτων, στα οποία συμπεριλαμβάνονται μονάδες αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας, απαιτεί, εκτός των άλλων παραμέτρων, γνώση του ηλιακού δυναμικού στην περιοχή εγκατάστασης.

Η διαθεσιμότητα μακροχρόνιων και αξιόπιστων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας, σε ευρύ φάσμα περιοχών, αποτελεί ακόμη και σήμερα μείζον πρόβλημα για τους μελετητές, λόγω της μικρής πυκνότητας ηλιακών σταθμών ανά τον κόσμο. Η ανάπτυξη των ΑΠΕ, σε συνδυασμό με την έλλειψη εκτεταμένων μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας, οδήγησε τα τελευταία χρόνια τους ερευνητές στην ανάπτυξη μοντέλων ικανών να εκτιμήσουν την ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης. Από τα διαφορετικά μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί, ξεχωρίζουν τα ατμοσφαιρικά, τα οποία βασίζονται στον υπολογισμό τής απορρόφησης και της σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα συστατικά της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, τα μοντέλα χρησιμοποιούν μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων του τόπου εφαρμογής (π.χ. θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και ηλιοφάνειας), οι οποίες είναι διαθέσιμες σε μεγάλο αριθμό περιοχών καθώς αποτελούν βασικές μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η παρούσα διατριβή έχει δύο διακριτούς στόχους. Πρώτος στόχος είναι η δημιουργία αξιόπιστων χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων που απαιτούνται για την προσομοίωση υβριδικών ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ βασισμένων σε ηλιακά συστήματα. Δεύτερο στόχο αποτελεί η αξιοποίηση των χρονοσειρών που δημιουργήθηκαν στην αξιολόγηση της ενεργειακής παραγωγής και της οικονομικής απόδοσης υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ με τη χρήση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας τους.

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, συλλέγησαν 3-ωριαίες χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων καθώς και ημερήσιων τιμών ηλιοφάνειας για 15 έτη, από 44 σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ). Επιλέχθηκαν σταθμοί που διαθέτουν μακροχρόνιες παρατηρήσεις ηλιοφάνειας, καθώς η ηλιοφάνεια αποτελεί βασική παράμετρο στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας από το Μετεωρολογικό Μοντέλο Ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή. Οι μετρήσεις αυτές, μετά από ποιοτικό έλεγχο, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο, γνωστό στη βιβλιογραφία ως Meteorological Radiation Model (MRM), το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Ατμοσφαιρικής Έρευνας του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Το MRM υπολογίζει για κάθε χρονικό βήμα τη διάχυτη και ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στη θέση του κάθε μετεωρολογικού σταθμού.

Καθώς η αξιολόγηση των υβριδικών, αλλά και γενικά των ενεργειακών συστημάτων, πραγματοποιείται σε μακροχρόνιες περιόδους, η χρήση μιας οποιασδήποτε ετήσιας χρονοσειράς δεδομένων για την ενεργειακή αξιολόγηση ενός συστήματος, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα λόγω της πιθανότητας να περιλαμβάνει ακραίες καιρικές συνθήκες, με μικρή συχνότητα εμφάνισης, διάσπαρτες σε μια μακρά χρονική περίοδο. Παράλληλα, η χρήση μιας μέσης ενδοετήσιας χρονοσειράς δεδομένων καθιστά αδύνατο τον εντοπισμό ακραίων τιμών, οι οποίες πολύ πιθανόν να εμφανιστούν σε κάποιες παραμέτρους. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η παραγωγή ωριαίων χρονοσειρών του Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους (ΤΜΕ) για κάθε έναν από τους σταθμούς. Τα ΤΜΕ συγκροτούνται από 12 μήνες με πραγματικά δεδομένα προερχόμενα από τη διαθέσιμη βάση δεδομένων και αντιπροσωπεύουν τις κλιματολογικές συνθήκες που θεωρούνται χαρακτηριστικές κατά τη διάρκεια της μακρόχρονης περιόδου. Τα ΤΜΕ που δημιουργήθηκαν περιλαμβάνουν τιμές άμεσης, διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης.

Από τα ΤΜΕ δημιουργείται ένας επικαιροποιημένος ηλιακός χάρτης της Ελλάδας, με μηνιαίες και ετήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ. Ο χάρτης αυτός αποτελεί μία σύγχρονη αποτύπωση του ηλιακού δυναμικού στην ελληνική επικράτεια και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς η γεωφυσική θέση της Ελλάδας την καθιστά μία από τις περιοχές της Ευρώπης με εξαιρετικό ενδιαφέρον στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, ειδικότερα στον κτηριακό τομέα, που αφορά στην παραγωγή ηλεκτρισμού, θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού. Επίσης, ο επιμερισμός της Ελλάδας σε κλιματικές ζώνες ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί βασική παράμετρο για την προκαταρκτική αξιολόγηση και μοντελοποίηση των ηλιακών συστημάτων παραγωγής ενέργειας.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται ο πρώτος στόχος της διατριβής. Στη συνέχεια, τα ΤΜΕ χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων τα οποία αξιοποιούν κατά βάση την ηλιακή ενέργεια αλλά και τον άνεμο, συνδυάζοντας φωτοβολταϊκά πλαίσια και ανεμογεννήτριες. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με τη χρήση ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού και οικονομικού μοντέλου, το οποίο εξετάζει, σε ωριαίο βήμα, την ενεργειακή συμπεριφορά του υβριδικού συστήματος και υπολογίζει το μακροχρόνιο κόστος παραγωγής τής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα εξετάζονται σε διαφορετικές θέσεις στην Ελλάδα με βασικό κριτήριο την παροχή αδιάλειπτης ηλεκτρικής ενέργειας σε οικιακό καταναλωτή, ο οποίος επιλέγει να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες αποκλειστικά από ΑΠΕ.

Η δομή της παρούσας διατριβής ακολουθεί τη λογική των ανεξάρτητων Κεφαλαίων που πραγματεύονται συνολικά το ερευνητικό πεδίο που αφορούν. Παρ' όλα αυτά, τα Κεφάλαια, στο σύνολό τους, αποτελούν μια ολοκληρωμένη διατριβή και απαντούν στους στόχους της. Παρουσιάζεται δηλαδή η μεθοδολογία συγκρότησης ΤΜΕ σε τοποθεσίες ομοιόμορφα κατανεμημένες σε μια περιοχή (στην περίπτωση της διατριβής η Ελλάδα), παράγονται τα ΤΜΕ που περιλαμβάνουν και τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και η μεθοδολογία ολοκληρώνεται με την αποτύπωση του ηλιακού δυναμικού της Ελλάδας σε μηνιαία και ετήσια βάση, χρησιμοποιώντας γεωχωρικές στατιστικές μεθόδους. Η διδακτορική διατριβή συμπληρώνεται με τη μελέτη ενός υβριδικού συστήματος που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια και ανεμογεννήτρια.

Κάθε Κεφάλαιο περιέχει ολοκληρωμένη βιβλιογραφία στο πεδίο έρευνας στο οποίο αναφέρεται και παρουσιάζονται σε αυτό αυτοτελή τα αποτελέσματα της αντίστοιχης επεξεργασίας. Στο τέλος των Κεφαλαίων ακολουθεί η σχετική βιβλιογραφία.

Ειδικότερα, το Κεφάλαιο 1 περιλαμβάνει την παρουσίαση των 3-ωριαίων μετεωρολογικών παρατηρήσεων και ημερήσιων τιμών ηλιοφάνειας που συλλέγησαν από τους σταθμούς της ΕΜΥ. Εξετάζεται η πληρότητα των δεδομένων για κάθε σταθμό και για κάθε παράμετρο και πραγματοποιείται ποιοτικός έλεγχός τους με γραφικό αλλά και αναλυτικό τρόπο για τον εντοπισμό ακραίων τιμών. Οι ακραίες τιμές αφαιρούνται από τη βάση, καταλήγοντας σε μια αξιόπιστη βάση 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και ημερήσιων τιμών ηλιοφάνειας.

Στο 2ο Κεφάλαιο εξετάζονται μέθοδοι για τη συμπλήρωση των κενών στις χρονοσειρές των 3-ωριαίων δεδομένων με στόχο να προκύψει μία όσο το δυνατόν πληρέστερη βάση μετεωρολογικών δεδομένων που να εξασφαλίζει περίοδο μεγαλύτερη των 10 ετών, περιόδου που αντιστοιχεί στο ήμισυ του 22-ετούς ηλιακού κύκλου. Το αντικείμενο της έρευνας του 2ου Κεφαλαίου είναι η συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών στις χρονοσειρές των μετεωρολογικών παραμέτρων του Κεφαλαίου 1. Η συμπλήρωση των κενών πραγματοποιείται με συνδυασμό μεθόδων, ανάλογα με την παράμετρο που εξετάζεται, καταλήγοντας σε μια πλήρη βάση 3-ωριαίων τιμών μετεωρολογικών μεγεθών και ημερήσιων τιμών ηλιοφάνειας για τους 39 εκ των 44 μετεωρολογικών σταθμών που μελετούνται. Από τις 3-ωριαίες τιμές παράγονται ωριαίες χρονοσειρές που απαιτούνται στο επόμενο βήμα.

Η βάση δεδομένων που δημιουργείται στο Κεφάλαιο 2, χρησιμοποιείται στο 3ο Κεφάλαιο για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM. Αντικείμενο μελέτης του Κεφαλαίου είναι η αξιοπιστία των μοντέλων υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που περιλαμβάνονται στον MRM, ενώ στη συνέχεια, αξιολογείται η ακρίβεια των τιμών ηλιακής ακτινοβολίας που παράγονται από το μοντέλο σε ετήσια βάση στην περιοχή της Αθήνας. Με εφαρμογή του MRM στις τιμές των παραπάνω χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων σε κάθε έναν εκ των 39 σταθμών συμπληρώνονται αυτές με τιμές διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Το Κεφάλαιο 4 πραγματεύεται τη συγκρότηση ΤΜΕ από τις ωριαίες χρονοσειρές 15-τίας σε κάθε έναν εκ των 39 μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ, με αντικείμενο μελέτης τη σύγκριση των ΤΜΕ με τις πραγματικές χρονοσειρές από τις οποίες προήλθαν. Η συγκρότηση των ΤΜΕ πραγματοποιείται με την τροποποιημένη μέθοδο Sandia, επιλέγοντας κατάλληλους σταθμικούς συντελεστές. Παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία δημιουργίας των ΤΜΕ σε κάθε σταθμό και δημιουργούνται οι ετήσιες ωριαίες χρονοσειρές. Οι μηνιαίες και ετήσιες τιμές των παραμέτρων, που περιλαμβάνονται στα ΤΜΕ, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιούνται από τους Μηχανικούς στη χώρα μας.

Στο 5ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία δημιουργίας των μηνιαίων και ετήσιων χαρτών ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα με τη χρήση των ΤΜΕ. Αντικείμενο μελέτης του συγκεκριμένου

Κεφαλαίου αποτελεί η χωρική ανάλυση και χωρική παρεμβολή των δεδομένων ηλιακής ενέργειας. Το Κεφάλαιο περιλαμβάνει τη χωρική ανάλυση των τιμών ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των σταθμών και την αξιολόγηση των μεθόδων χωρικής παρεμβολής που εξετάζονται. Η μέθοδος με τα καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιείται στην παραγωγή των χαρτών χωρικής κατανομής της ηλιακής ενέργειας στον ελλαδικό χώρο.

Στο 6ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το ενεργειακό και οικονομικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιείται στην αναλυτική προσομοίωση των υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ, με αντικείμενο μελέτης την προσομοίωση λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ. Το μοντέλο χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου τις τιμές των παραχθέντων στο Κεφάλαιο 4 ΤΜΕ, υπολογίζοντας με ωριαίο βήμα την ενεργειακή συμπεριφορά κάθε συνιστώσας από τις οποίες αποτελείται και χρησιμοποιεί τα ετήσια ενεργειακά αποτελέσματα για τον υπολογισμό τού μακροχρόνιου κόστους παραγωγής.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 αναλύεται η ενεργειακή συμπεριφορά διαφορετικών συνδυασμών υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ στις επιλεγείσες θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών. Αντικείμενο μελέτης του Κεφαλαίου αυτού αποτελεί η ενεργειακή και οικονομική απόδοση υβριδικών συστημάτων στον ελλαδικό χώρο. Με την ύπαρξη ΤΜΕ να καλύπτουν ευρύ φάσμα περιοχών τής ελληνικής επικράτειας εντοπίζονται τα όρια μεταβολής τού μεγέθους των επιμέρους συνιστωσών που αποτελούν ένα υβριδικό σύστημα ΑΠΕ. Παράλληλα, παρουσιάζεται η οικονομική απόδοση των υπό εξέταση συστημάτων, καθορίζοντας τα όρια κόστους στα οποία τούτο μπορεί να κινηθεί υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες κάτω από τις οποίες εξετάζεται η λειτουργία των συστημάτων.

1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Δεδομένα

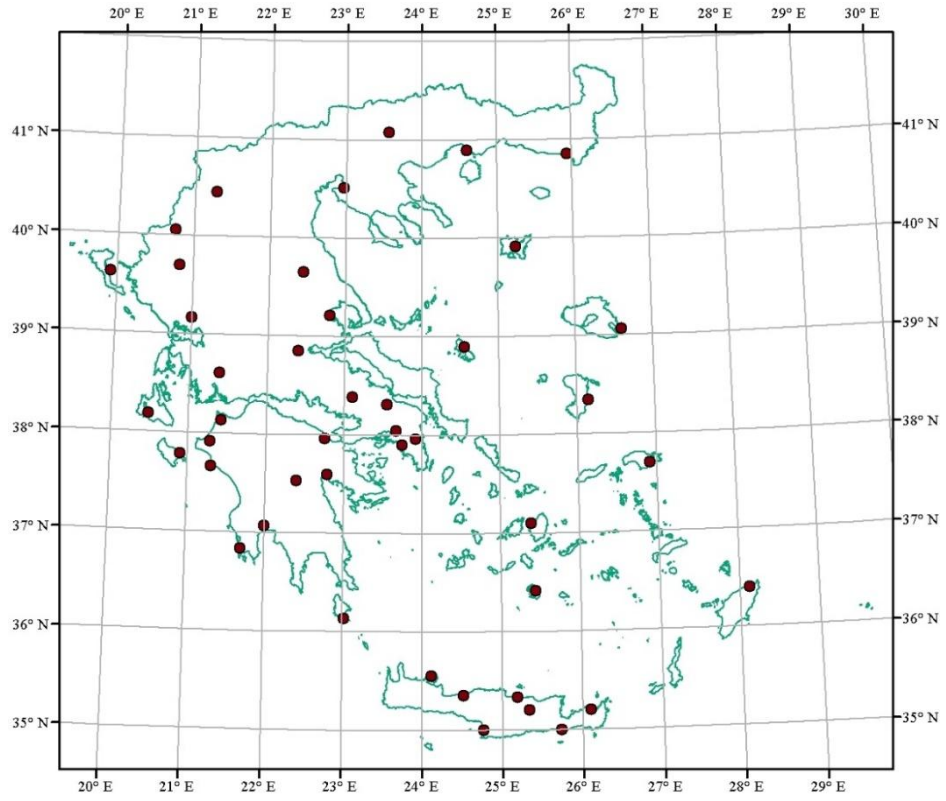
1.1 Συλλογή δεδομένων

Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας, μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή, σε έναν τόπο και σε συγκεκριμένο χρόνο, βασίζονται στον υπολογισμό της απορρόφησης και της σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα συστατικά της ατμόσφαιρας στον εν λόγω τόπο και χρόνο. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η εκτίμηση, είναι απαραίτητη η διαθεσιμότητα μετρήσεων των μετεωρολογικών παραμέτρων του τόπου (π.χ. θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης και διάρκειας ηλιοφάνειας). Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, συλλέχθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από 44 σταθμούς της ΕΜΥ (Πίνακας 1.I και Σχήμα 1.1). Οι συγκεκριμένοι σταθμοί επιλέχθηκαν με βασικό κριτήριο τη διαθεσιμότητα μακροχρόνιων μετρήσεων διάρκειας ηλιοφάνειας, καθώς η ηλιοφάνεια αποτελεί βασική παράμετρο στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας από το ατμοσφαιρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή.

***Πίνακας** 1.I: **Στοιχεία σταθμών του Σχήματος** 1.1*

Α/Α	**Κωδ.**	**Σταθμός**	**Γεωγ. Μηκ.**	**Γεωγ. Πλατ.**	**Υψόμ.** (m)
1	606	Σέρρες	23^0 34' Ε	41^0 05' Ν	34,5
2	614	Καστοριά	21^0 17' Ε	40^0 27' Ν	660,9
3	622	Μίκρα	22^0 58' Ε	40^0 31' Ν	4,8
4	624	Χρυσούπολη Καβάλας	24^0 36' Ε	40^0 54' Ν	4,6
5	627	Αλεξανδρούπολη	25^0 56' Ε	40^0 51' Ν	3,5
6	628	Κόνιτσα	20^0 45' Ε	40^0 03' Ν	542,0
7	641	Κέρκυρα	19^0 55' Ε	39^0 37' Ν	4,0
8	642	Ιωάννινα	20^0 49' Ε	39^0 42' Ν	484,0
9	648	Λάρισα	22^0 27' Ε	39^0 39' Ν	73,6
10	650	Λήμνος	25^0 14' Ε	39^0 55' Ν	4,6
11	654	Άρτα/Χαλκιάδες	21^0 00' Ε	39^0 10' Ν	10,5
12	665	Αγχίαλος	22^0 48' Ε	39^0 13' Ν	15,3
13	667	Μυτιλήνη	26^0 36' Ε	39^0 04' Ν	4,8
14	671	Βέλο	22^0 45' Ε	37^0 58' Ν	20,0
15	672	Αγρίνιο	21^0 23' Ε	38^0 37' Ν	25,0
16	674	Αλίαρτος	23^0 06' Ε	38^0 23' Ν	110,0
17	675	Λαμία	22^0 24' Ε	38^0 51' Ν	17,4
18	682	Ανδραβίδα	21^0 17' Ε	37^0 55' Ν	15,1
19	684	Σκύρος	24^0 33' Ε	38^0 54' Ν	17,9

20	685	Αργοστόλι	20^0 29' E	38^0 11' N	22,0
21	687	Άραξος	21^0 25' E	38^0 08' N	11,7
22	699	Τανάγρα	23^0 33' E	38^0 19' N	139,0
23	701	Ν. Φιλαδέλφεια	23^0 40' E	38^0 03' N	138,0
24	706	Χίος	26^0 09' E	38^0 21' N	4,0
25	707	Πύργος	21^0 18' E	37^0 40' N	12,0
26	710	Τρίπολη	22^0 24' E	37^0 32' N	652,0
27	716	Ελληνικό	23^0 45' E	37^0 54' N	15,0
28	719	Ζάκυνθος	20^0 54' E	37^0 47' N	7,9
29	723	Σάμος	26^0 55' E	37^0 42' N	7,3
30	724	Πυργέλα/Άργος	22^0 47' E	37^0 36' N	11,2
31	726	Καλαμάτα	22^0 00' E	37^0 04' N	11,1
32	732	Νάξος	25^0 23' E	37^0 06' N	9,8
33	734	Μεθώνη	21^0 42' E	36^0 50' N	52,4
34	741	Σπάτα	23^0 55' E	37^0 58' N	67,0
35	743	Κύθηρα	23^0 01' E	36^0 08' N	166,8
36	744	Θήρα	25^0 26' E	36^0 25' N	36,5
37	746	Σούδα	24^0 07' E	35^0 33' N	140,0
38	749	Ρόδος	28^0 07' E	36^0 24' N	11,5
39	754	Ηράκλειο	25^0 11' E	35^0 20' N	39,3
40	756	Ιεράπετρα	25^0 44' E	35^0 00' N	10,0
41	757	Σητεία	26^0 06' E	35^0 12' N	115,6
42	758	Ρέθυμνο	24^0 31' E	35^0 21' N	5,1
43	759	Τυμπάκι	24^0 46' E	35^0 00' N	5,0
44	760	Καστέλι	25^0 20' E	35^0 12' N	335,0



Σχήμα** 1.1: **Χάρτης των χρησιμοποιηθέντων στη διατριβή σταθμών της ΕΜΥ

Οι σταθμοί, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν, είναι κατανεμημένοι σε ολόκληρη την ελληνική επικράτεια· ειδικότερα, 17 σταθμοί στην Ηπειρωτική Ελλάδα, 3 σταθμοί σε νησιά του Ιονίου, 8 σταθμοί στην Πελοπόννησο, 9 σταθμοί σε νησιά του Αιγαίου και 7 σταθμοί στην Κρήτη. Οι σταθμοί καταλαμβάνουν όλο το εύρος του γεωγραφικού πλάτους και μήκους στο οποίο βρίσκεται η Ελλάδα, από 34°Β έως 42°Β και 19°Α έως 30°Α αντίστοιχα. Ανά μοίρα γεωγραφικού πλάτους βρίσκονται τουλάχιστον 5 σταθμοί. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η κατανομή των διαθέσιμων σταθμών είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, καθώς περιλαμβάνει όλη την έκταση της Ελλάδας, ενώ, παράλληλα, η πυκνότητα των σταθμών είναι μεγαλύτερη στα μικρότερα γεωγραφικά πλάτη που αποτελούν περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος, όσον αφορά, κυρίως, στις ηλιακές ενεργειακές εφαρμογές.

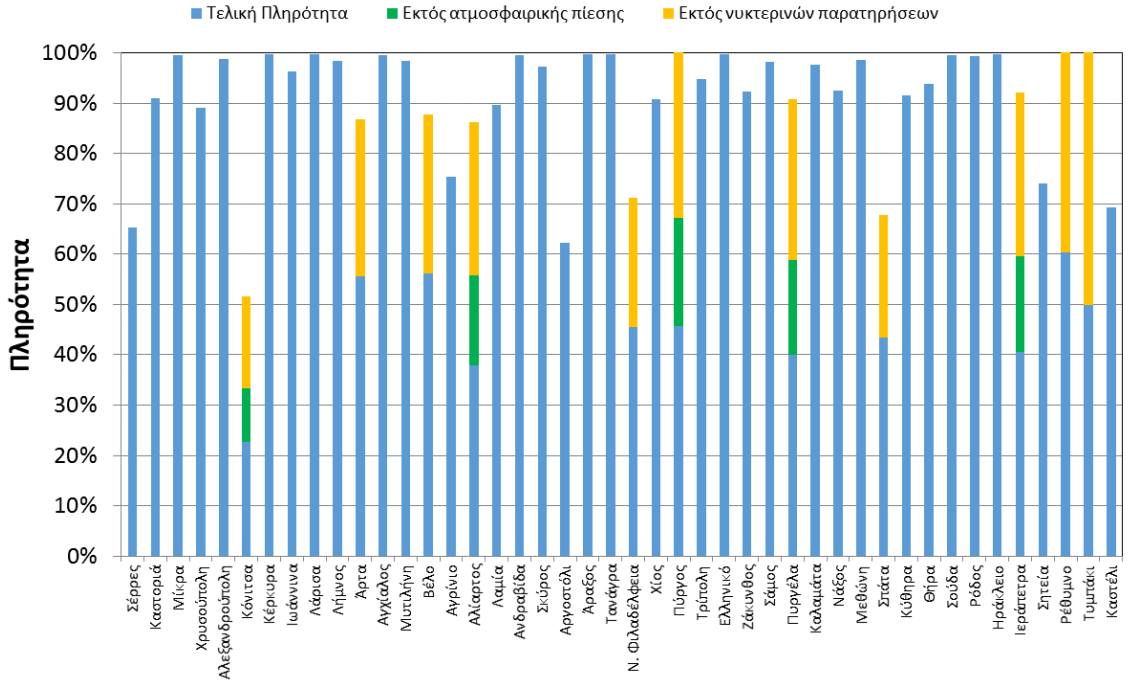
Ως προς το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας (Πίνακας 1.Ι), οι περισσότεροι σταθμοί λειτουργούν σε υψόμετρο μικρότερο των 100 m, ενώ 11 από αυτούς σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 100 m, με την Καστοριά και την Τρίπολη να έχουν τα πρωτεία (660,9 m και 652 m, αντίστοιχα). Ακολουθούν οι σταθμοί της Κόνιτσας (542 m), των Ιωαννίνων (484 m) και του Καστελίου (335 m).

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν είναι χρονοσειρές 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα (°C), ατμοσφαιρικής πίεσης (ανηγμένες στο επίπεδο της θάλασσας, hPa) και σχετικής υγρασίας (%), καθώς επίσης και ημερήσιες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας (h). Τα παραπάνω δεδομένα αφορούν χρονική περίοδο 15 ετών (1985-1999). Οι 3-ωριαίες μετρήσεις λαμβάνονται τις ώρες 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 και 21:00 UTC, με συνολικό αριθμό τιμών πλήρους χρονοσειράς 43824 για κάθε μέγεθος και ανά σταθμό, ενώ μια πλήρης χρονοσειρά μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας περιέχει 5478 τιμές. Συνολικά ο όγκος των προς επεξεργασία μετρήσεων ανερχόταν σε 4,86 εκατομμύρια τιμές.

1.2 Πληρότητα των διαθέσιμων χρονοσειρών

Από μια πρώτη αξιολόγηση των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι 5 από τους σταθμούς της ΕΜΥ δεν καταγράφουν την παράμετρο της ατμοσφαιρικής πίεσης (Κόνιτσα, Αλίαρτος, Πύργος, Άργος και Ιεράπετρα). Επίσης, 11 από τους σταθμούς καταγράφουν 3-ωριαίες μετρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και πιο συγκεκριμένα στο διάστημα 06:00 έως και 18:00 (Κόνιτσα, Άρτα, Βέλο, Αλίαρτος, Ν. Φιλαδέλφεια, Σπάτα, Πύργος, Πυργέλα, Ιεράπετρα, Ρέθυμνο και Τυμπάκι).

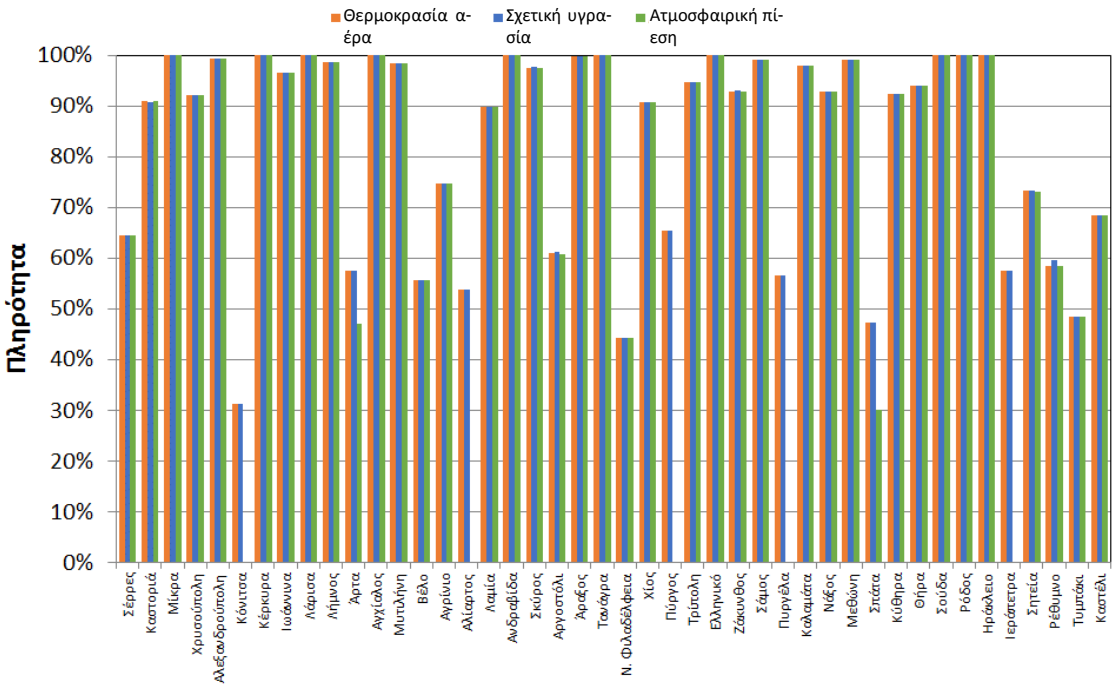
Συνολικά, η πληρότητα των διαθέσιμων πρωτογενών χρονοσειρών των μετεωρολογικών παραμέτρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Από τα στοιχεία φαίνεται ότι οι σταθμοί στους οποίους δεν καταγράφεται η ατμοσφαιρική πίεση παρουσιάζουν, όπως ήταν αναμενόμενο, τη χαμηλότερη πληρότητα. Το 60% των σταθμών παρουσιάζουν πληρότητα μεγαλύτερη του 90%, ενώ πληρότητα μικρότερη του 60% παρουσιάζεται μόνο στο 20% των σταθμών. Στους σταθμούς στους οποίους δεν καταγράφεται η ατμοσφαιρική πίεση, εάν ληφθεί υπόψη ο υπολογισμός της πληρότητάς τους μόνο για τα μετεωρολογικά μεγέθη που μετριούνται, η τελική πληρότητα αυξάνεται έως και 20% της αρχικής. Τέλος, στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται και η πληρότητα των σταθμών λαμβάνοντας υπόψη τις ώρες μέτρησης του κάθε σταθμού. Σε αυτή την περίπτωση, μόλις 8 από τους σταθμούς παρουσιάζουν πληρότητα μικρότερη του 80%, ενώ οι υπόλοιποι 36 σταθμοί περιλαμβάνουν μετρήσεις στις χρονοσειρές τους, ο αριθμός των οποίων αντιστοιχεί σε πλήρη χρονοσειρά 3-ωριαίων τιμών, διάρκειας μεγαλύτερης των 12 ετών.



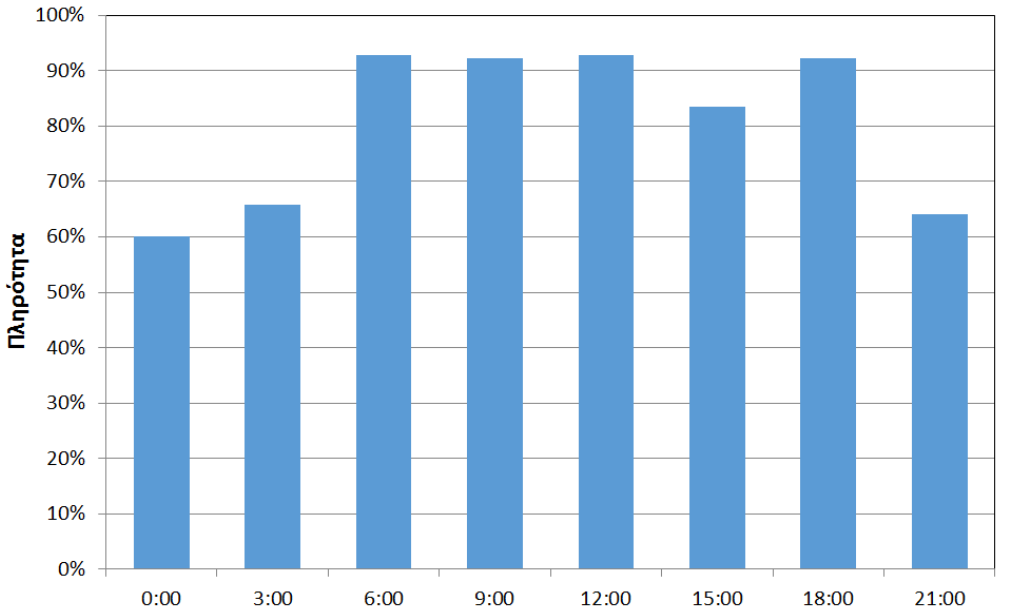
***Σχήμα** 1.2: **Πληρότητα των χρονοσειρών των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ στο σύνολο των μετεωρολογικών παραμέτρων για την περίοδο** 1985-1999*

Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η πληρότητα για κάθε σταθμό και για κάθε μετεωρολογική παράμετρο 3-ωριαίων μετρήσεων. Η θερμοκρασία αέρα και η σχετική υγρασία καταγράφεται και στους 44 υπό μελέτη σταθμούς της ΕΜΥ, ενώ η ατμοσφαιρική πίεση σε 39 σταθμούς. Οι 3-ωριαίες χρονοσειρές των σταθμών παρουσιάζουν, στην πλειοψηφία τους, υψηλή πληρότητα καθώς μόλις ένας στους τέσσερις σταθμούς έχουν πληρότητα μικρότερη του 80%. Τη χαμηλότερη πληρότητα (περίπου 30%) την έχει ο σταθμός της Κόνιτσας, στον οποίο η καταγραφή ξεκινάει από τον Αύγουστο του 1989 και εκτελούνται μετρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ακολουθεί ο σταθμός της Ν. Φιλαδέλφειας με πληρότητα 45%, στον οποίο η καταγραφή ξεκινάει από το Φεβρουάριο του 1989 και διεξάγονται μετρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αμέσως επόμενος σταθμός με χαμηλή πληρότητα (περίπου 47%) είναι ο σταθμός των Σπάτων, στον οποίο γίνονται μετρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ εμφανίζει μία περίοδο 10 μηνών με πολύ λίγες ή και μηδενικές καταγραφές. Στον ίδιο σταθμό οι μετρήσεις στις 15:00 UTC παρουσιάζουν σημαντικές ελλείψεις, καθώς αποτελούν μόλις το 25% των αναμενόμενων. Τέλος, ο σταθμός του Τυμπακίου παρουσιάζει πληρότητα περίπου 48%, καθώς καταγράφονται μετρήσεις μέχρι και τον Ιούλιο 1997, ενώ το ενδιάμεσο διάστημα περιλαμβάνει περίοδο 7 μηνών χωρίς μετρήσεις. Στο συγκεκριμένο σταθμό οι μετρήσεις γίνονται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Τέλος, στο Σχήμα 1.4 καταγράφεται η πληρότητα των τιμών ανά ώρα μέτρησης για το σύνολο των σταθμών και για το διάστημα των 15 ετών. Οι καταγραφές κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών (00:00, 03:00 και 21:00) παρουσιάζουν χαμηλότερη πληρότητα καθώς αφενός 10 εκ των σταθμών της αρχικής βάσης δεδομένων δεν καταγράφουν συστηματικά μετρήσεις τις ώρες αυτές, αφετέρου υπάρχουν σταθμοί όπως οι σταθμοί Σερρών, Αγρινίου, Αργοστολίου, Σητείας, Καστελλίου οι οποίοι παρουσιάζουν κατά περιόδους ελλείψεις στην καταγραφή μετρήσεων τις νυχτερινές ώρες.



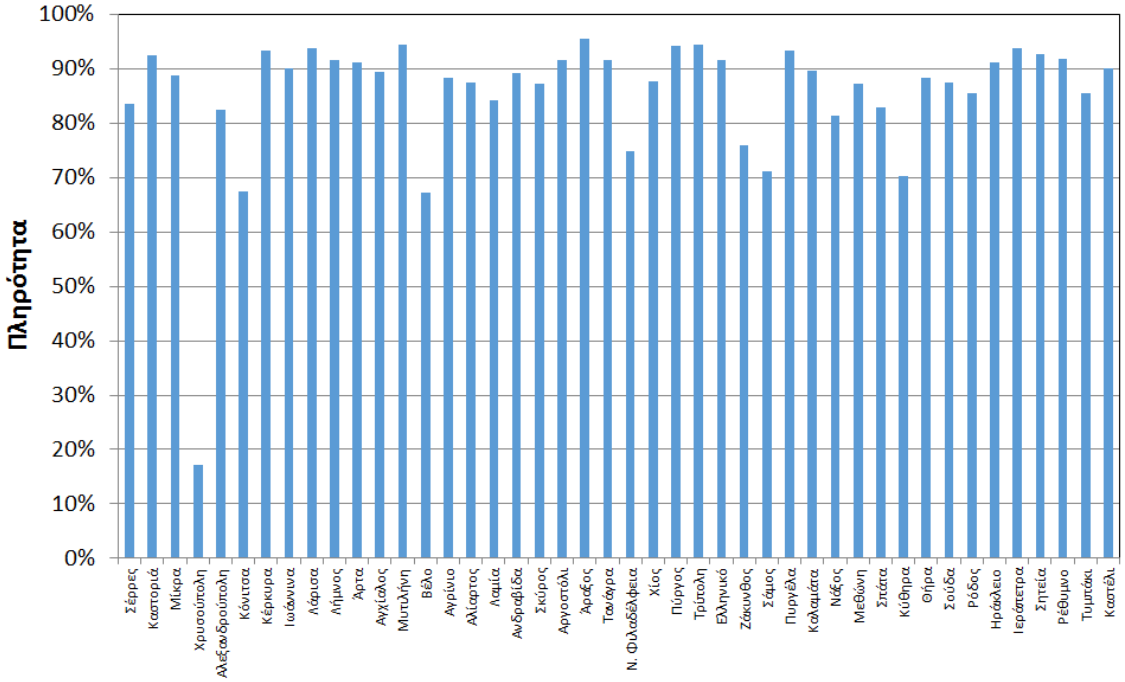
***Σχήμα** 1.3: **Πληρότητα των χρονοσειρών των 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα, ατμοσφαιρικής πίεσης και σχετικής υγρασίας των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ για την περίοδο** 1985-1999*



***Σχήμα** 1.4: **Πληρότητα των 3-ωριαίων μετρήσεων όλων των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ ανά ώρα μέτρησης κατά την περίοδο** 1985-1999*

Όσον αφορά στην πληρότητα των χρονοσειρών της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας (Σχήμα 1.5), η πλειοψηφία των σταθμών παρουσιάζει πληρότητα μεγαλύτερη του 80%, ενώ μόνον ο σταθμός της Χρυσούπολης (Καβάλα) εμφανίζει πληρότητα μικρότερη του 67%. Στο σταθμό της Χρυσούπολης η καταγραφή της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας ξεκινάει τον Ιούνιο του 1997 και, ως εκ

τούτου, ο συγκεκριμένος σταθμός δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία του ΤΜΕ λόγω της πλήρους απουσίας της παραμέτρου αυτής. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος σταθμός παρέμεινε στη βάση δεδομένων, προκειμένου να αξιοποιηθεί κατά τη συμπλήρωση των κενών των υπόλοιπων μετεωρολογικών παραμέτρων, αξιοποιώντας τις μετρήσεις του σε γειτονικούς σταθμούς, στην περίπτωση που αυτό κρίθηκε απαραίτητο.



***Σχήμα** 1.5: **Πληρότητα των χρονοσειρών της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

1.3 Θερμοκρασία αέρα

Η θερμοκρασία του αέρα αποτελεί μέτρο της θερμότητας που περιέχεται στην ατμόσφαιρα. Μετράται σε ^oC και επηρεάζει τη συμπεριφορά των ενεργειακών συστημάτων είτε θετικά (π.χ. στην περίπτωση θερμικών ηλιακών συστημάτων), είτε αρνητικά (π.χ. στην περίπτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων).

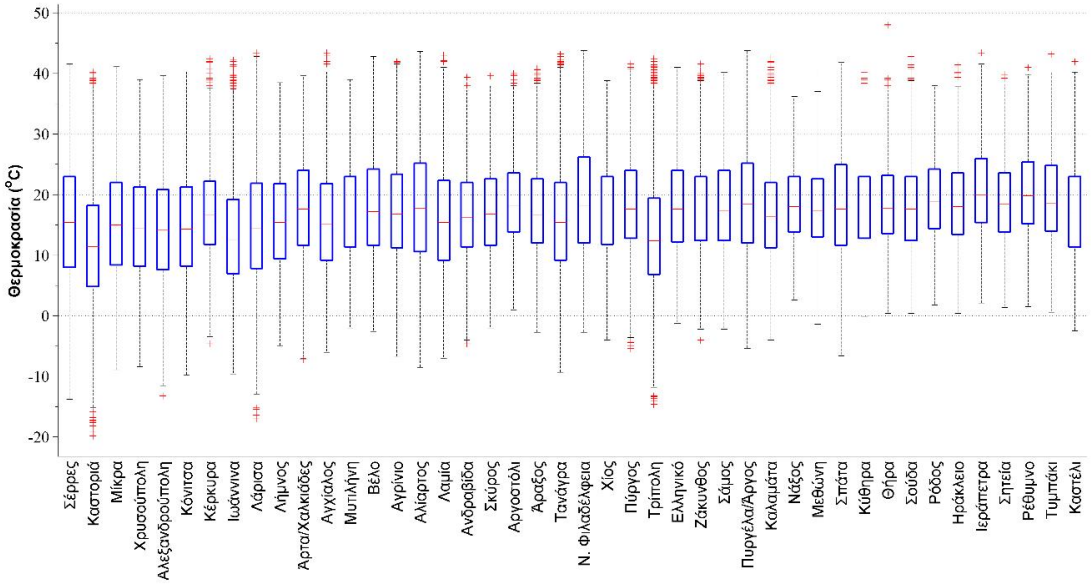
Στον Πίνακα 1.II καθώς και στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα όλων των σταθμών για το σύνολο της χρονοσειράς. Οι χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες 15-ετίας καταγράφονται στους σταθμούς της Καστοριάς, των Ιωαννίνων και της Τρίπολης. Η απολύτως ελάχιστη θερμοκρασία της χώρας κατά τη διάρκεια της 15-ετίας έχει καταγραφεί στο σταθμό της Καστοριάς ($-19{,}8^oC$) με αμέσως επόμενη μικρότερη θερμοκρασία στο σταθμό της Λάρισας (-17^oC). Η απολύτως μέγιστη θερμοκρασία της 15-ετίας εντοπίζεται στους σταθμούς της Ν. Φιλαδέλφειας και του Άργους ($43{,}8^oC$). Η απολύτως μέγιστη θερμοκρασία στο σταθμό της Σούδας (48^oC) αποτελεί εσφαλμένη καταγραφή, καθώς από μια προσεκτική ματιά στο Σχήμα 1.6, στο συγκεκριμένο σταθμό, η αμέσως επόμενη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας, που έχει καταγραφεί, είναι 5 βαθμούς μικρότερη ($42{,}8^oC$). Από έλεγχο και της ενδοημερήσιας μεταβολής, στη συγκεκριμένη ημέρα στο σταθμό της Σούδας, επιβεβαιώθηκε ότι η τιμή αυτή αποτελεί εσφαλμένη καταγραφή και, ως εκ τούτου, χαρακτηρίστηκε ακραία και αφαιρέθηκε από τη χρονοσειρά.

***Πίνακας** 1.II: **Στατιστικά χαρακτηριστικά των πρωτογενών μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ για την περίοδο** 1985-1999*

Α/Α	**Σταθμός**	T_{min} (ºC)	T_{max} (ºC)	$\overline{T}$ (ºC)	T_{std} (ºC)
1	Σέρρες	-13,8	41,6	15,6	9,5
2	Καστοριά	*-19,8*	40,2	11,9	9,1
3	Μίκρα	-9,0	41,2	15,2	8,5
4	Χρυσούπολη Καβάλας	-8,4	39,0	14,7	8,2
5	Αλεξανδρούπολη	-13,2	39,6	14,3	8,7
6	Κόνιτσα	-9,8	40,4	14,8	8,6
7	Κέρκυρα	-4,6	42,4	17,0	7,2
8	Ιωάννινα	-9,6	42,2	13,3	8,6
9	Λάρισα	-17,0	43,4	15,0	9,2
10	Λήμνος	-5,0	38,6	15,5	7,6
11	Άρτα/Χαλκιάδες	-7,2	39,6	17,8	8,1
12	Αγχίαλος	-6,0	43,4	15,7	8,2
13	Μυτιλήνη	-2,0	39,0	17,2	7,2
14	Βέλο	-2,6	42,8	17,9	8,0
15	Αγρίνιο	-6,8	42,0	17,3	8,4
16	Αλίαρτος	-8,6	43,6	17,8	9,0
17	Λαμία	-7,0	43,0	15,9	8,7
18	Ανδραβίδα	-4,6	39,4	16,7	7,1
19	Σκύρος	-2,0	39,6	16,9	6,7
20	Αργοστόλι	1,0	40,0	18,7	6,2
21	Άραξος	-2,8	40,8	17,2	7,1
22	Τανάγρα	-9,4	43,2	15,8	8,4
23	Ν. Φιλαδέλφεια	-2,8	*43,8*	19,0	8,7
24	Χίος	-4,0	38,8	17,2	7,1
25	Πύργος	-5,4	41,6	18,3	7,6
26	Τρίπολη	-14,6	42,4	13,3	8,8
27	Ελληνικό	-1,2	41,0	18,1	7,4
28	Ζάκυνθος	-4,0	41,6	17,6	7,2
29	Σάμος	-2,2	40,2	18,1	7,5
30	Πυργέλα/Άργος	-5,4	*43,8*	18,6	8,6
31	Καλαμάτα	-4,0	42,6	16,8	7,3
32	Νάξος	*2,6*	*36,2*	18,2	5,5
33	Μεθώνη	-1,4	40,4	17,6	6,0
34	Σπάτα	-6,6	41,8	18,0	8,1
35	Κύθηρα	-0,2	40,2	17,8	6,4
36	Θήρα	0,4	48,0* (42,8)	18,3	5,9
37	Σούδα	0,4	42,8	18,0	6,7
38	Ρόδος	1,8	38,0	19,2	5,9
39	Ηράκλειο	0,4	41,4	18,4	6,0
40	Ιεράπετρα	2,0	43,4	20,7	6,6
41	Σητεία	1,4	39,8	18,7	5,9
42	Ρέθυμνο	1,5	41,0	20,1	6,1
43	Τυμπάκι	0,6	43,2	19,2	6,8
44	Καστέλι	-2,5	42,0	17,2	7,1

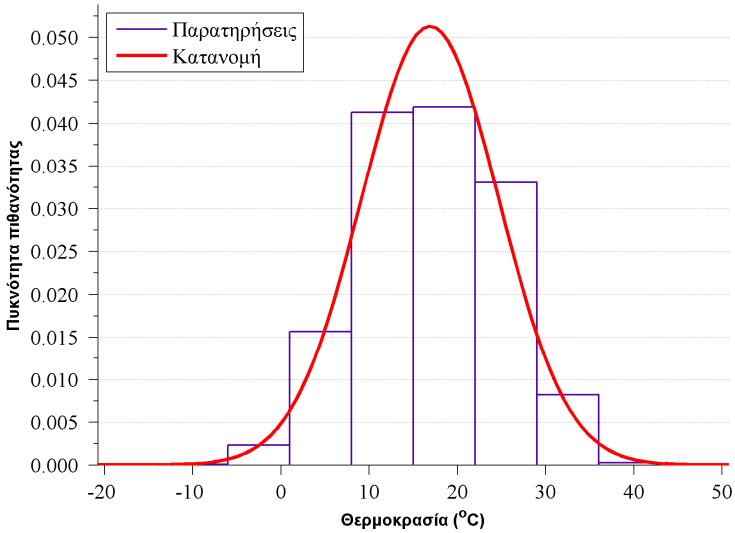
*Η τιμή χαρακτηρίστηκε ακραία και αφαιρέθηκε από τη βάση δεδομένων.

Το μέσο ενδοτεταρτημοριακό εύρος[1] των τιμών θερμοκρασίας αέρα είναι περίπου $15^o C$, ενώ το εύρος μεταβολής για την περίοδο της 15-ετίας κυμαίνεται από $30^o C$ έως και $60^o C$. Η μεγαλύτερη μεταβολή παρατηρείται στο σταθμό της Λάρισας, όπου η θερμοκρασία κυμάνθηκε από -17 *έως* $+ 43{,}4^o C$.



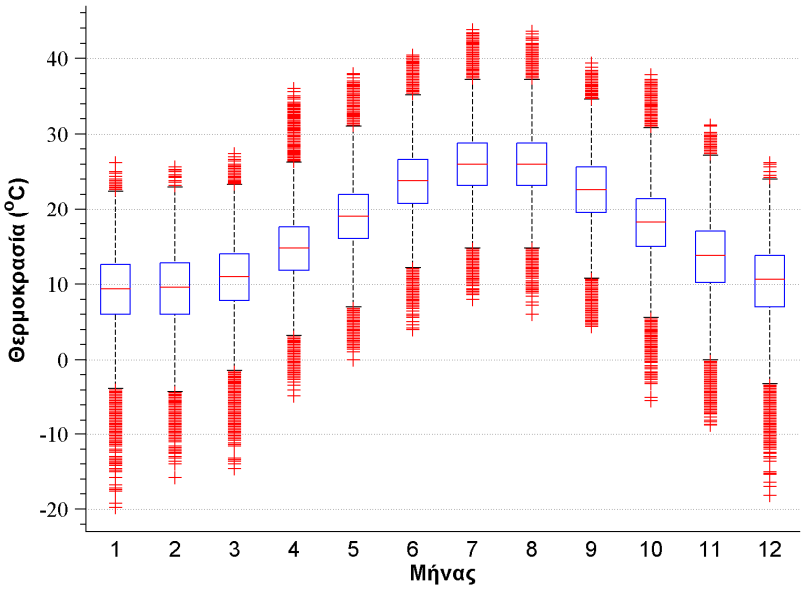
***Σχήμα** 1.6: **Μεταβλητότητα των** 3**-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ σύμφωνα με τις διαθέσιμες χρονοσειρές για την περίοδο** 1985-1999*

Οι τιμές της θερμοκρασίας ακολουθούν κανονική κατανομή (Σχήμα 1.7) με μέση τιμή $16{,}9^o C$ και τυπική απόκλιση $7{,}8^o C$. Στο διάστημα τιμών 10 *έως* $25^o C$ συγκεντρώνεται σχεδόν το 80% των μετρήσεων στο σύνολο των διαθέσιμων τιμών και των 44 σταθμών.



***Σχήμα** 1.7: **Συχνότητα εμφάνισης των τιμών θερμοκρασίας αέρα στο σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων όλων των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ, για την περίοδο** 1985-1999*

[1] Το ύψος του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου των θηκογραμμάτων (boxplots) αντιστοιχεί στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος της κατανομής. Η κάτω οριζόντια πλευρά του παραλληλόγραμμου αντιστοιχεί στο 25ο εκατοστημόριο της κατανομής, ενώ η επάνω οριζόντια πλευρά στο 75ο εκατοστημόριο.



***Σχήμα** 1.8: **Μεταβλητότητα ανά μήνα των** 3-**ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται η ενδοετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα για το σύνολο των μετρήσεων. Το ενδοτεταρτημοριακό εύρος της θερμοκρασίας είναι περίπου $10^{o}C$, καταδεικνύοντας μεγάλη συγκέντρωση και άρα μικρότερη διασπορά των τιμών της θερμοκρασίας αέρα ανά μήνα για το σύνολο της 15-ετίας. Σε όλους τους μήνες του έτους παρατηρείται σημαντικός αριθμός μετρήσεων θερμοκρασίας με τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη 1,5 φοράς του ενδοτεταρτημοριακού εύρους. Οι τιμές αυτές δεν χαρακτηρίστηκαν ακραίες καθώς θα έπρεπε να εξεταστεί και η ενδοημερήσια μεταβολή στις ημέρες όπου εμφανίζονται.

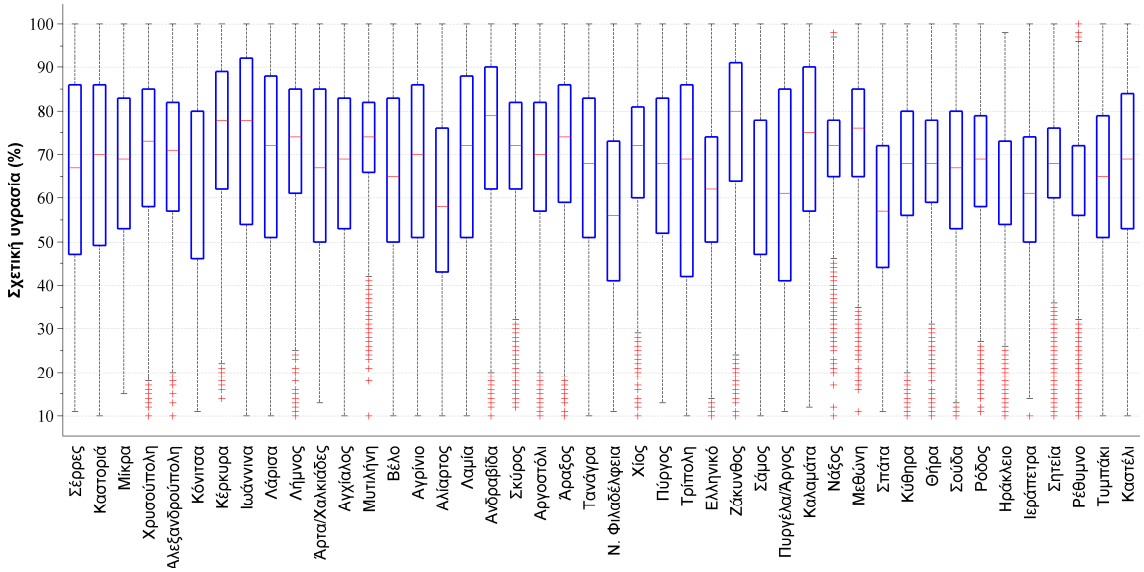
1.4 Σχετική υγρασία

Η σχετική υγρασία είναι ο λόγος της μάζας των υδρατμών, που περιέχονται σε συγκεκριμένο όγκο ατμοσφαιρικού αέρα, προς τη μάζα των υδρατμών που θα καθιστούσαν τον αέρα κορεσμένο (σε συγκεκριμένη θερμοκρασία αέρα και ατμοσφαιρική πίεση) κατά την ώρα της μέτρησης. Η σχετική υγρασία εκφράζεται επί τοις εκατό. Ο κεκορεσμένος αέρας έχει σχετική υγρασία 100%, ενώ ο τελείως ξηρός αέρας 0%.

Οι καταγεγραμμένες τιμές σχετικής υγρασίας, σύμφωνα με την αρχική βάση δεδομένων, κυμαίνονται από 0 έως και 100% (Πίνακας 1.III). Οι μετρήσεις σχετικής υγρασίας με τιμή μικρότερη από 10% θεωρήθηκαν επισφαλείς, χαρακτηρίστηκαν ως ακραίες και αφαιρέθηκαν. Ο αριθμός των μετρήσεων που αφαιρέθηκαν λόγω υπέρβασης του κατώτατου ορίου σχετικής υγρασίας ήταν 260 τιμές, που αποτελούν μόλις το 0,16‰ των μετρήσεων. Οι σταθμοί της Ν. Φιλαδέλφειας και των Σπάτων (σταθμοί του Νομού Αττικής) παρουσιάζουν τις χαμηλότερες μέσες τιμές 15-ετίας, με τιμές 57% και 58%, αντίστοιχα. Στα νησιά του Ιονίου, Κέρκυρα και Ζάκυνθο, καταγράφονται οι υψηλότερες μέσες τιμές 15-ετίας ίσες με 75% και 77%. Στους σταθμούς της Νάξου και της Μυτιλήνης οι μετρήσεις της σχετικής υγρασίας έχουν τη μικρότερη τυπική απόκλιση και ως εκ τούτου τη μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από τη μέση τιμή. Η συγκέντρωση των τιμών στους δύο αυτούς σταθμούς φαίνεται στο Σχήμα 1.9, όπου το ενδοτεταρτημοριακό εύρος είναι μικρότερο του 15%.

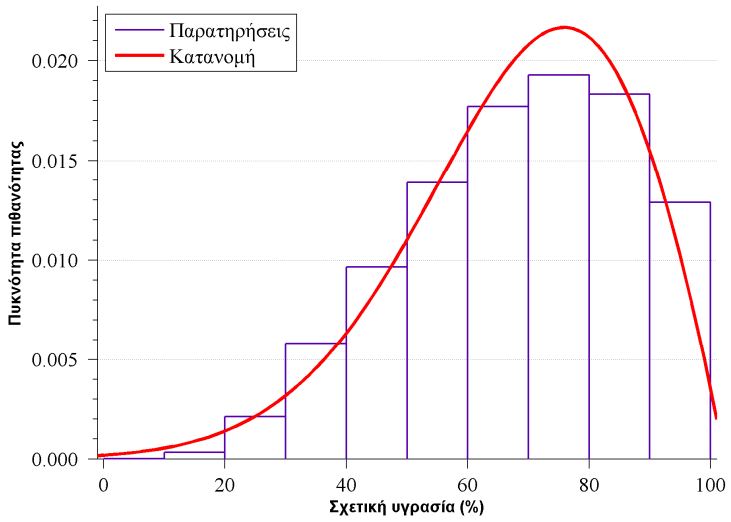
***Πίνακας** 1.III: **Στατιστικά χαρακτηριστικά πρωτογενών μετρήσεων σχετικής υγρασίας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

Α/Α	Σταθμός	$\overline{RH}$ (%)	RH_{std} (%)	Α/Α	Σταθμός	$\overline{RH}$ (%)	RH_{std} (%)
1	Σέρρες	66	22	23	Ν. Φιλαδέλφεια	57	20
2	Καστοριά	67	22	24	Χίος	70	15
3	Μίκρα	67	18	25	Πύργος	66	19
4	Χρυσούπολη Καβάλας	70	17	26	Τρίπολη	64	24
5	Αλεξανδρούπολη	69	16	27	Ελληνικό	61	17
6	Κόνιτσα	62	21	28	Ζάκυνθος	77	18
7	Κέρκυρα	75	17	29	Σάμος	62	19
8	Ιωάννινα	72	22	30	Πυργέλα/Άργος	61	23
9	Λάρισα	69	22	31	Καλαμάτα	72	19
10	Λήμνος	72	16	32	Νάξος	71	11
11	Άρτα/Χαλκιάδες	67	20	33	Μεθώνη	74	14
12	Αγχίαλος	67	18	34	Σπάτα	58	19
13	Μυτιλήνη	73	12	35	Κύθηρα	67	17
14	Βέλο	66	19	36	Θήρα	68	14
15	Αγρίνιο	68	20	37	Σούδα	66	18
16	Αλίαρτος	59	20	38	Ρόδος	68	15
17	Λαμία	69	21	39	Ηράκλειο	63	14
18	Ανδραβίδα	75	18	40	Ιεράπετρα	61	16
19	Σκύρος	71	14	41	Σητεία	67	13
20	Αργοστόλι	69	17	42	Ρέθυμνο	63	13
21	Άραξος	71	17	43	Τυμπάκι	64	18
22	Τανάγρα	66	20	44	Καστέλι	67	20

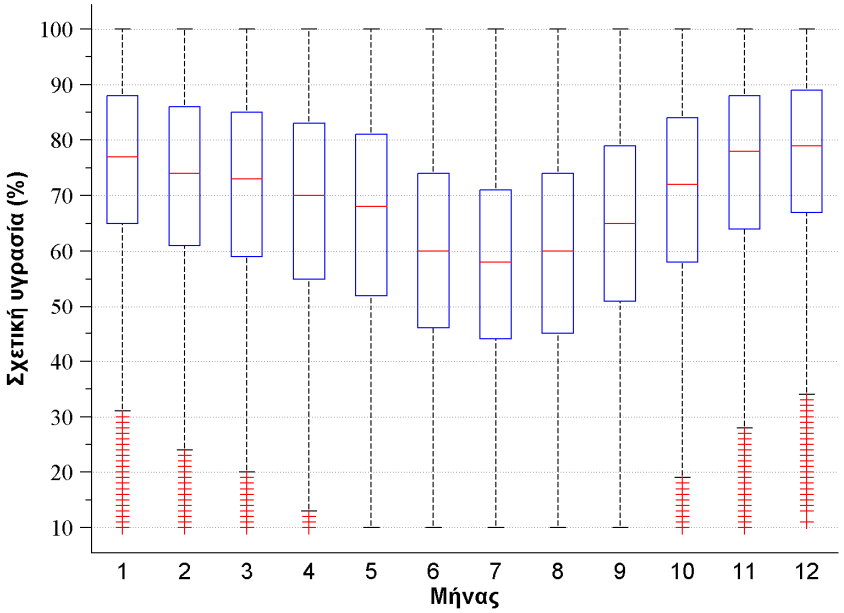


***Σχήμα** 1.9: **Μεταβλητότητα των** 3-**ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

Οι τιμές της σχετικής υγρασίας για το σύνολο των μετρήσεων ακολουθούν τη Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών[2] (Σχήμα 1.10) με $k = -0.52$, $\sigma = 20.09\%$ και $\mu = 63.58\%$. Επίσης, φαίνεται χαρακτηριστικά ο μικρός αριθμός μετρήσεων σχετικής υγρασίας με τιμές μικρότερες του 10%.



Σχήμα** 1.10: **Συχνότητα εμφάνισης τιμών σχετικής υγρασίας στο σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων όλων των σταθμών



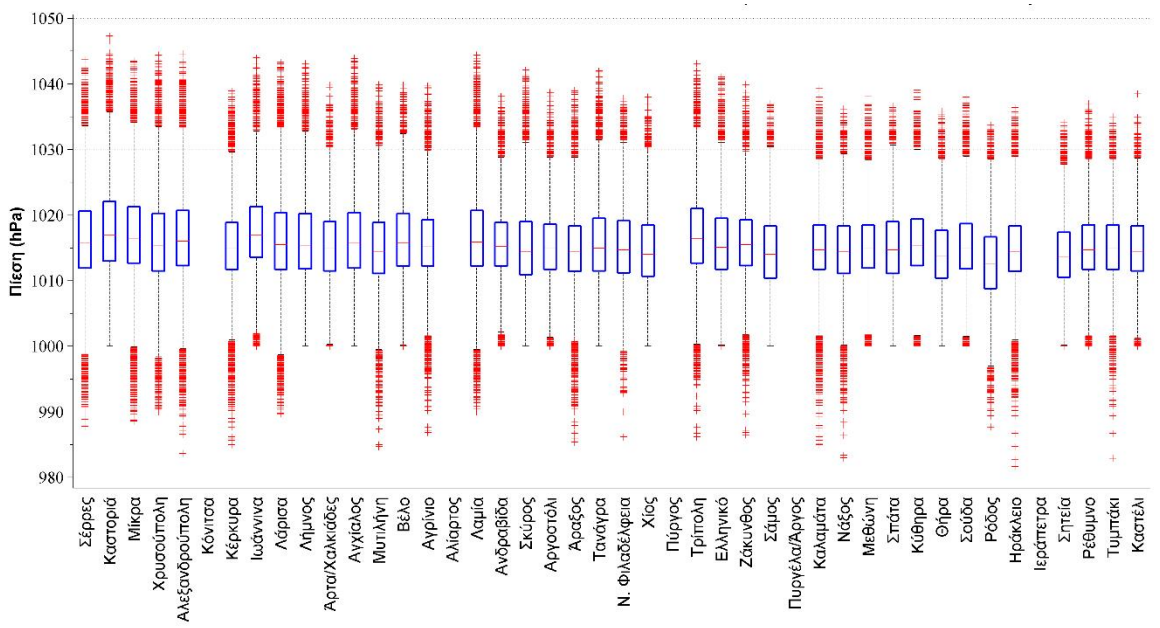
***Σχήμα** 1.11: **Μεταβλητότητα ανά μήνα των 3-ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

[2] Η συνάρτηση κατανομής της Γενικευμένης Κατανομής Ακραίων Τιμών είναι: $y(x) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \cdot e^{-\left(1+k\cdot\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{k}}\right)} \cdot \left(1 + k \cdot \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}}$, όπου οι παράμετροι μ (μέση τιμή) και σ (τυπική απόκλιση) είναι οι παράμετροι θέσης και διασποράς αντίστοιχα, ενώ η παράμετρος k, παράμετρος σχήματος, που καθορίζει το βάρος της ουράς της συνάρτησης y(x). Η συγκεκριμένη κατανομή βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη μελέτη ακραίων μετεωρολογικών δεδομένων.

Όσον αφορά στην ενδοετήσια διακύμανση της σχετικής υγρασίας (Σχήμα 1.11), καθ' όλη τη διάρκεια του έτους καταγράφονται τιμές σχετικής υγρασίας σε όλο το εύρος μεταβολής της, ενώ, κατά τους θερινούς μήνες, οι μετρήσεις είναι συγκεντρωμένες σε μικρότερες τιμές σχετικής υγρασίας, ως αναμενόταν. Το ενδοτεταρτημοριακό εύρος έχει ελάχιστα μικρότερες τιμές κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, ενώ σε όλους τους μήνες εκτιμώνται ως ακραίες τιμές μετρήσεις με χαμηλές τιμές υγρασίας και κυρίως την ψυχρή περίοδο του έτους, όπου οι μέσες τιμές είναι σχετικά υψηλές.

1.5 Ατμοσφαιρική πίεση

Για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης χρησιμοποιούνται από την ΕΜΥ υδραργυρικά κυρίως βαρόμετρα. Ο παρατηρητής καταγράφει τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης στο υψόμετρο του σταθμού· με κατάλληλους υπολογισμούς η μέτρηση ανάγεται κατόπιν στη μέση στάθμη της θάλασσας. Οι χρονοσειρές πίεσης των σταθμών περιέχουν 3-ωριαίες τιμές ανηγμένες στη μέση στάθμη της θάλασσας· για την αξιοποίησή τους χρησιμοποιείται, στην παρούσα διατριβή, η μέθοδος της θερμοβαθμίδας (εξίσωση ισόθερμης ατμόσφαιρας) για την αναγωγή της ατμοσφαιρικής πίεσης στο υψόμετρο του σταθμού.



Σχήμα** 1.12: **Μεταβλητότητα των** 3-**ωριαίων μετρήσεων της ατμοσφαιρικής πίεσης στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999, **μετά από την αφαίρεση των ακραίων τιμών

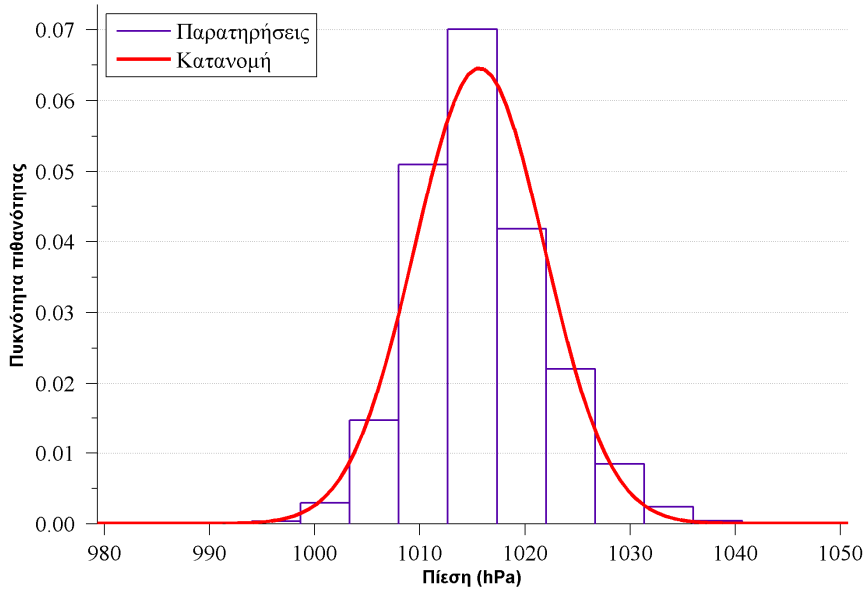
Στον Πίνακα 1.IV και στο Σχήμα 1.12 παρουσιάζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των πρωτογενών χρονοσειρών ατμοσφαιρικής πίεσης σε κάθε σταθμό για το σύνολο της 15-ετίας. Όπως προκύπτει από τις καταγεγραμμένες τιμές της απόλυτα μέγιστης πίεσης σε 21 σταθμούς, εμφανίζεται μέγιστη καταγεγραμμένη μέτρηση ίση με 1100 hPa (Πίνακας 1.IV), η οποία αποτελεί εσφαλμένη μέτρηση και, ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη μέτρηση έχει αφαιρεθεί από τις χρονοσειρές ως ακραία. Οι επικαιροποιημένες τιμές παρουσιάζονται στη στήλη P'_{max}. Συνολικά, ο αριθμός μετρήσεων της ατμοσφαιρικής πίεσης, που εντοπίστηκαν και αφαιρέθηκαν με τιμή μέτρησης ίση με 1100 hPa, ήταν 4914. Οι τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης παρουσιάζουν μικρό εύρος μεταβολής με μέγιστη τυπική απόκλιση 7,1 hPa (οι τιμές της τυπικής απόκλισης στον πίνακα υπολογίστηκαν

μετά από την αφαίρεση των ακραίων τιμών). Κατά τη διάρκεια της 15-ετίας οι τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης κυμάνθηκαν μεταξύ 980 $και$ 1045 hPa (Σχήμα 1.12).

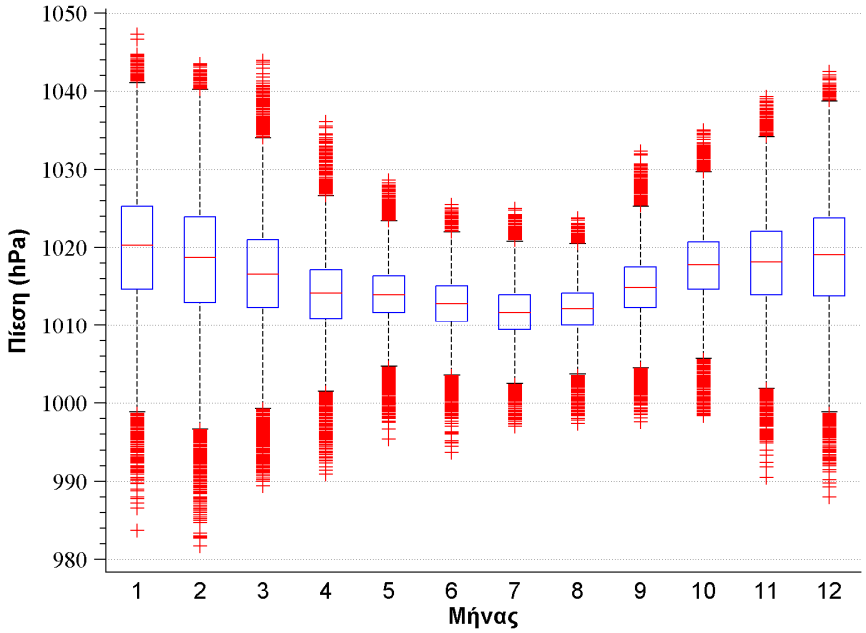
Πίνακας** 1.IV: **Στατιστικά χαρακτηριστικά πρωτογενών μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999, **μετά από την αφαίρεση των ακραίων τιμών

Α/Α	**Σταθμός**	P_{min} (hPa)	P_{max} (hPa)	P'_{max} (hPa)	$\bar{P}$ (hPa)	P_{std} (hPa)
1	Σέρρες	987,8	1043,7	1043,7	1016,5	7,0
2	Καστοριά	1000,0	1047,3	1047,3	1018,3	7,1
3	Μίκρα	988,6	1043,5	1043,5	1017,1	6,9
4	Χρυσούπολη Καβάλας	990,0	1044,4	1044,4	1016,1	7,1
5	Αλεξανδρούπολη	983,7	1044,6	1044,6	1016,7	6,9
6	Κόνιτσα	Χωρίς καταγραφή				
7	Κέρκυρα	985,0	1038,9	1038,9	1015,3	6,0
8	Ιωάννινα	1000,0	1044,0	1044,0	1018,0	6,2
9	Λάρισα	989,7	1043,3	1043,3	1016,2	6,9
10	Λήμνος	1000,0	1043,1	1043,1	1016,9	6,6
11	Άρτα/Χαλκιάδες	1000,0	1039,8	1039,8	1016,3	5,9
12	Αγχίαλος	1000,0	1043,9	1043,9	1017,1	6,7
13	Μυτιλήνη	984,7	1039,9	1039,9	1015,2	6,1
14	Βέλο	1000,0	1039,8	1039,8	1016,9	6,3
15	Αγρίνιο	986,9	1039,7	1039,7	1015,9	5,9
16	Αλίαρτος	Χωρίς καταγραφή				
17	Λαμία	990,0	1044,4	1044,4	1016,6	6,9
18	Ανδραβίδα	1000,0	1038,1	1038,1	1016,2	5,4
19	Σκύρος	1000,0	1042,1	1042,1	1016,1	6,4
20	Αργοστόλι	1000,0	1038,7	1038,7	1016,0	5,5
21	Άραξος	985,4	1039,0	1039,0	1015,0	5,8
22	Τανάγρα	1000,0	1042,0	1042,0	1016,3	6,3
23	Ν, Φιλαδέλφεια	986,2	1037,8	1037,8	1015,4	6,3
24	Χίος	1000,0	1038,0	1038,0	1015,2	5,9
25	Πύργος	Χωρίς καταγραφή				
26	Τρίπολη	986,2	1043,1	1043,1	1017,1	6,6
27	Ελληνικό	1000,0	1041,1	1041,1	1016,3	6,1
28	Ζάκυνθος	986,5	1039,9	1039,9	1016,0	5,8
29	Σάμος	1000,0	1037,0	1037,0	1014,9	5,8
30	Πυργέλα/Άργος	Χωρίς καταγραφή				
31	Καλαμάτα	985,0	1039,3	1039,3	1015,2	5,6
32	Νάξος	983,0	1036,2	1036,2	1014,9	5,7
33	Μεθώνη	1000,0	1038,2	1038,2	1015,8	5,4
34	Σπάτα	1000,0	1036,6	1036,6	1015,8	6,0
35	Κύθηρα	1000,0	1039,1	1039,1	1016,4	5,5
36	Θήρα	1000,0	1035,8	1035,8	1014,7	5,5
37	Σούδα	1000,0	1038,0	1038,0	1015,8	5,5
38	Ρόδος	987,7	1033,7	1033,7	1013,0	5,6
39	Ηράκλειο	981,7	1036,4	1036,4	1015,0	5,5
40	Ιεράπετρα	Χωρίς καταγραφή				
41	Σητεία	1000,0	1034,1	1034,1	1014,5	5,2
42	Ρέθυμνο	1000,0	1037,0	1037,0	1015,6	5,4
43	Τυμπάκι	982,9	1035,0	1035,0	1015,2	5,2
44	Καστέλι	1000,0	1038,5	1038,5	1015,3	5,2

Εξαιρώντας τις ακραίες τιμές από τις χρονοσειρές της ατμοσφαιρικής πίεσης, το Σχήμα 1.13 παρουσιάζει την κατανομή των τιμών καθώς επίσης και την καμπύλη κανονικής κατανομής με μέση τιμή 1015,7 hPa και τυπική απόκλιση 6,2 hPa.



***Σχήμα** 1.13: **Συχνότητα εμφάνισης των τιμών της ατμοσφαιρικής πίεσης στο σύνολο των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*



***Σχήμα** 1.14: **Μεταβλητότητα ανά μήνα των 3-ωριαίων μετρήσεων της ατμοσφαιρικής πίεσης στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.14 η μέση ατμοσφαιρική πίεση παρουσιάζει μικρή μεταβολή κατά τη διάρκεια του έτους με σημαντικά μικρότερη μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους (Μάιο με Αύγουστο).

1.6 Ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας

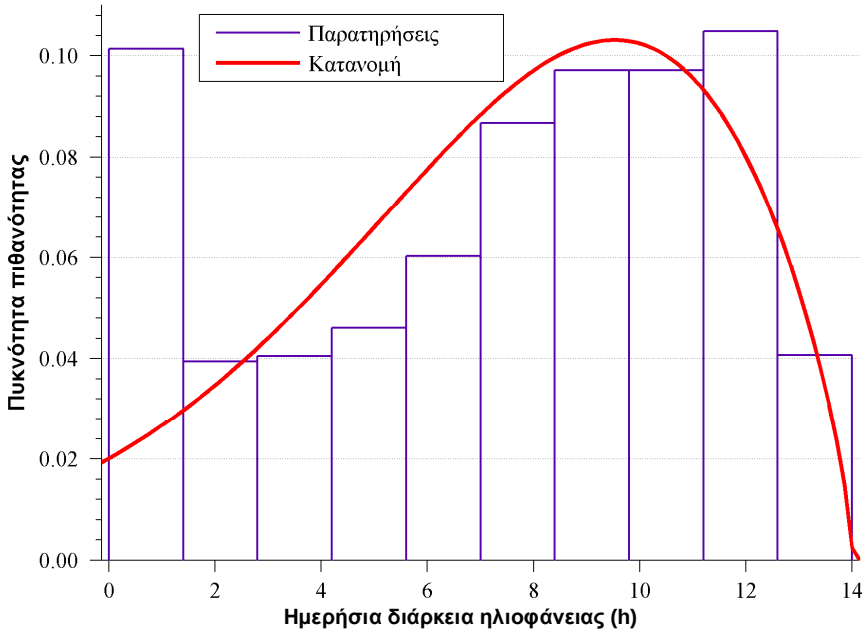
Η διάρκεια της ηλιοφάνειας αφορά τις ώρες της ημέρας κατά τις οποίες ο ήλιος είναι ορατός σε ένα συγκεκριμένο τόπο. Η καταγραφή της διάρκειας ηλιοφάνειας γίνεται με δύο είδη οργάνων, τα όργανα με αισθητήρα εστίασης και τα όργανα με φωτοβολταϊκό αισθητήρα. Ο πιο εύχρηστος και διαδεδομένος τύπος οργάνων είναι αυτός με αισθητήρα εστίασης, με κύριο εκπρόσωπο τον ηλιογράφο τύπου Campbell-Stokes. Ο ηλιογράφος αυτός αποτελείται από μία συμπαγή γυάλινη σφαίρα διαμέτρου 10 cm, η οποία είναι τοποθετημένη σε ομόκεντρη ημισφαιρική μεταλλική βάση με κατάλληλες υποδοχές για την τοποθέτηση των ειδικών ταινιών πυριτίου οι οποίες καίγονται όταν ο ήλιος είναι ορατός. Για να πραγματοποιηθεί καύση της ταινίας και να καταγραφεί η διάρκεια ηλιοφάνειας, είναι απαραίτητο η ηλιακή ακτινοβολία να ξεπερνά μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία όμως επηρεάζεται από την υγρασία της ατμόσφαιρας. Κάτω από πολύ υγρές συνθήκες για να ξεκινήσει η καύση της ταινίας, η ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να ξεπεράσει τα 280 W/m^2, ενώ σε ξηρές συνθήκες μπορεί να ξεκινήσει και από 70 W/m^2. Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός έχει υιοθετήσει ως πρότυπο κατώφλι της ηλιακής ακτινοβολίας για την καταγραφή της διάρκειας ηλιοφάνειας τα 120 W/m^2. Σημαντικό μειονέκτημα του οργάνου αποτελεί επίσης το γεγονός ότι η εκτίμηση της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας βασίζεται στην υποκειμενικότητα του παρατηρητή του σταθμού αφού οι ώρες ηλιοφάνειας προκύπτουν από το συνολικό μήκος του καμένου τμήματος της ταινίας.

Στον Πίνακα 1.V καταγράφεται η ελάχιστη, η μέγιστη, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας για κάθε σταθμό, στο σύνολο της 15-ετίας. Όπως είναι αναμενόμενο, η ελάχιστη καταγεγραμμένη τιμή είναι 0 h, ενώ η απόλυτα μέγιστη 14 h, η οποία εμφανίζεται σε 10 σταθμούς.

***Πίνακας** 1.V: **Στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

Α/Α	Σταθμός	SD_{max} (h)	$\overline{SD}$ (h)	SD_{std} (h)
1	Σέρρες	14,0	6,2	4,2
2	Καστοριά	13,5	6,4	4,0
3	Μίκρα	13,6	6,5	4,2
4	Χρυσούπολη Καβάλας	13,3	6,9	4,2
5	Αλεξανδρούπολη	14,0	6,4	4,3
6	Κόνιτσα	13,2	6,0	3,9
7	Κέρκυρα	13,9	7,1	4,2
8	Ιωάννινα	13,7	6,0	4,1
9	Λάρισα	14,0	6,6	4,3
10	Λήμνος	13,9	7,0	4,3
11	Άρτα/Χαλκιάδες	13,8	7,1	4,0
12	Αγχίαλος	13,8	7,0	4,3
13	Μυτιλήνη	14,0	7,7	4,3
14	Βέλο	14,0	7,6	4,2
15	Αγρίνιο	13,9	7,2	4,2
16	Αλίαρτος	13,6	7,0	4,4
17	Λαμία	13,9	6,7	4,2
18	Ανδραβίδα	14,0	7,7	4,0
19	Σκύρος	13,8	6,9	4,3
20	Αργοστόλι	14,0	7,9	4,0
21	Άραξος	13,6	7,4	3,8
22	Τανάγρα	13,8	7,1	4,3

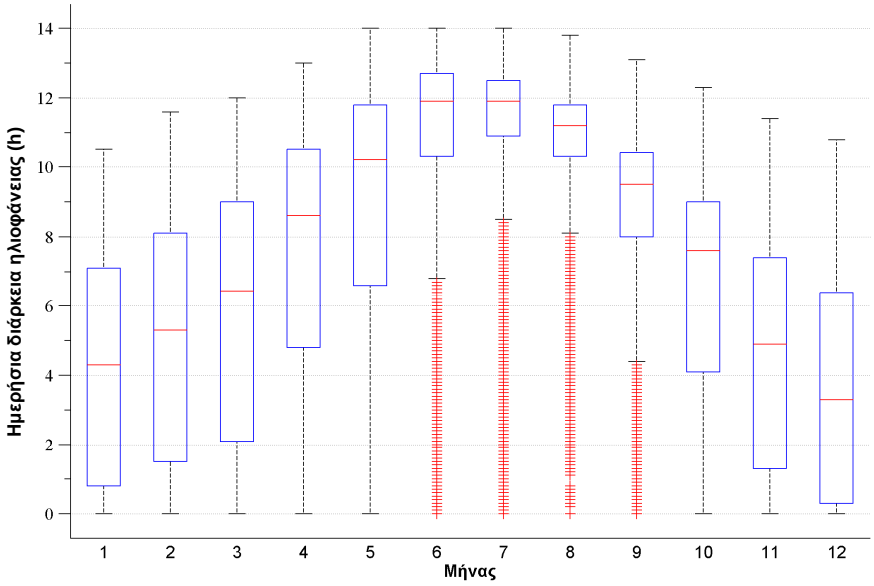
Α/Α	Σταθμός	SD_{max} (h)	$\overline{SD}$ (h)	SD_{std} (h)
23	Ν, Φιλαδέλφεια	12,6	7,0	3,9
24	Χίος	13,8	7,7	4,1
25	Πύργος	13,2	7,7	3,8
26	Τρίπολη	13,8	7,1	3,9
27	Ελληνικό	13,7	7,4	4,0
28	Ζάκυνθος	14,0	7,4	4,2
29	Σάμος	13,9	8,2	4,1
30	Πυργέλα/Άργος	13,3	7,0	3,8
31	Καλαμάτα	13,6	7,4	3,8
32	Νάξος	13,9	7,8	4,1
33	Μεθώνη	13,4	7,5	3,7
34	Σπάτα	13,0	7,0	3,9
35	Κύθηρα	13,5	7,4	3,9
36	Θήρα	14,0	7,7	4,0
37	Σούδα	13,8	7,7	4,2
38	Ρόδος	13,5	8,3	3,7
39	Ηράκλειο	13,9	7,6	4,1
40	Ιεράπετρα	13,6	8,5	3,7
41	Σητεία	13,8	7,8	4,0
42	Ρέθυμνο	14,0	7,2	4,0
43	Τυμπάκι	13,8	8,1	3,7
44	Καστέλι	13,1	7,2	3,8



***Σχήμα** 1.15: **Συχνότητα εμφάνισης των τιμών της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

Οι τιμές της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας για το σύνολο των μετρήσεων σύμφωνα με το διάγραμμα συχνοτήτων (Σχήμα 1.15) και την εξαίρεση των ημερών με διάρκεια ηλιοφάνειας μικρότερη της 1 h, ακολουθούν, όπως και οι τιμές της σχετικής υγρασίας, τη Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών με $k = -0{,}59$, $\sigma = 4{,}46\ h$ και $\mu = 6{,}44\ h$.

Έντονες διαφορές παρουσιάζονται μεταξύ χειμερινών και καλοκαιρινών μηνών κατά τη διάρκεια της 15-ετίας λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας (Σχήμα 1.16). Κατά τους χειμερινούς μήνες η μέση τιμή κυμαίνεται μεταξύ 4 και 5 ωρών ενώ τους θερινούς μήνες ξεπερνάει τις 10 ώρες. Χαρακτηριστικό της διαφοράς των δύο περιόδων είναι επίσης και η μικρή μεταβλητότητα που παρουσιάζουν οι τιμές κατά η διάρκεια του καλοκαιριού σε σχέση με το χειμώνα. Το καλοκαίρι η ενδοτεταρτημοριακή μεταβολή μειώνεται έως και 2 ώρες, ενώ τους μήνες της ψυχρής περιόδου του έτους μπορεί να ξεπεράσει τις 6 ώρες. Η μέγιστη απόλυτη μηνιαία τιμή ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας κυμαίνεται από 10,5 h έως 14 h ενώ η απόλυτη ελάχιστη τιμή σε όλους τους μήνες του έτους είναι ίση με 0 h.



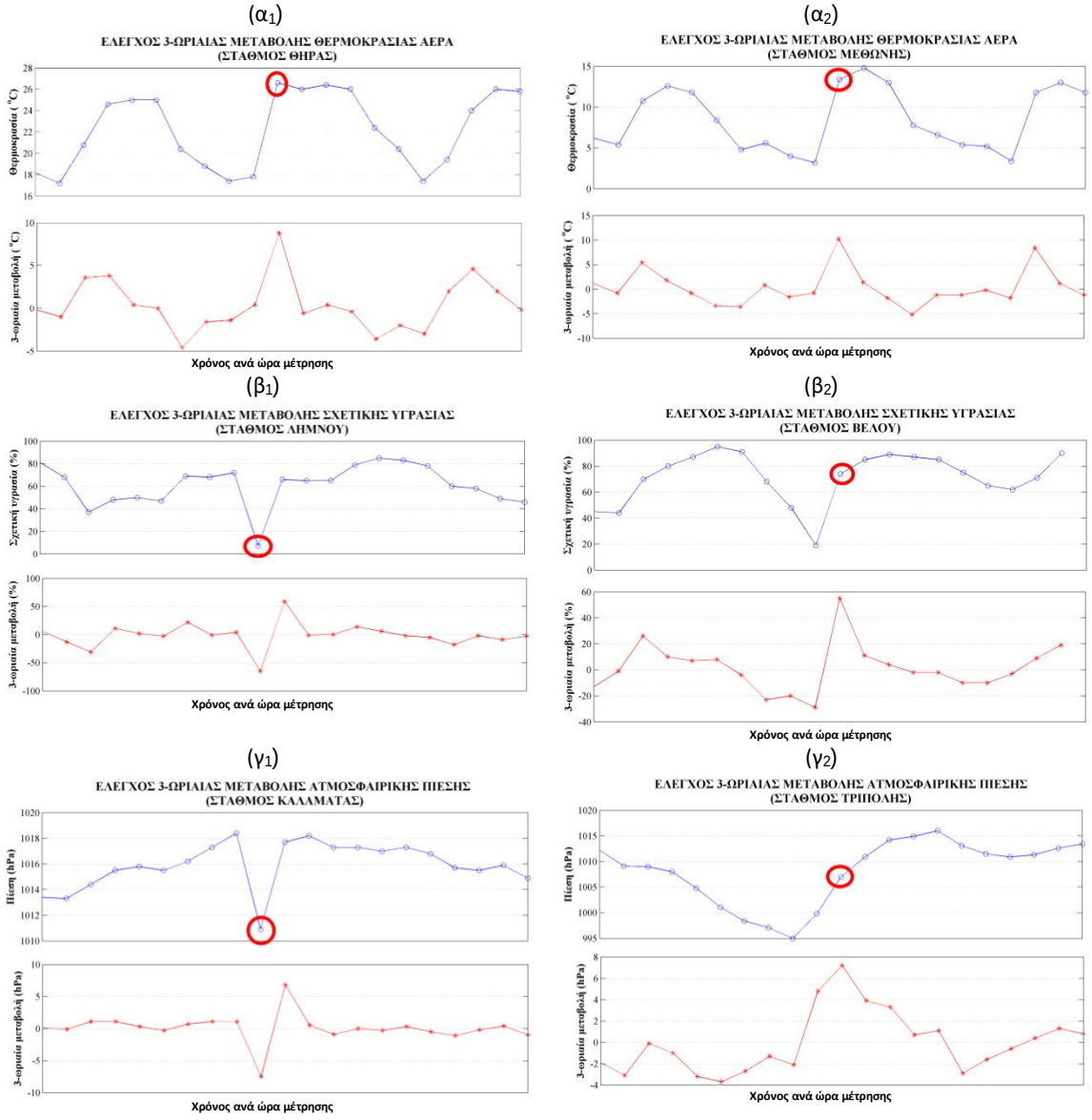
***Σχήμα** 1.16: **Μεταβλητότητα ανά μήνα των μετρήσεων της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ κατά την περίοδο** 1985-1999*

1.7 Ποιοτικός έλεγχος μετρήσεων

Από τον πρώτο έλεγχο των χρονοσειρών των μετεωρολογικών παραμέτρων στους επιλεγέντες σταθμούς, αφαιρέθηκε 1 τιμή θερμοκρασίας αέρα, 260 τιμές σχετικής υγρασίας και 4919 τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης, οι οποίες κρίθηκαν ως ακραίες. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ποιοτικός έλεγχος στις 3-ωριαίες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων ως προς τα ανώτατα εκτιμώμενα όρια μεταβολής δύο διαδοχικών μετρήσεων. Τα όρια αυτά ορίστηκαν για τη θερμοκρασία αέρα ± 10 ^{o}C, για τη σχετική υγρασία ± 60% και για την ατμοσφαιρική πίεση ± 5 hPa. Οι τιμές εκτός των παραπάνω ορίων κρίθηκαν ως αν δυνάμει ακραίες σύμφωνα με τον έλεγχο των τιμών και της κατανομής συχνοτήτων των 3-ωριαίων μεταβολών των υπό μελέτη ατμοσφαιρικών παραμέτρων.

Τα παραπάνω όρια για τον έλεγχο της μεταβολής των μετεωρολογικών παραμέτρων δεν αποτέλεσαν προϋπόθεση για την αφαίρεση τιμών, αλλά πραγματοποίηση οπτικού ελέγχου για την εκτίμηση από την καμπύλη μεταβολής του μεγέθους στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, εάν αιτιολογείται η ύπαρξη της συγκεκριμένης 3-ωριαίας μεταβολής. Σε περίπτωση όπου από την καμπύλη μεταβολής προέκυπτε ομαλή συνέχεια των τιμών της υπό διερεύνηση παραμέτρου, παρόλη τη μεγάλη 3-ωριαία μεταβολή της, τότε η μέτρηση διατηρείται ως αποδεκτή. Σε περίπτωση όπου η καμπύλη μεταβολής του μεγέθους στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο παρουσίαζε από-

τομη μεταβολή, η οποία δεν συμφωνεί με την αναμενόμενη συνέχεια του μεγέθους, τότε η μέτρηση χαρακτηρίζεται ως ακραία και αφαιρείται από τη χρονοσειρά. Στο Σχήμα 1.17 παρουσιάζονται ενδεικτικές περιπτώσεις ελέγχου σε διαφορετικούς σταθμούς και για τις τρεις μετεωρολογικές παραμέτρους. Η υπό αμφισβήτηση τιμή μέτρησης διακρίνεται σε κόκκινο κύκλο. Τα διαγράμματα στην αριστερή στήλη αφορούν τιμές οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως εσφαλμένες, ενώ στη δεξιά στήλη παρουσιάζονται περιπτώσεις ελέγχου που, παρόλο η 3-ωριαία μεταβολή βρίσκεται εκτός ορίων ελέγχου, η τιμή της μέτρησης, μετά από τον έλεγχο της χρονοσειράς, δεν θεωρήθηκε εσφαλμένη και διατηρήθηκε.



Σχήμα** 1.17: **Παραδείγματα ελέγχου ορίων** 3-**ωριαίας μεταβολής των μετεωρολογικών παραμέτρων

Συνολικά και για τις τρεις μετεωρολογικές παραμέτρους ελέγχθηκαν 930 περιπτώσεις εκ των οποίων αφαιρέθηκαν οι 279 (Πίνακας 1.VI). Η πλειοψηφία των εσφαλμένων τιμών βρέθηκε στην παράμετρο της σχετικής υγρασίας, ενώ ελάχιστες ήταν οι περιπτώσεις εσφαλμένων τιμών ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας αέρα.

Πίνακας** 1.VI: **Αριθμός τιμών** 3-**ωριαιας μεταβολής των μετεωρολογικών παραμέτρων που ελέγχθησαν

	Θερμοκρασία αέρα	**Σχετική υγρασία**	**Ατμοσφαιρική πίεση**
Εντοπίστηκαν	193	461	276
Αφαιρέθηκαν	4	243	32

Όπως είναι φανερό, ο αριθμός των τιμών που αφαιρέθηκαν είναι πολύ μικρός σε σχέση με τον συνολικό αριθμό μετρήσεων της βάσης δεδομένων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε παράμετρος απαριθμεί περισσότερες από 1,5 εκατομμύριο τιμές, η βάση δεδομένων που προέκυψε μετά τον έλεγχο της 3-ωριαίας μεταβολής, δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές όσον αφορά στα στατιστικά χαρακτηριστικά, αλλά και την πληρότητα των χρονοσειρών των μετεωρολογικών παραμέτρων των σταθμών. Δημιουργήθηκαν, όμως, με τη διαδικασία αυτή, αδιαμφισβήτητα αξιόπιστες χρονοσειρές μετεωρολογικών μετρήσεων με ελαχιστοποίηση της πιθανότητας μεταφοράς εσφαλμένων τιμών στη χρονοσειρά του Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους που θα προκύψει για κάθε σταθμό.

2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συμπλήρωση Ελλειπουσών Τιμών

2.1 Εισαγωγή

Ένα από τα συχνότερα προβλήματα που συναντάει κανείς κατά την επεξεργασία χρονοσειρών μετεωρολογικών δεδομένων, είναι η παρουσία -συστηματική ή μη- περιόδων χωρίς μέτρηση ή καταγραφή. Τα κενά στις μετρήσεις ή στις καταγραφές των οργάνων μέτρησης εμφανίζονται είτε συγκεντρωμένα, είτε σποραδικά σε όλο το μήκος της χρονοσειράς. Η απουσία μετρήσεων μπορεί να οφείλεται σε ανθρωπογενείς ή τυχαίους παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, η έλλειψη δεδομένων για συνεχείς χρονικές περιόδους μπορεί να είναι αποτέλεσμα εσφαλμένων καταγραφών, βλάβης του οργάνου μέτρησης, διακοπής της τροφοδοσίας του ηλεκτρικού ρεύματος στους αυτόματους σταθμούς, αστοχίας του οργάνου λόγω έντονων καιρικών φαινομένων ή ακόμη και αδυναμίας του παρατηρητή στην πραγματοποίηση της μέτρησης τη συγκεκριμένη ώρα. Επίσης, η έλλειψη μετρήσεων μπορεί να οφείλεται και σε λάθη χειρισμού των οργάνων από το αρμόδιο προσωπικό.

Τα κενά που εμφανίζονται στις χρονοσειρές μπορούν να οδηγήσουν σε μη αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα και συμπεράσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αξιοπιστία του αποτελέσματος μειώνεται σημαντικά όταν στο δείγμα υπάρχουν πάρα πολλά κενά σε σχέση με το μέγεθός του. Επίσης, η έλλειψη μετρήσεων δυσχεραίνει σημαντικά τη μετάβαση σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, όπως για παράδειγμα όταν από μια σειρά ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα υπολογίζεται η αντίστοιχη μέση ημερήσια τιμή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιλογή του Τυπικού Μετεωρολογικού Μήνα βασίζεται στους ημερήσιους δείκτες των παραμέτρων (π.χ. μέση ημερήσια θερμοκρασία), η παρουσία έστω και μιας ελλείπουσας μέτρησης καθιστά τη συγκεκριμένη ημέρα μη αξιοποιήσιμη. Κατά συνέπεια, ο μήνας, ο οποίος περιέχει ελλείπουσες ημέρες, καθίσταται επίσης μη αξιοποιήσιμος, μειώνοντας σημαντικά το πλήθος των μετρήσεων της τελικής βάσης μετεωρολογικών δεδομένων.

Πριν από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων, είναι απαραίτητη η συμπλήρωση και αποκατάσταση των κενών που εμφανίζονται στη χρονοσειρά. Υπάρχει πληθώρα μεθοδολογιών στη βιβλιογραφία για την ορθή συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών σε χρονοσειρές. Κάποιες εκφράζονται με μια απλή γραμμική σχέση και άλλες με σύνθετες γραμμικές ή μη σχέσεις. Επίσης, στη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων χρησιμοποιούνται μέθοδοι που βασίζονται σε στοχαστικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τη χωρική και τη χρονική συσχέτιση των τιμών. Αν και υφίσταται πληθώρα μελετών σχετικά με τη διαδικασία αποκατάστασης των ελλειπουσών τιμών σε μια χρονοσειρά, δεν έχει καθιερωθεί συγκεκριμένη διαδικασία και η επιλογή των πλέον κατάλληλων μεθόδων είναι θέμα που εξετάζεται κατά περίπτωση, ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, τον αριθμό των ελλειπουσών μετρήσεων κ.λπ.

2.2 Το πρόβλημα των ελλειπουσών μετρήσεων

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των μεθόδων αντιμετώπισης των ελλειπουσών τιμών έχει γνωρίσει σημαντική πρόοδο, κυρίως λόγω των ραγδαίων εξελίξεων στην ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων με αυξημένες υπολογιστικές ικανότητες και χαμηλό κόστος. Η ανάπτυξη των μεθόδων αντιμετώπισης ελλειπουσών τιμών μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις χρονικές περιόδους (Schafer 1997). Η πρώτη περίοδος αφορά το χρονικό διάστημα πριν το 1980. Την περίοδο αυτή, οι ευρέως εφαρμοσμένες μέθοδοι αντιμετώπισης των ελλειπουσών τιμών περιλαμβάνουν: τη διαγραφή καταλόγου (listwise deletion) και τη διαγραφή κατά ζεύγη (pairwise deletion), οι οποίες αφορούν διαδικασία απομάκρυνσης των ελλειπουσών τιμών, την αντικατάσταση με το μέσο (mean substitution), στην οποία οι ελλείπουσες τιμές αντικαθίστανται με τη μέση τιμή των διαθέσιμων τιμών της μεταβλητής, την απλή μέθοδο Hot-Deck κατά την οποία οι ελλείπουσες μετρήσεις συμπληρώνονται με τυχαίες τιμές από το δείγμα, καθώς και μεθόδους βασισμένες στην παλινδρόμηση (regression-based methods). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ευρέως τη συγκεκριμένη περίοδο χαρακτηρίζονται από την απλότητα στη χρήση· ωστόσο, κατά τους ερευνητές, παράγουν μεροληπτικούς εκτιμητές. Η δεύτερη περίοδος σηματοδοτείται από τη δημοσίευση των Little & Rubin (2002) στην οποία χρησιμοποιείται η μέθοδος εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood estimation) και ο αλγόριθμος μεγιστοποίησης της προσδοκίας (expectation-maximization), όπου οι ελλείπουσες τιμές αντικαθίστανται αρχικά με κατ' εκτίμηση τιμές, υπολογίζεται η αναμενόμενη τιμή του λογαρίθμου της πιθανοφάνειας της πλήρους χρονοσειράς, επανεκτιμώνται οι ελλείπουσες τιμές και επαναλαμβάνεται η διαδικασία, έως ότου η πιθανοφάνεια, που παράγεται σε δύο διαδοχικές επαναλήψεις, να είναι σχεδόν ίση. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται στατιστικά εκπαρκής, παράγει εκτιμητές με αποδεκτά τυπικά σφάλματα, βασίζεται, όμως, σε συγκεκριμένα μοντέλα και δεν είναι εύκολη στην εφαρμογή της. Η τρίτη περίοδος (τέλος δεκαετίας '80 - αρχές δεκαετίας '90) χαρακτηρίζεται από τη χρήση της μεθόδου πολλαπλού καταλογισμού (multiple imputation). Στην πρώτη φάση της μεθόδου, κάθε ελλείπουσα τιμή της χρονοσειράς αντικαθίσταται από περισσότερες από μία πιθανές τιμές, οι οποίες προέρχονται από μια κατανομή, που προσδιορίζεται από τον ερευνητή, δημιουργώντας αντίστοιχο αριθμό πλήρως συμπληρωμένων χρονοσειρών. Στο δεύτερο βήμα, κάθε μία από τις πλήρεις χρονοσειρές αναλύεται με τυποποιημένες μεθόδους ανάλυσης δεδομένων για την επιλογή της συμπληρωμένης χρονοσειράς.

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται συστηματική έρευνα στον τομέα της συμπλήρωσης ελλειπουσών τιμών σε περιβαλλοντικές και μετεωρολογικές παραμέτρους (π.χ. θερμοκρασία αέρα, ατμοσφαιρική πίεση, σχετική υγρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, βροχόπτωση, φωτοσυνθετική πυκνότητα ροής φωτονίων (photosynthetic photon flux density), λανθάνουσα και αισθητή ροή θερμότητας (latent and sensible heat flux) κ.λπ.). Σε αυτούς τους τομείς, οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η μέθοδος αντικατάστασης με το μέσο όρο, η μέθοδος της παρεμβολής (interpolation) και της πρόβλεψης (extrapolation) καθώς και η ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis). Για παράδειγμα, οι Greco & Baldocchi (1996) και οι Jarvis et al. (1997) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο του μέσου όρου, ενώ η μέθοδος της παλινδρόμησης έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί από τους Goulden et al. (1996), Granier et al. (2000), Pilegaard et al. (2001), Monson et al. (2002) και Hui et al. (2003). Σε μελέτη των Kotsiantis et al. (2006), εξετάζεται η ακρίβεια διαφόρων μεθόδων παρεμβολής και συμπλήρωσης ελλειπουσών μετρήσεων ιστορικών δεδομένων θερμοκρασίας. Σε πρόσφατη μελέτη (Lo Presti et al. 2010) οι ερευνητές σύγκριναν δύο παραμετρικές και δύο μη παραμετρικές τεχνικές για τη συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών σε ημερήσιες μετρήσεις βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα, οι τέσσερις μέθοδοι παλινδρόμησης που εξετάστηκαν ήταν: (α) η απλή αντικατάσταση (simple substitution), (β) η κλασική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων μονοπα-

ραγοντικής παραμετρικής παλινδρόμησης (classical least squares univariate parametric regression), (γ) η παλινδρόμηση κατάταξης (ranked regression) και (δ) η μέθοδος του Theil (1950). Επιπροσθέτως, για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων περιβαλλοντικών και μετεωρολογικών παραμέτρων εφαρμόζονται: (1) η μέθοδος των νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks, Aubinet et al. 1999) ήτοι μια μέθοδος που περιγράφει σειρές δεδομένων οι οποίες προέρχονται από μη γραμμικές διεργασίες, (2) η μέθοδος της μέσης ενδοημερήσιας μεταβολής (mean diurnal variation), η οποία αντικαθιστά δεδομένα που λείπουν βασιζόμενη στον αντίστοιχο μέσο όρο των μετρήσεων για το χρονικό διάστημα της προηγούμενης και της επόμενης περιόδου, (3) η μέθοδος της μη γραμμικής παλινδρόμησης (non-linear regression analysis), όπου γίνεται χρήση απλών σχέσεων μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών, (4) η μέθοδος της χρήσης πινάκων αναζήτησης (look-up tables) που περιλαμβάνει ένα σύνολο από μέσες τιμές δεδομένων για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους που συσχετίζονται με περιβαλλοντικές μεταβλητές (Falge et al. 2001) και (5) η μέθοδος πολλαπλού καταλογισμού (multiple imputation), δηλαδή μια τεχνική Monte Carlo όπου τα κενά αντικαθίστανται με προσομοιωμένες τιμές (Hui et al. 2004).

Σε αντίστοιχες με την παρούσα διατριβή εργασίες, οι οποίες αφορούν στη δημιουργία βάσεων μετεωρολογικών δεδομένων, χρησιμοποιούνται απλές μέθοδοι, ανάλογα με τον αριθμό διαδοχικών ελλειπουσών μετρήσεων που εμφανίζονται στη χρονοσειρά. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διαδικασίες που έχουν ακολουθηθεί από ερευνητικές ομάδες για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων, αντίστοιχων παραμέτρων με αυτές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή.

Οι Walsh et al. (1983) κατά τη δημιουργία βάσης κλιματικών δεδομένων για χρήση στον υπολογισμό ενεργειακών καταναλώσεων κτηρίων, χρησιμοποίησαν 3-ωριαίες μετρήσεις από τις οποίες προέκυψαν ωριαίες χρονοσειρές με εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής. Η ίδια μέθοδος ακολουθήθηκε και για τη συμπλήρωση μεμονωμένων κενών των 3-ωριαίων μετρήσεων. Στην περίπτωση δύο διαδοχικών ελλειπουσών τιμών στις 3-ωριαίες μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, για τη συμπλήρωση της μιας εκ των δύο τιμών, χρησιμοποιήσαν μία απλουστευμένη συνάρτηση ενδοημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας της μορφής $T_t = T + a_t \cdot (T_{max} - T_{min})$ όπου: T_t η θερμοκρασία αέρα την ώρα t, T_{max} η μέγιστη θερμοκρασία της συγκεκριμένης ημέρας, T_{min} η ελάχιστη θερμοκρασία της συγκεκριμένης ημέρας και a_t μια συνάρτηση ως προς το χρόνο, η οποία, στην απλούστερη μορφή της, παίρνει μια σταθερή τιμή για κάθε ώρα του μήνα. Η δεύτερη ελλείπουσα τιμή, συμπληρώνεται με γραμμική παρεμβολή. Αντίστοιχα, για τη συμπλήρωση δύο διαδοχικών ελλειπουσών 3-ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας, αντικαθιστούν την πρώτη με τη μέση τιμή του μήνα για την ίδια ώρα και η δεύτερη συμπληρώνεται με γραμμική παρεμβολή. Τέλος, για τη συμπλήρωση δύο διαδοχικών ελλειπουσών 3-ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης, επαναλαμβάνουν την τελευταία μέτρηση.

Κατά τη δημιουργία ΤΜΕ (ΤΜΥ2) από το NREL των Η.Π.Α. (Marion & Urban 1995) χρησιμοποιήθηκε η υπάρχουσα βάση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας των ΗΠΑ της περιόδου 1961-1990. Οι ερευνητές αυτοί αναφέρουν ότι η συμπλήρωση ελλειπουσών ωριαίων μετρήσεων έως και 5 διαδοχικών ωρών πραγματοποιήθηκε με γραμμική παρεμβολή. Για τη συμπλήρωση κενών από 6 έως 47 ώρες χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις γειτονικών ημερών προσαρμόζοντας τις τιμές, ούτως ώστε να μην εμφανίζουν ασυνέχειες στο σημείο ένωσης των ημερήσιων χρονοσειρών. Για τη συμπλήρωση των συνεχόμενων ελλειπουσών νυκτερινών μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ομοίως η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής. Αντίστοιχα, για τις ίδιες περιόδους οι ελλείπουσες μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας συμπληρώθηκαν με γραμμική παρεμβολή. Στη συνέχεια, οι συμπληρωμένες τιμές προσαρμόστηκαν, προκειμένου να αντιμετωπιστούν ασυνέχειες που παρουσιάζονται κοντά στην ανατολή και τη δύση του ήλιου.

Οι Petrakis et al. (1996) κατά την παραγωγή ΤΜΕ για την Αθήνα, αναφέρουν ότι για τη συμπλήρωση έως και έξι διαδοχικών ελλειπουσών ωριαίων μετρήσεων χρησιμοποιούν τη μέθοδο της

γραμμικής παρεμβολής. Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές σε νεότερη εργασία (Argiriou et al. 1999) για τη μετατροπή των 3-ωριαίων χρονοσειρών σε ωριαίες χρονοσειρές. Για τη συμπλήρωση μεγαλύτερου αριθμού διαδοχικών ελλειπουσών μετρήσεων χρησιμοποίησαν είτε απλή είτε πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές την ολική ηλιακή ακτινοβολία και τις τιμές της ίδιας της παραμέτρου κατά την προηγούμενη ώρα.

Ο Skeiker (2004) για τη συμπλήρωση έως και 6 διαδοχικών ελλειπουσών μετρήσεων στις ωριαίες χρονοσειρές χρησιμοποίησε τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. Για τη συμπλήρωση 6 *έως* 48 διαδοχικών ωριαίων ελλειπουσών μετρήσεων υιοθέτησε τις τιμές από γειτονικές ημέρες. Τέλος, για τη συμπλήρωση διαδοχικών ελλειπουσών μετρήσεων περισσότερων των 48 και έως και ένα έτος, χρησιμοποίησε τις τιμές της ίδιας περιόδου από επιλεγμένο έτος χωρίς ελλείψεις. Η επιλογή του έτους από το οποίο χρησιμοποιούνται οι τιμές για τη συμπλήρωση των κενών, βασίζεται στην εξεύρεση περιόδου για την οποία οι μετρήσεις πριν και μετά την περίοδο του κενού έχουν τον καλύτερο συντελεστή συσχέτισης με τα δεδομένα πριν και μετά το προς συμπλήρωση κενό. Κατά τη δημιουργία ΤΜΕ σε διάφορες περιοχές της Κίνας, ο Jiang (2010) προκειμένου να συμπληρώσει τις ωριαίες χρονοσειρές, χρησιμοποίησε τη μέθοδο της μέσης ενδοημερήσιας μεταβολής, συμπληρώνοντας τα κενά με γραμμική παρεμβολή μεταξύ της προηγούμενης και της επόμενης διαθέσιμης μέτρησης την ίδια ώρα. Τη μέθοδο αυτή τη χρησιμοποίησε για τη συμπλήρωση διαδοχικών ελλειπουσών ωριαίων μετρήσεων χρονικής διάρκειας έως και 5 ημερών.

Οι Kemp et al. (1983) πραγματοποίησαν σύγκριση 7 μεθόδων συμπλήρωσης ημερήσιων μέγιστων και ελάχιστων χρονοσειρών θερμοκρασίας αέρα. Οι μέθοδοι που εφάρμοσαν αφορούσαν μεθόδους συμπλήρωσης ελλειπουσών τιμών με τη χρήση των τιμών του ίδιου σταθμού και μεθόδους με τη χρήση μετρήσεων από γειτονικούς σταθμούς. Στην πρώτη ομάδα συμπεριέλαβαν τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής και τη μέθοδο του κινητού μέσου όρου. Στη δεύτερη ομάδα, η αντικατάσταση των ελλειπουσών τιμών έγινε με το μέσο όρο των εκτιμήσεων μεταξύ των τιμών γειτονικών σταθμών και τέσσερεις μεθόδους παλινδρόμησης που χρησιμοποιούν σταθμικές συναρτήσεις (weighted equations) για τον υπολογισμό των ελλειπουσών τιμών. Η διαφοροποίηση μεταξύ των τεσσάρων αυτών μεθόδων αφορά στον τρόπο καθορισμού των σταθμικών συντελεστών, καθώς και στην επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζουν οι Kemp et al. (1983), η αποδοτικότερη μέθοδος ήταν η μέθοδος σταθμικής πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης κατά την οποία οι σταθμικοί συντελεστές είναι ανάλογοι του τετραγώνου της τιμής τού συντελεστή συσχέτισης. Η μέθοδος αυτή αξιολογήθηκε και ως προς την ικανότητα συμπλήρωσης διαδοχικών ελλειπουσών τιμών ακόμη και διάρκειας μεγαλύτερης του ενός μηνός με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι Colliver et al. (1995) σύγκριναν τρεις μεθόδους συμπλήρωσης 3-ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας αέρα προκειμένου να παράγουν ωριαίες χρονοσειρές. Οι μέθοδοι που εξετάστηκαν ήταν η γραμμική παρεμβολή, η πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού και οι splines (κυβικές τμηματικά πολυωνυμικές καμπύλες). Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, η καλύτερη μέθοδος συμπλήρωσης των 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα ήταν η γραμμική παρεμβολή και για τη σχετική υγρασία οι splines.

Αντίστοιχη σύγκριση μεθόδων συμπλήρωσης ελλειπουσών ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα, αλλά για κενά διάρκειας έως και 6 ωρών, πραγματοποίησαν οι Claridge & Chen (2006). Οι μέθοδοι που εξέτασαν ήταν η γραμμική παρεμβολή, η παλινδρόμηση μιας μεταβλητής (single variable regression), η πολυωνυμική παρεμβολή (polynomial interpolation) και η παρεμβολή Lagrange. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους ανέδειξαν τη μέθοδο της πολυωνυμικής παρεμβολής και της γραμμικής παρεμβολής ως εκείνες με την καλύτερη απόδοση στη συμπλήρωση έως και 6 διαδοχικών ελλειπουσών μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα. Ως συμπέρασμα οι Claridge & Chen

(2006) αναφέρουν ότι, λόγω της απλότητας της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής, την προτείνουν ως καταλληλότερη για αντίστοιχες περιπτώσεις.

Τέλος, οι Kotsiantis et al. (2006) σύγκριναν πολυπλοκότερες τεχνικές παλινδρόμησης για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τη συμπλήρωση κενών μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα, η οποία υπολογίστηκε από ωριαίες μετρήσεις τεσσάρων ετών στην περιοχή της Πάτρας. Προκειμένου να κρίνουν την αξιοπιστία των μοντέλων, οι ερευνητές θεώρησαν το τελευταίο από τα 4 έτη, ως έτος προς συμπλήρωση. Χρησιμοποίησαν, ως μεταβλητές πρόβλεψης, τις μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες και συνδυασμό μήνα του έτους, αριθμό ημέρας στο μήνα και αριθμό ημέρας στο έτος. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι η μέθοδος δένδρων προσομοίωσης (Model Trees), η μέθοδος των κανόνων παλινδρόμησης (Regression Rules) και η μέθοδος της στιγμιαίας μάθησης και προσθετικής παλινδρόμησης (Instance Based Learning και Additive Regression). Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι ερευνητές συμπεραίνουν ότι η χρήση μεθόδων παλινδρόμησης, αξιοποιώντας δεδομένα από προηγούμενα έτη, μπορεί να συμπληρώσει με ικανοποιητική αξιοπιστία ελλείπουσες τιμές μιας χρονοσειράς μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα. Η χρήση στα μοντέλα παλινδρόμησης δεδομένων του προηγούμενου έτους παρουσίασε συντελεστή συσχέτισης 0,91, ενώ η αξιοποίηση δεδομένων 3 προηγούμενων ετών 0,93. Οι διαφορές των αποτελεσμάτων αξιολόγησης μεταξύ των μοντέλων δεν ήταν στατιστικά σημαντικές και, ως εκ τούτου, θεωρήθηκαν εξίσου αξιόπιστα.

2.3 Κριτήρια αξιολόγησης μεθόδων

Για την αξιολόγηση της ικανότητας κάθε μεθόδου στη συμπλήρωση των ελλειπουσών τιμών, ελέγχεται η ακρίβεια πρόβλεψης καθώς και η απλότητα του μοντέλου. Η ακρίβεια πρόβλεψης χρησιμοποιείται ως βασικό κριτήριο, ενώ σε περίπτωση που δύο μέθοδοι παράγουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, επιλέγεται το απλούστερο μοντέλο. Η ακρίβεια πρόβλεψης της μεθόδου στη συμπλήρωση των ελλειπουσών τιμών αξιολογείται με τη χρήση στατιστικών δεικτών αξιοπιστίας, όπως ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2), το μέσο σφάλμα προκατάληψης (Mean Bias Error, MBE), η ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE) και ο δείκτης συμφωνίας (Index of Agreement, IA). Το ανεκτό επίπεδο σφαλμάτων, επίπεδο σημαντικότητας, κατά το στατιστικό έλεγχο υποθέσεων που πραγματοποιείται ορίστηκε στην παρούσα διατριβή ίσο με 0,05, καθώς το όριο αυτό θεωρείται στατιστικά ευρέως αποδεκτό. Ως εκ τούτου, οι μηδενικές υποθέσεις απορρίπτονται στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση των μεθόδων αποτέλεσε ο γραφικός έλεγχος των αποτελεσμάτων κατά τον οποίο ελέγχθηκε ποιοτικά η ικανότητα του μοντέλου ως προς τη διατήρηση της συνέχειας του φαινομένου, λαμβάνοντας υπόψη τους φυσικούς νόμους που διέπουν τις μεταβολές των μετεωρολογικών παραμέτρων που εξετάζονται (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση και ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας).

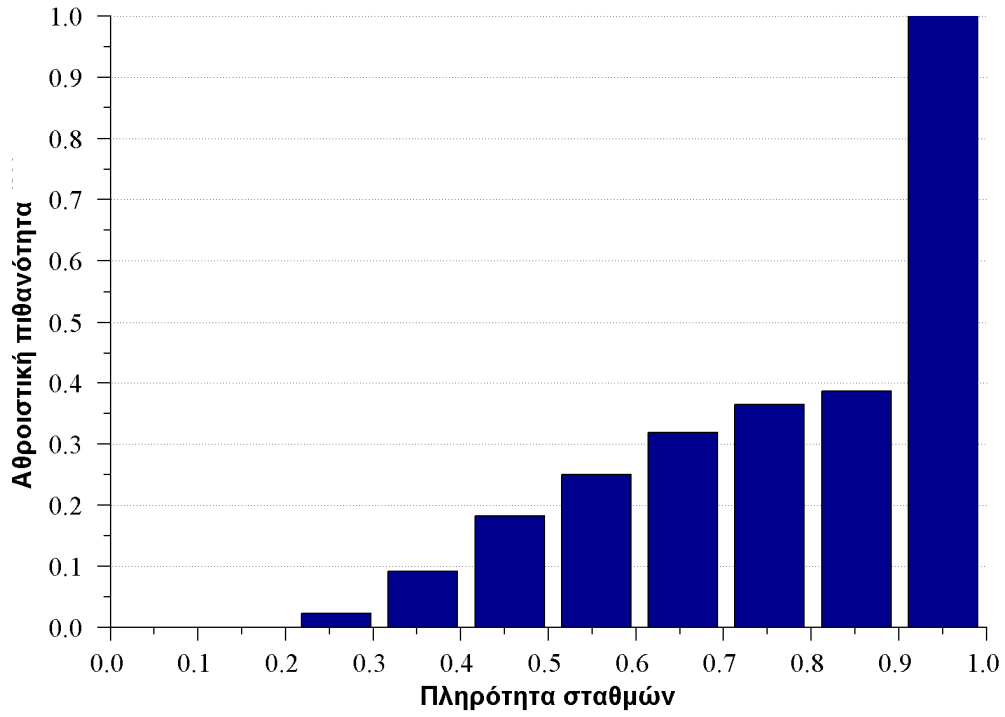
Ο αριθμός των κλάσεων στα ιστογράμματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη γραφική αξιολόγηση της κατανομής των παραμέτρων ή των σφαλμάτων τους, επιλέγεται ανάλογα με τον αριθμό n των δεδομένων από τη σχέση του Sturges (1926) σύμφωνα με τον οποίο ο αριθμός των κλάσεων προκύπτει ως $1 + 3{,}3 \cdot \log_{10}(n)$.

2.4 Πληρότητα των προς συμπλήρωση χρονοσειρών

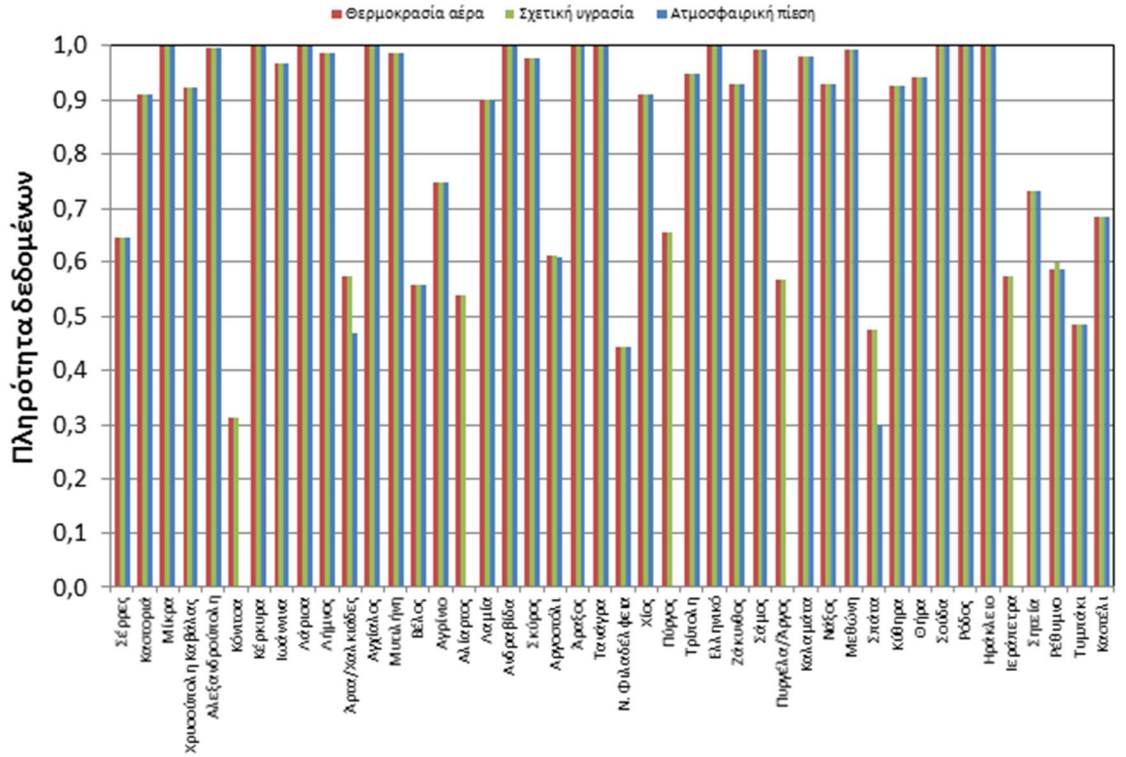
Η βάση δεδομένων, μετά από το πρώτο στάδιο επεξεργασίας, κατά το οποίο αφαιρέθηκαν οι ακραίες τιμές, αποτελείται πλέον από έγκυρες 3-ωριαίες μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης καθώς και ημερήσιες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας από τους 44

μετεωρολογικούς σταθμούς της ΕΜΥ. Μία πλήρης χρονοσειρά 3-ωριαίων μετρήσεων ενός μετεωρολογικού μεγέθους αποτελείται από 46824 τιμές και η αντίστοιχη πλήρης χρονοσειρά μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας από 5478 τιμές.

Οι χρονοσειρές των 3-ωριαίων μετρήσεων των σταθμών παρουσιάζουν, στην πλειοψηφία τους, υψηλή πληρότητα, καθώς ποσοστό μεγαλύτερο του 60% των σταθμών εμφανίζει πληρότητα μεγαλύτερη του 90% (Σχήμα 2.1). Ειδικότερα, στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται αθροιστικά το ποσοστό των σταθμών (άξονας y) που εμφανίζουν πληρότητα μικρότερη από τις τιμές του άξονα x. Οι σταθμοί με τη χαμηλότερη πληρότητα είναι αυτοί της Κόνιτσας, της Ν. Φιλαδέλφειας, των Σπάτων και του Τυμπακίου (Σχήμα 2.2). Στους συγκεκριμένους σταθμούς παρατηρούνται ελλείψεις που ξεπερνούν το 50% στις παραμέτρους που κατέγραψαν. Να σημειωθεί ότι οι σταθμοί Κόνιτσας, Αλιάρτου, Πύργου, Άργους και Ιεράπετρας δεν καταγράφουν ατμοσφαιρική πίεση. Ο σταθμός της Σούδας είναι ο μοναδικός σταθμός με πληρότητα 100% στις 3-ωριαίες μετρήσεις.



Σχήμα** 2.1: **Διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας μέσης πληρότητας 3-ωριαίων μετρήσεων των χρονοσειρών για το σύνολο των μετρούμενων παραμέτρων



***Σχήμα** 2.2: **Πληρότητα** 3-ωριαίων μετεωρολογικών μετρήσεων ανά σταθμό*

Πίνακας** 2.I: **Πληρότητα** (%) **ανά μήνα τεσσάρων σταθμών με τη χαμηλότερη μέση πληρότητα** 3-**ωριαίας καταγραφής μετεωρολογικών παραμέτρων

Σταθμός Κόνιτσας

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1985	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1986	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1987	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1988	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1989	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	12%	38%	38%	38%	17%
1990	36%	38%	38%	33%	30%	38%	38%	22%	38%	38%	38%	18%
1991	36%	38%	38%	35%	38%	38%	17%	38%	38%	38%	38%	21%
1992	36%	38%	46%	46%	48%	47%	48%	40%	44%	48%	46%	40%
1993	44%	48%	45%	46%	48%	48%	39%	37%	48%	47%	47%	44%
1994	46%	46%	46%	46%	45%	46%	27%	36%	47%	46%	47%	44%
1995	44%	40%	47%	45%	47%	47%	48%	16%	47%	46%	47%	42%
1996	46%	46%	46%	46%	47%	45%	41%	36%	58%	58%	52%	61%
1997	60%	61%	60%	60%	59%	60%	26%	60%	51%	59%	58%	52%
1998	58%	59%	60%	58%	50%	59%	35%	60%	61%	60%	57%	42%
1999	59%	59%	60%	60%	60%	61%	35%	60%	61%	59%	55%	42%

Σταθμός Ν. Φιλαδέλφειας

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1985	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1986	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1987	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1988	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1989	0%	64%	66%	63%	60%	60%	61%	60%	63%	67%	61%	59%
1990	60%	67%	63%	58%	60%	60%	60%	60%	60%	69%	68%	61%
1991	66%	68%	67%	60%	60%	60%	61%	60%	61%	69%	64%	61%
1992	66%	69%	65%	60%	60%	60%	61%	60%	61%	69%	68%	63%
1993	65%	68%	66%	60%	60%	60%	60%	54%	60%	58%	58%	56%
1994	63%	69%	67%	60%	57%	60%	60%	59%	61%	60%	60%	52%
1995	60%	60%	60%	57%	60%	60%	56%	52%	59%	60%	57%	56%
1996	59%	60%	60%	58%	59%	57%	56%	52%	60%	58%	57%	61%
1997	63%	63%	63%	62%	63%	63%	62%	63%	60%	63%	63%	63%
1998	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%
1999	63%	63%	63%	63%	63%	63%	60%	50%	50%	50%	51%	50%

Σταθμός Σπάτων

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1985	36%	25%	22%	33%	36%	37%	38%	21%	37%	36%	33%	24%
1986	37%	37%	34%	38%	38%	16%	25%	37%	29%	29%	37%	8%
1987	27%	38%	55%	35%	37%	50%	8%	0%	0%	0%	0%	0%
1988	0%	8%	37%	33%	22%	38%	37%	63%	60%	63%	54%	53%
1989	58%	62%	63%	63%	61%	63%	61%	56%	60%	63%	52%	53%
1990	58%	52%	61%	58%	59%	58%	55%	54%	59%	61%	56%	57%
1991	59%	59%	58%	58%	59%	58%	56%	53%	59%	56%	58%	58%
1992	54%	58%	60%	59%	59%	54%	55%	75%	68%	63%	61%	63%
1993	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	58%	55%	63%
1994	63%	63%	63%	59%	60%	63%	50%	35%	30%	43%	51%	48%
1995	44%	46%	45%	41%	38%	45%	38%	44%	50%	45%	45%	47%
1996	45%	50%	63%	59%	63%	58%	58%	43%	43%	50%	50%	49%
1997	47%	50%	46%	42%	47%	47%	47%	50%	43%	45%	50%	45%
1998	42%	48%	44%	37%	45%	47%	42%	44%	44%	47%	50%	58%
1999	59%	63%	63%	58%	60%	63%	52%	55%	48%	45%	30%	47%

Σταθμός Τυμπακίου

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1985	69%	71%	71%	58%	50%	50%	50%	53%	51%	54%	50%	50%
1986	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	54%	58%	59%
1987	56%	58%	58%	57%	60%	60%	56%	53%	58%	55%	55%	52%
1988	50%	55%	60%	50%	58%	57%	56%	54%	58%	56%	58%	54%
1989	55%	57%	56%	58%	55%	58%	58%	53%	55%	59%	55%	54%
1990	54%	56%	58%	53%	57%	58%	51%	55%	55%	59%	56%	55%
1991	57%	59%	58%	52%	52%	0%	0%	50%	55%	54%	59%	55%
1992	73%	70%	56%	54%	58%	56%	56%	53%	59%	58%	60%	60%
1993	54%	56%	58%	60%	55%	51%	50%	50%	50%	48%	0%	0%
1994	46%	49%	56%	48%	62%	57%	56%	55%	58%	58%	55%	51%
1995	58%	57%	50%	56%	56%	15%	0%	0%	67%	63%	63%	63%
1996	63%	63%	63%	79%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	73%
1997	91%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	20%	0%	0%	0%	0%
1998	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1999	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

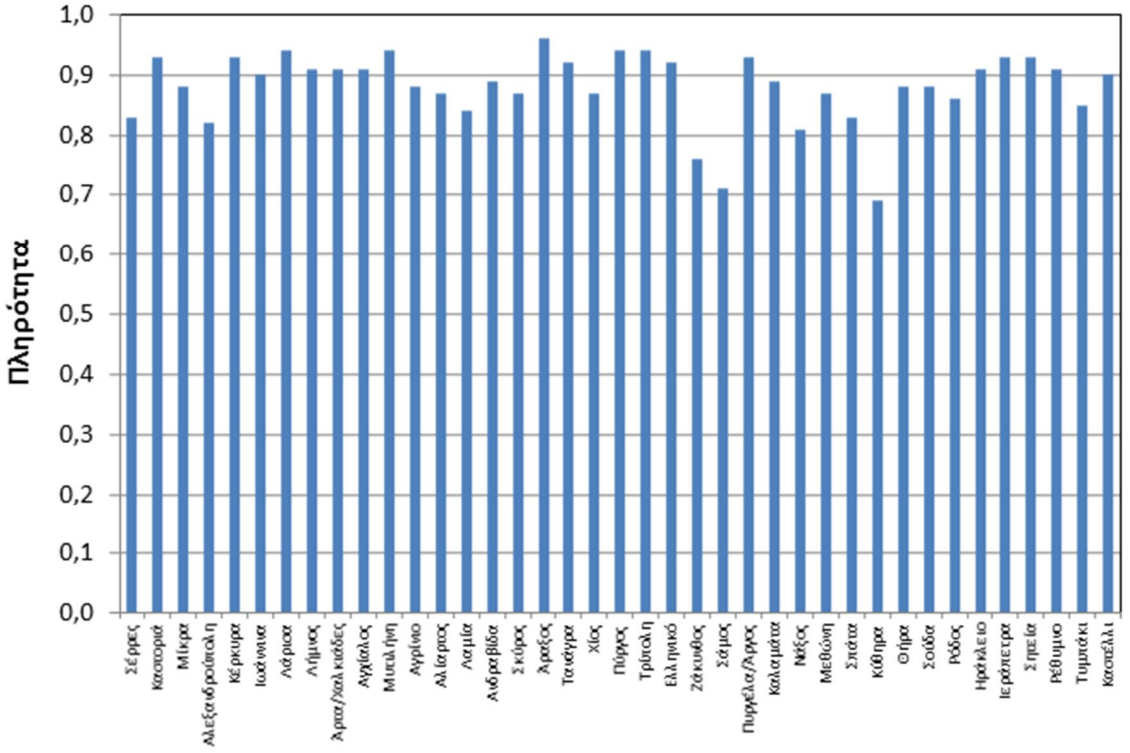
Εξετάζοντας αναλυτικότερα τους σταθμούς με τη χαμηλότερη πληρότητα (Πίνακας 2.I), παρατηρείται ότι οι σταθμοί Κόνιτσας και Ν. Φιλαδέλφειας παρουσιάζουν κενά για διάστημα τεσσάρων συνεχόμενων ετών, καθώς η λειτουργία των συγκεκριμένων σταθμών ξεκίνησε εντός του 1989. Ο

σταθμός των Σπάτων, τέθηκε εκτός λειτουργίας για χρονικό διάστημα 7 μηνών, ενώ τους υπόλοιπους μήνες παρουσιάζει σημαντικές ελλείψεις που οφείλονται, έως ένα βαθμό, στη μη καταγραφή μετρήσεων κατά τις νυκτερινές ώρες. Τέλος, ο σταθμός του Τυμπακίου εμφανίζει τρεις δίμηνες διακοπές λειτουργίας καθώς επίσης και διακοπή λειτουργίας από το Σεπτέμβριο του 1997 έως το τέλος της χρονοσειράς.

Στον Πίνακα 2.II καταγράφεται η πληρότητα των μετρήσεων, ανά ώρα μέτρησης, για το σύνολο της δεκαπενταετίας στους τέσσερεις σταθμούς με τη χαμηλότερη πληρότητα. Και οι 4 σταθμοί παρουσιάζουν από ελάχιστη έως μηδενική καταγραφή τις ώρες 00:00, 03:00 και 21:00, με τους σταθμούς της Κόνιτσας και της Ν. Φιλαδέλφειας να παρουσιάζουν χαμηλή πληρότητα και στην καταγραφή μετρήσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Να σημειωθεί ότι ο αριθμός του συνόλου των καταγραφών σε μία ώρα κατά τη διάρκεια της 15-ετίας είναι 5478 μετρήσεις.

Πίνακας** 2.II: **Πληρότητα καταγραφής μετεωρολογικών μετρήσεων σταθμών ανά ώρα μέτρησης

Ώρα μέτρησης (UTC)	**Κόνιτσα**	**Ν. Φιλαδέλφεια**	**Σπάτα**	**Τυμπάκι**
0:00	0%	0%	0%	8%
3:00	0%	0%	1%	10%
6:00	65%	73%	90%	80%
9:00	39%	73%	89%	80%
12:00	65%	73%	90%	80%
15:00	15%	57%	35%	41%
18:00	65%	73%	74%	80%
21:00	0%	7%	0%	9%

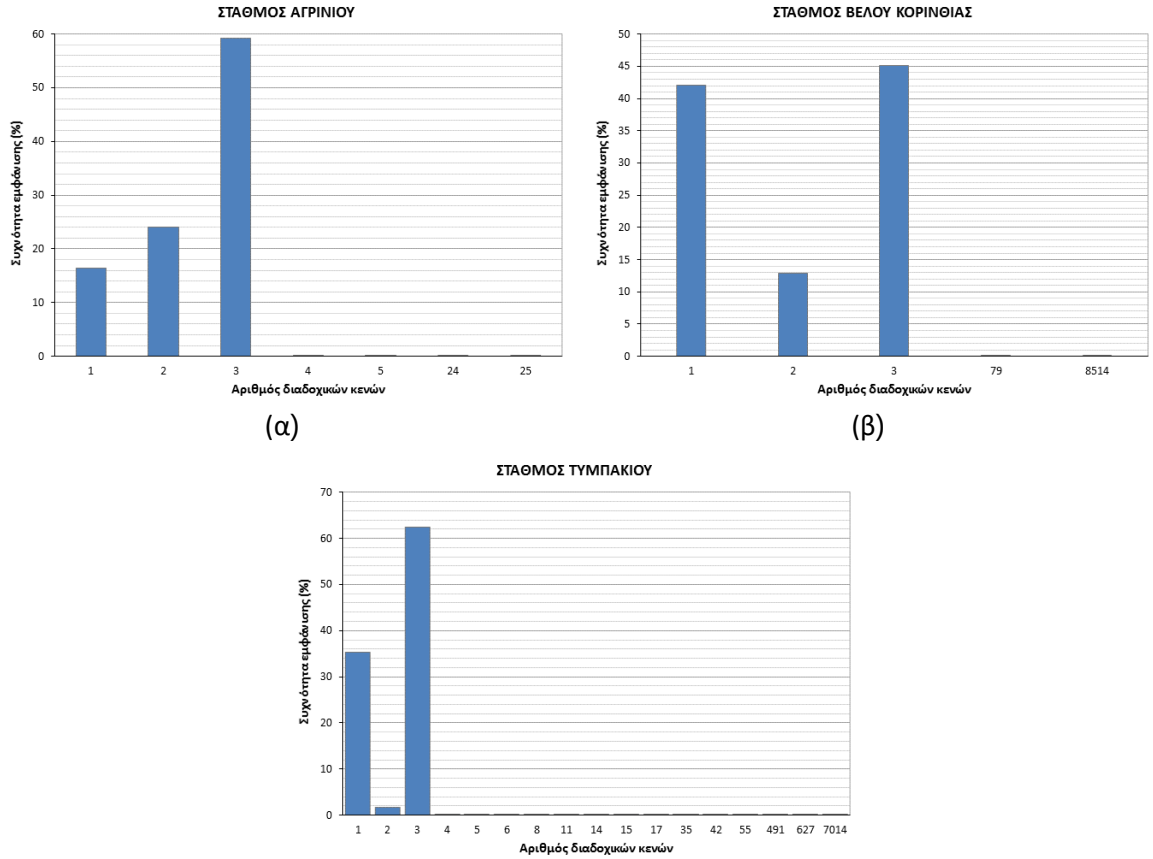


Σχήμα** 2.3: **Πληρότητα μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας στο σύνολο της** 15-**ετίας

Όσον αφορά στην πληρότητα των χρονοσειρών διάρκειας ηλιοφάνειας (Σχήμα 2.3), το 48% των σταθμών παρουσιάζουν πληρότητα μεγαλύτερη του 90%. Ο σταθμός της Χρυσούπολης δεν συμπεριλαμβάνεται, καθώς παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή πληρότητα. Στα χαμηλότερα επίπεδα πληρότητας βρίσκονται οι σταθμοί της Κόνιτσας, της Ν. Φιλαδέλφειας, της Ζακύνθου, της Σάμου και των Κυθήρων. Η πληρότητα στους συγκεκριμένους σταθμούς κυμαίνεται μεταξύ 65% και 75%.

2.5 Μεθοδολογία

Η επιλογή της μεθόδου συμπλήρωσης των ελλειπουσών μετρήσεων, εξαρτήθηκε από την υπό μελέτη μετεωρολογική παράμετρο, τον αριθμό των διαδοχικών κενών και τη συχνότητα καταγραφής (3-ωριαία ή ημερήσια καταγραφή). Για κάθε σταθμό διερευνήθηκε ο αριθμός των διαδοχικών κενών καθιστώντας δυνατό τον προσδιορισμό της αναμενόμενης πληρότητας μετά από την εφαρμογή της κάθε μεθόδου.



Σχήμα** 2.4: **Συχνότητα εμφάνισης αριθμού διαδοχικών κενών** 3-**ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα σε τρεις σταθμούς

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζονται τρία τυπικά παραδείγματα κατανομής διαδοχικών ελλειπουσών μετρήσεων στις χρονοσειρές 3-ωριαίων τιμών θερμοκρασίας αέρα τριών σταθμών. Στο σταθμό του Αγρινίου, ο μέγιστος αριθμός διαδοχικών ελλειπουσών μετρήσεων είναι 25, που αντιστοιχεί σε χρονικό διάστημα 3 ημερών, ενώ από τα συνεχόμενα κενά τιμών που παρουσιάζει ο σταθμός, μικρός αριθμός αφορά κενά μεγαλύτερα των τριών διαδοχικών μετρήσεων. Ακόμη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε μικρό αριθμό διαδοχικών κενών παρουσιάζει ο σταθμός του Βέλου Κο-

ρινθίας, ωστόσο εμφανίζει μέγιστο διαδοχικό κενό χρονικής διάρκειας 35 μηνών. Από την κατανομή των διαδοχικών κενών του σταθμού Τυμπακίου φαίνεται χαρακτηριστικά ότι ο σταθμός έχει σημαντικές ελλείψεις 3 συνεχόμενων μετρήσεων που οφείλονται σε ελλείψεις καταγραφών κατά τις νυκτερινές ώρες. Ο συγκεκριμένος σταθμός παρουσιάζει, επίσης, σποραδικές ελλείψεις διάρκειας έως και δύο μηνών κατά τη διάρκεια της 15-ετίας, καθώς και διακοπή καταγραφής για συνεχόμενο χρονικό διάστημα 28 μηνών.

Ως προς τον αριθμό των διαδοχικών κενών στις 3-ωριαίες μετρήσεις, υιοθετήθηκαν τρεις περιπτώσεις. Η πρώτη κατηγορία αφορά μεμονωμένα κενά, τα οποία κατά κανόνα οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες (έλλειψη μέτρησης, προσωρινή βλάβη οργάνων κ.λπ.), η δεύτερη κατηγορία έως και τρία διαδοχικά κενά, τα οποία συνήθως αφορούν έλλειψη καταγραφής κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών και η τρίτη κατηγορία, διαδοχικά κενά μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας που οφείλονται στην προσωρινή ή μόνιμη διακοπή λειτουργίας των σταθμών. Η παράμετρος της ημερήσιας ηλιοφάνειας εξετάστηκε χωριστά καθώς δεν αφορά τιμές οι οποίες παρουσιάζουν κάποια φυσική συνέχεια μεταξύ τους και, ως εκ τούτου, δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν κατά τον ίδιο τρόπο με τις μετεωρολογικές παραμέτρους που παρουσιάζουν ενδοημερήσια μεταβολή.

2.5.1 Κατηγορία 1: Συμπλήρωση μεμονωμένων κενών 3-ωριαίων μετρήσεων

Για τη συμπλήρωση των μεμονωμένων κενών στις χρονοσειρές της θερμοκρασίας αέρα, της σχετικής υγρασίας και της ατμοσφαιρικής πίεσης, εφαρμόστηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής. Ένα από τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν είναι η πιθανή αλλοίωση της μέγιστης θερμοκρασίας του 24-ώρου, όταν αυτή είναι ελλείπουσα μέτρηση. Για το σκοπό αυτό, στις χρονοσειρές της θερμοκρασίας αέρα, τα μεμονωμένα κενά συμπληρώνονται υπό την προϋπόθεση ότι η γραφική απεικόνιση της μεταβολής, στο σημείο που εμφανίζεται το κενό, δεν αλλάζει κλίση, ελέγχοντας την κλίση της ευθείας γραμμής που παρεμβάλλει τα διαδοχικά σημεία $(x_i, f(x_i))$ πριν και μετά τη θέση του κενού, σύμφωνα με τη σχέση:

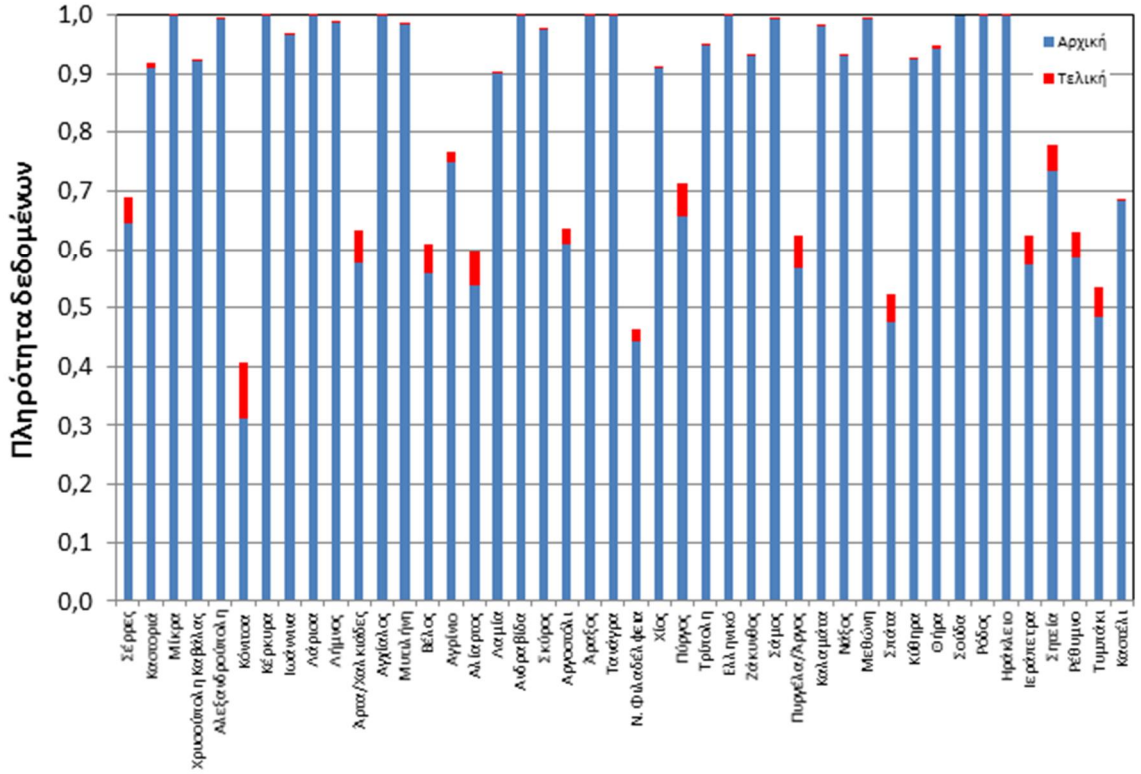
$$m = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \tag{2.1}$$

Στη συνέχεια συμπληρώνεται η ελλείπουσα τιμή σύμφωνα με τη σχέση:

$$x_h = x_{h-3} \frac{x_{h-3} - x_{h+3}}{2} \tag{2.2}$$

όπου: x_h, η ελλείπουσα τιμή στην ώρα h,
x_{h-3}, η προηγούμενη 3-ωριαία μέτρηση,
x_{h+3}, η επόμενη 3-ωριαία μέτρηση.

Η εφαρμογή της γραμμικής παρεμβολής για τη συμπλήρωση των μεμονωμένων κενών αύξησε την πληρότητα των σταθμών σύμφωνα με το Σχήμα 2.5. Μετά από το πρώτο στάδιο συμπλήρωσης των ελλειπουσών 3-ωριαίων τιμών, ο αριθμός των σταθμών με πληρότητα 100% στις 3-ωριαίες μετρήσεις αυξήθηκε σε 10 καθώς, εκτός από το σταθμό της Σούδας που ήταν πλήρης, προστέθηκαν οι σταθμοί Μίκρας, Κέρκυρας, Λάρισας, Αγχιάλου, Ανδραβίδας, Τανάγρας, Ελληνικού, Ρόδου και Ηρακλείου.



Σχήμα** 2.5: **Πληρότητα** 3-**ωριαίων χρονοσειρών θερμοκρασίας αέρα μετά τη συμπλήρωση των μεμονωμένων κενών

2.5.2 Κατηγορία 2: Συμπλήρωση τριών διαδοχικών κενών 3-ωριαίων μετρήσεων

Η συμπλήρωση έως και τριών διαδοχικών ελλειπουσών τιμών στις χρονοσειρές των 3-ωριαίων μετρήσεων, όπως προαναφέρθηκε, εξετάστηκε ως όριο βραχυπρόθεσμου κενού, καθώς αφορά σύνηθες διάστημα διαδοχικών κενών το οποίο, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οφείλεται στην έλλειψη μετρήσεων κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών. Σε πολλές περιπτώσεις, η μη καταγραφή κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών, είναι συστηματική, με αποτέλεσμα να αποκλείονται μέθοδοι συμπλήρωσης ελλειπουσών μετρήσεων, οι οποίες εξαρτώνται από τις τιμές στις ίδιες ώρες άλλων ημερών της χρονοσειράς. Τέτοιες μέθοδοι είναι η μέθοδος του μέσου όρου, κατά την οποία το κενό στη χρονοσειρά αντικαθίσταται με το μέσο όρο των διαθέσιμων μετρήσεων την ίδια χρονική στιγμή από όλα τα έτη της χρονοσειράς, καθώς και η μέθοδος της μέσης ενδοημερήσιας μεταβολής στην οποία τα κενά συμπληρώνονται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών της ίδιας ώρας κατά την προηγούμενη και επόμενη ημέρα εκείνης με το κενό. Λαμβάνοντας υπόψη τούς παραπάνω περιορισμούς, ελέγχθηκαν ως προς την ικανότητα συμπλήρωσης, η μέθοδος με φυσικές splines καθώς και η παρεμβολή Hermite. Αντικειμενικός στόχος των συναρτήσεων παρεμβολής τμηματικά πολυωνυμικών καμπυλών τρίτου βαθμού είναι ο προσδιορισμός ενός πολυωνύμου, το πολύ τρίτου βαθμού, που συνδέει ανά δύο τα σημεία παρεμβολής $(x_i, f(x_i))$, i=0,1,2,...,n. Από την άλλη, η παρεμβολή Hermite προσδιορίζει ένα πολυώνυμο, το οποίο συμφωνεί όχι μόνο με τις τιμές μιας συνάρτησης σε διακεκριμένα σημεία, αλλά και με τις τιμές των παραγώγων της στα ίδια σημεία.

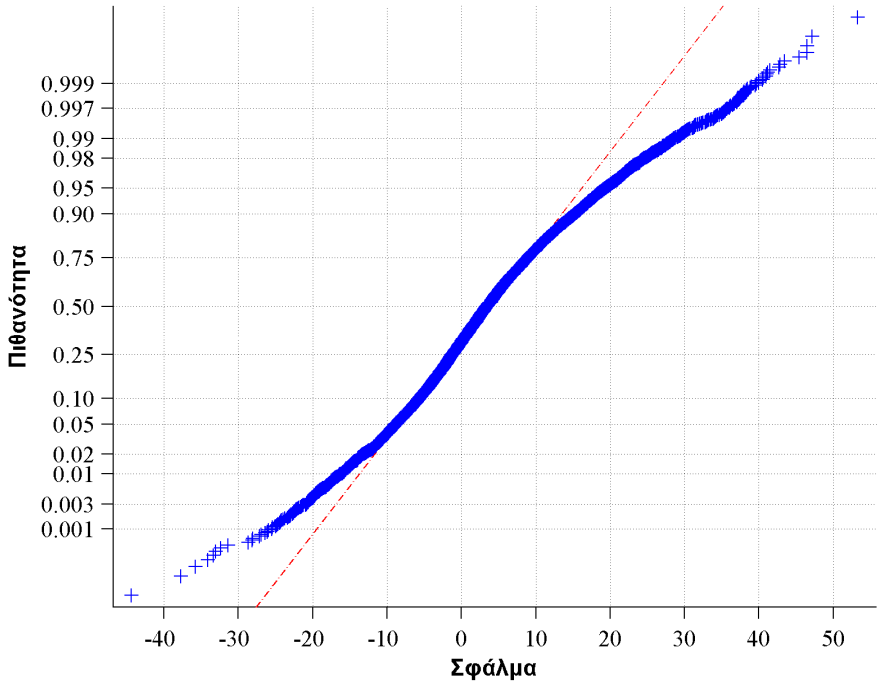
Για τον έλεγχο της ικανότητας των μεθόδων, χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά του σταθμού του Ελληνικού. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται πλησίον της ΕΜΥ, παρέχοντας μεγαλύτερη ασφάλεια ως προς την ποιότητα των μετρήσεων, εφόσον δίνεται η δυνατότητα άμεσης αποκατάστασης οποιασ-

δήποτε δυσλειτουργίας των οργάνων σε σχέση με τους απομακρυσμένους σταθμούς. Στο συγκεκριμένο σταθμό δημιουργήθηκαν τεχνητά κενά στις μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης κατά τις νυκτερινές ώρες (00:00, 03:00 και 21:00 UTC). Τα κενά τα οποία προέκυψαν συμπληρώθηκαν με τη μέθοδο φυσικών κυβικών τμηματικά πολυωνυμικών καμπυλών και με τη μέθοδο παρεμβολής Hermite. Από τη στατιστική αξιολόγηση των συμπληρωμένων τιμών με τις αντίστοιχες πραγματικές μετρήσεις, προέκυψαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.III.

Πίνακας** 2.III: **Στατιστική αξιολόγηση μεθόδων συμπλήρωσης τριών διαδοχικών μετρήσεων

Παράμετρος	R^2	MBE	RMSE	IA
	ΚΥΒΙΚΕΣ ΤΜΗΜΑΤΙΚΑ ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ			
Θερμοκρασία	0,95	-0,94 °C	1,65 °C	0,98
Υγρασία	0,57	2,06%	11,92%	0,85
Πίεση	0,99	-0,04 hPa	0,63 hPa	1,00
	***ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ** HERMITE*			
Θερμοκρασία	0,96	1,13 °C	1,43 °C	0,98
Υγρασία	0,69	-4,11%	8,38%	0,89
Πίεση	0,99	0,00 hPa	0,61 hPa	1,00

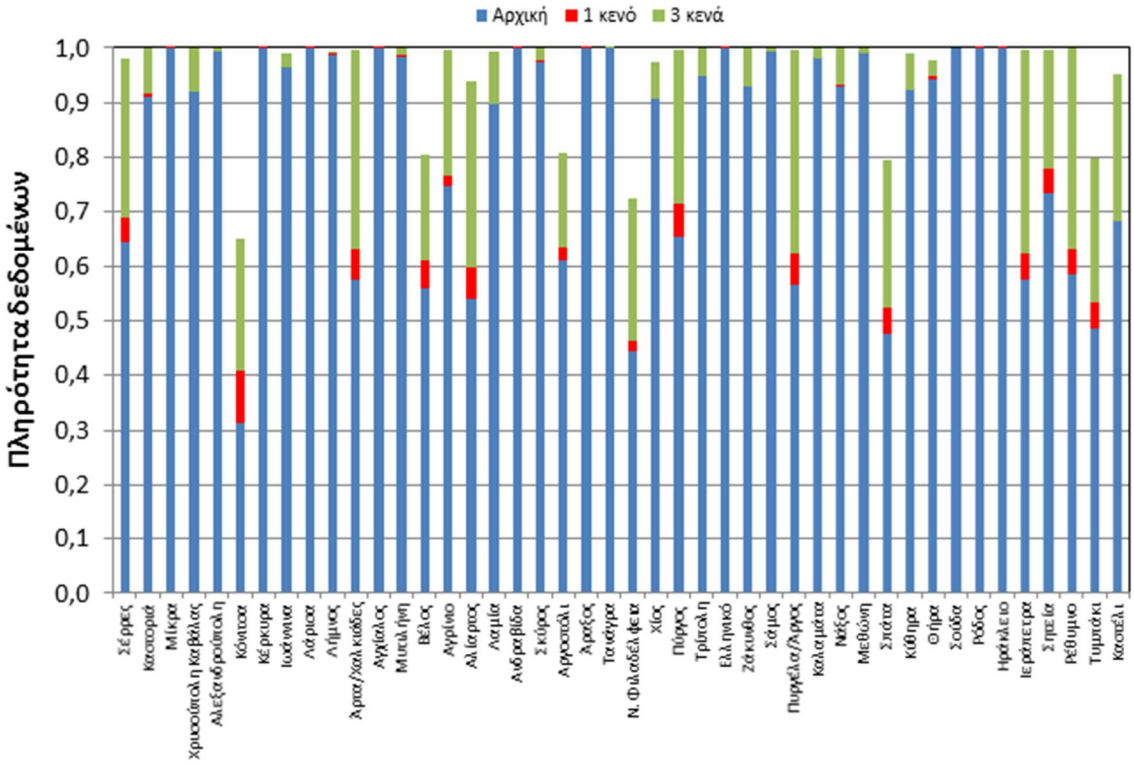
Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, διαπιστώνεται ότι και οι δύο μέθοδοι μπορούν να συμπληρώσουν με μεγάλη ακρίβεια τις ελλείπουσες μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα και ατμοσφαιρικής πίεσης, ενώ για τη σχετική υγρασία η τιμή τού συντελεστή προσδιορισμού είναι σχετικά χαμηλή (57% στην περίπτωση κυβικών τμηματικά πολυωνυμικών καμπυλών και 69% στην περίπτωση παρεμβολής Hermite) γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη μεταβλητότητα του μεγέθους σε σχέση με τις υπόλοιπες μετεωρολογικές παραμέτρους. Από τη σύγκριση των δύο μεθόδων προκύπτει ότι η μέθοδος παρεμβολής Hermite είναι αυτή που δίνει καλύτερη προσέγγιση και για τις τρεις μετεωρολογικές παραμέτρους. Περαιτέρω διερεύνηση απαιτείται για την επιλογή ή την απόρριψη της μεθόδου παρεμβολής Hermite στην περίπτωση της σχετικής υγρασίας. Εξετάζοντας το MBE, η τιμή −4,11% είναι αρκετά χαμηλή καθώς, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τιμή της σχετικής υγρασίας κατά τις νυκτερινές ώρες (68,07%), προκύπτει σχετική τιμή του MBE ίση με -6%. Χαμηλή τιμή παρουσιάζει επίσης και ο δείκτης RMSE, του οποίου η αριθμητική τιμή 8,38% καταδεικνύει μικρή τυπική απόκλιση των σφαλμάτων. Η τιμή του δείκτη IA κρίνεται επίσης ικανοποιητική καθώς οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο βρίσκονται κοντά στις τιμές των μετρήσεων (IA=0,89). Στο Σχήμα 2.6 εμφανίζεται η απεικόνιση μιας κανονικής κατανομής των διαφορών μεταξύ υπολογιζόμενων και πραγματικών τιμών σχετικής υγρασίας (ευθεία διακεκομμένη κόκκινη γραμμή) και τις διαφορές όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της παρεμβολής Hermite. Το γράφημα κανονικής κατανομής χρησιμοποιείται για τη γραφική εκτίμηση του κατά πόσον τα δεδομένα του οριζόντιου άξονα, θα μπορούσαν να έχουν προέλθει από μια κανονική κατανομή. Από τον έλεγχο της κανονικότητας των σφαλμάτων της μεθόδου παρεμβολής Hermite (Σχήμα 2.6) προκύπτει ότι το 90% των σφαλμάτων ακολουθούν κανονική κατανομή, ικανοποιώντας την προϋπόθεση κανονικής κατανομής των διαφορών μεταξύ των τιμών που προβλέπει το μοντέλο και των τιμών των μετρήσεων. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθώς επίσης και το γεγονός ότι στις ενεργειακές εφαρμογές η επίδραση της σχετικής υγρασίας δεν είναι παράμετρος μείζονος σημασίας, η μέθοδος παρεμβολής Hermite κρίθηκε κατάλληλη για τη συμπλήρωση τριών διαδοχικών ελλειπουσών 3-ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας.



Σχήμα** 2.6: **Διάγραμμα κανονικότητας υπολοίπων από την εφαρμογή της μεθόδου παρεμβολής** Hermite **για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων σχετικής υγρασίας

Η μέθοδος παρεμβολής Hermite χρησιμοποιήθηκε για τη συμπλήρωση δύο ή τριών διαδοχικών ελλειπουσών μετρήσεων αυξάνοντας σημαντικά την πληρότητα των σταθμών (Σχήμα 2.7). Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει πλέον 32 σταθμούς με πληρότητα μεγαλύτερη του 99%. Το σύνολο των σταθμών έχει πληρότητα μεγαλύτερη του 65%, ενώ μόλις δύο σταθμοί παρουσιάζουν πληρότητα σημαντικά μικρότερη του 80%. Στα δύο προηγούμενα στάδια, οι σταθμοί, οι οποίοι εμφάνιζαν κενά μόνο λόγω μη καταγραφής μετρήσεων κατά τις νυκτερινές ώρες, εμφανίζουν πλέον μικρό αριθμό ελλειπουσών μετρήσεων (σταθμοί Άρτας, Πύργου, Άργους, Ιεράπετρας και Ρεθύμνου). Ειδικότερα, στο συγκεκριμένο στάδιο:

- Συμπληρώθηκαν στο 100% οι χρονοσειρές ακόμη 5 σταθμών (Αλεξανδρούπολης, Σκύρου, Ζακύνθου, Καλαμάτας, Μεθώνης).
- 15 σταθμοί παρουσιάζουν πλέον κενά μέγιστης διάρκειας μικρότερης του ενός μηνός (Καστοριάς, Χρυσούπολης, Λήμνου, Άρτας/Χαλκιάδες, Μυτιλήνης, Αγρινίου, Αράξου, Πύργου, Τρίπολης, Σάμου, Πυργέλας/Άργους, Νάξου, Ιεράπετρας, Σητείας, Ρεθύμνου).
- Οι υπόλοιποι 14 σταθμοί παρουσιάζουν διαδοχικά κενά στις 3-ωριαίες μετρήσεις τους, που κυμαίνονται από 330 έως 20300 (Σερρών, Κόνιτσας, Ιωαννίνων, Βέλου, Αλιάρτου, Λαμίας, Αργοστολίου, Ν. Φιλαδέλφειας, Χίου, Σπάτων, Κυθήρων, Θήρας, Τυμπακίου, Καστελίου).



Σχήμα** 2.7: **Πληρότητα** 3-**ωριαίων χρονοσειρών θερμοκρασίας αέρα μετά από τη συμπλήρωση έως και τριών διαδοχικών κενών

2.5.3 Κατηγορία 3: Συμπλήρωση μακροχρόνιων κενών 3-ωριαίων μετρήσεων

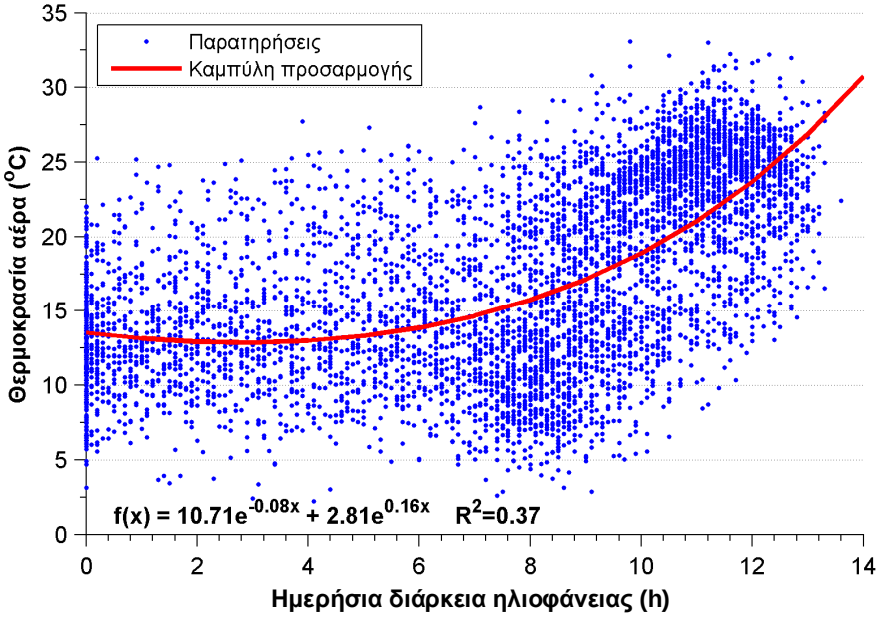
Η συμπλήρωση των μακροχρόνιων διαδοχικών κενών, δηλαδή διαδοχικά κενά διάρκειας μεγαλύτερης των 12 συνεχόμενων ωρών, αντιμετωπίστηκε χωριστά για κάθε μετεωρολογική παράμετρο. Η επιλογή της μεθόδου συμπλήρωσης των κενών βασίστηκε στη διαθεσιμότητα των μετρήσεων γειτονικών σταθμών. Η έννοια του γειτονικού σταθμού συνδέεται με την έννοια του μετεωρολογικού συστήματος. Ένας σταθμός θεωρείται γειτονικός προς έναν άλλο, εφόσον οι δύο σταθμοί ανήκουν στην ακτίνα εμβέλειας του ίδιου μετεωρολογικού συστήματος. Αν για παράδειγμα η ακτίνα εμβέλειας του μετεωρολογικού συστήματος είναι 500 km, τότε όλοι οι σταθμοί που ανήκουν στο ίδιο μετεωρολογικό σύστημα και απέχουν λιγότερο από 500 km θεωρούνται γειτονικοί. Στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από γειτονικούς σταθμούς στα σημεία όπου εμφανίζονται ελλείπουσες τιμές, τότε η ενδεδειγμένη μέθοδος συμπλήρωσης των κενών είναι η μέθοδος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Συμπλήρωση χρονοσειρών θερμοκρασίας αέρα

Η παράμετρος της θερμοκρασίας αέρα ακολουθεί συνήθως τυπική ενδοημερήσια μεταβολή, η οποία εξαρτάται κυρίως από τον τόπο, την εποχή και τη νέφωση ή ηλιοφάνεια. Στα πλαίσια αυτά, έγινε αρχικά μια προσπάθεια δημιουργίας γενικευμένων συναρτήσεων ενδοημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας αέρα, ανάλογα με το μήνα και την ημερήσια ηλιοφάνεια. Σκοπός της μεθόδου ήταν να δημιουργηθεί για κάθε μήνα της 15-ετίας ένας αριθμός συναρτήσεων, μία για κάθε κλάση ηλιοφάνειας, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη συμπλήρωση μακροχρόνιων κενών. Προϋπόθεση, βέβαια, για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, είναι η ύπαρξη επαρκών μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας ή η εκ των προτέρων συμπλήρωση των χρονο-

σειρών της ηλιοφάνειας. Για τον έλεγχο της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοσειρές θερμοκρασίας αέρα και ημερήσιας ηλιοφάνειας του σταθμού της Αράξου, που παρουσιάζει αυξημένη πληρότητα (96%) στη δεύτερη παράμετρο.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε έλεγχος ως προς τη σχέση που παρουσιάζει το μέγεθος της ημερήσιας ηλιοφάνειας με τη μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα, χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες μετρήσεις για το σύνολο της 15-ετίας. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 2.8. Παρόλο που είναι εμφανής η επίδραση της ηλιοφάνειας στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας αέρα, δεν προκύπτει συνάρτηση η οποία μπορεί να αποδώσει με ακρίβεια τη σχέση αυτή, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη πρόσθετοι παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες κατά το προηγούμενο διάστημα (σχετική υγρασία, βροχοπτώσεις, βαρομετρικά συστήματα κ.λπ.) που έχουν παράλληλη επίδραση στη διαμόρφωσή της. Η εκθετική καμπύλη προσαρμογής της σχέσης των δύο μεγεθών έχει ιδιαίτερα χαμηλή τιμή συντελεστή προσδιορισμού (R^2=0,37) και υψηλή τιμή RMSE (5,04°C).



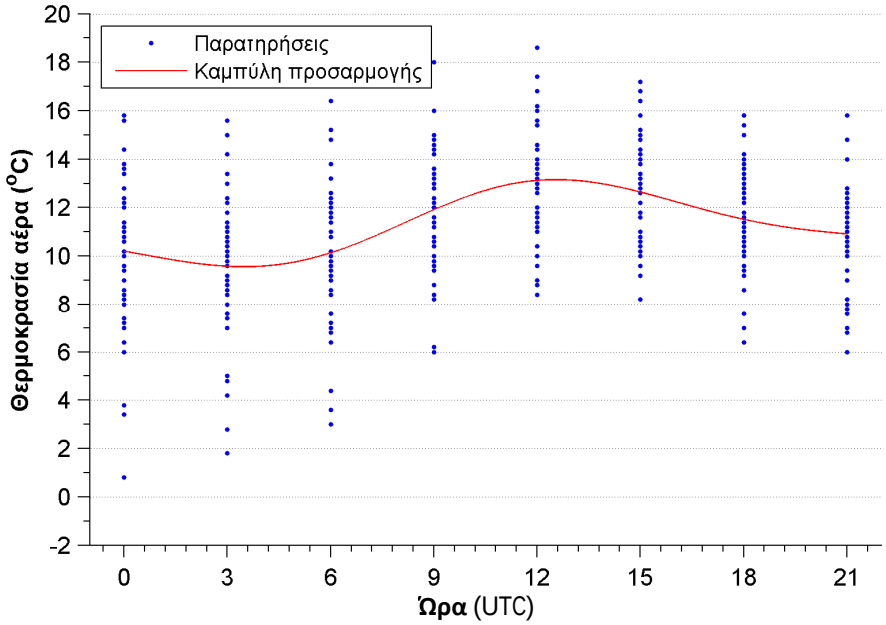
Σχήμα** 2.8: **Συσχέτιση μετρήσεων μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα με την ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας στο σταθμό του Αράξου

Για την περεταίρω αξιολόγηση της μεθόδου, πραγματοποιήθηκε δοκιμή σε ένα χειμερινό μήνα για τις μέρες με χαμηλές και υψηλές τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας και σε ένα θερινό μήνα για τις μέρες με υψηλές τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας. Για την περιγραφή της ενδοημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας αέρα χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση Fourier από την οποία προκύπτει περιοδική συνάρτηση ανάλυσης με $n = 2$ αρμονικούς όρους, της μορφής:

$$t(h) = a_0 + \sum_{i=0}^{n} a_i \cdot \cos(n \cdot w \cdot h) + b_i \cdot \sin(n \cdot w \cdot h) \qquad (2.3)$$

όπου: t, η θερμοκρασία αέρα την ώρα h,
a_0, ο σταθερός όρος της συνάρτησης,
a_i, b_i, οι συντελεστές της συνάρτησης,
w, η συχνότητα της περιόδου.

Αρχικά, για το μήνα Ιανουάριο από το σύνολο της 15-ετίας, οι ημέρες διαχωρίστηκαν σε 9 ομάδες ανάλογα με την μέτρηση ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας (διαστήματα ανά 1h ηλιοφάνειας). Τα αποτελέσματα της πρώτης ομάδας εμφανίζονται στο Σχήμα 2.9. Οι συντελεστές της περιοδικής συνάρτησης καθώς επίσης και τα όρια μεταβολής τους με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.IV. Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού που προκύπτει, μεταξύ των μετρήσεων και των προβλέψεων του μοντέλου, είναι ίση με 0,19 επιβεβαιώνοντας την αναμενόμενη (σύμφωνα με το διάγραμμα) χαμηλή ακρίβεια της περιοδικής συνάρτησης.

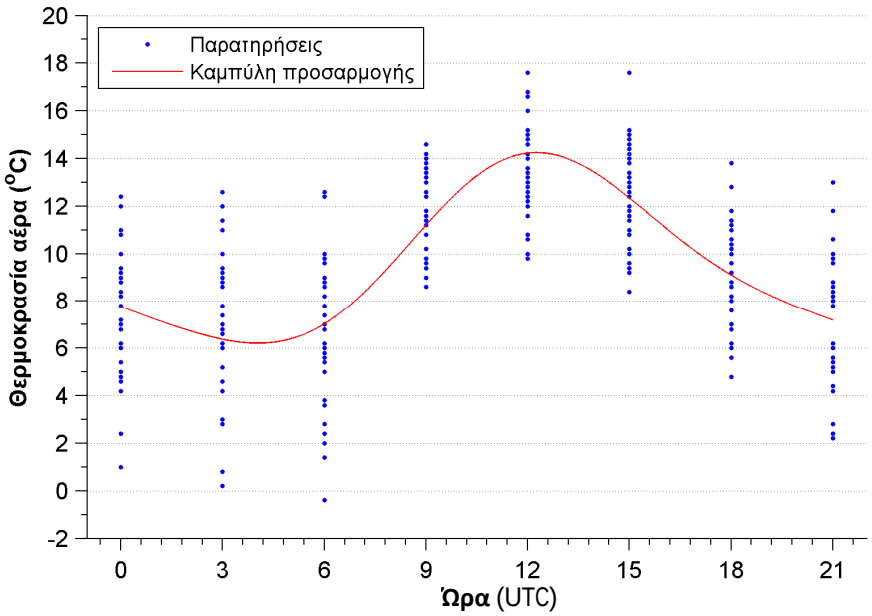


Σχήμα** 2.9: **Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα το μήνα Ιανουάριο σε ημέρες με χαμηλή ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας ($SD \leq 1$) στο σταθμό του Αράξου

Πίνακας** 2.IV: **Συντελεστές της αρμονικής συνάρτησης ενδοημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας αέρα του μήνα Ιανουαρίου για τις ημέρες με χαμηλή ηλιοφάνεια

Συντελεστής	Τιμή	Όρια εμπιστοσύνης	
a_o	11,23 °C	10,74 °C	11,72 °C
a_1	-1,48	-1,87	-1,08
b_1	-0,52	-4,02	2,99
a_2	0,45	-0,08	0,98
b_2	-0,25	-2,32	1,81
w	0,251	0,05	0,45

Κατ' αντιστοιχία, για το μήνα Δεκέμβριο και μόνο για τις ημέρες με υψηλές τιμές ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας (Σχήμα 2.10), η περιοδική συνάρτηση (Πίνακας 2.V), που περιγράφει τη μέση ενδοημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας αέρα, παρουσιάζει επίσης χαμηλή τιμή συντελεστή προσδιορισμού (R^2 = 0,49).

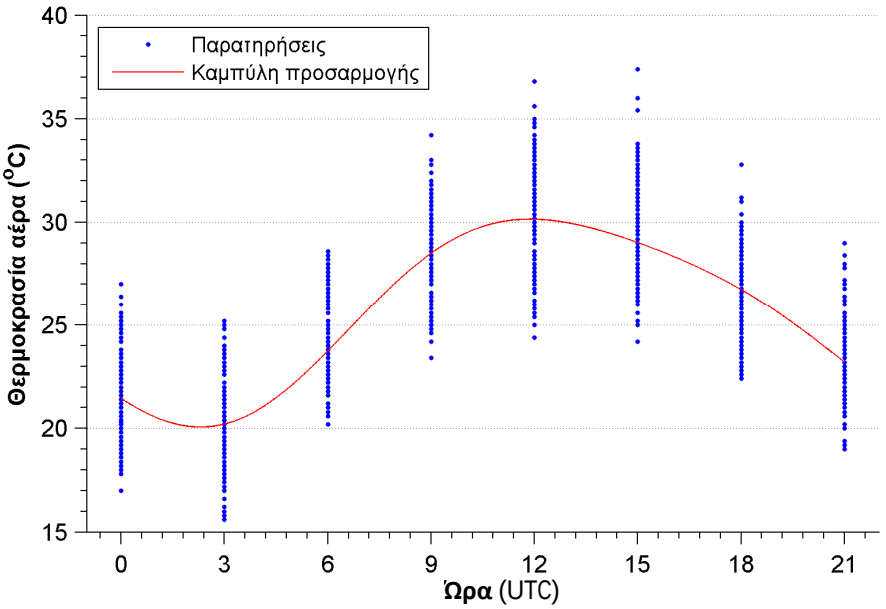


Σχήμα** 2.10: **Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα το μήνα Δεκέμβριο σε η-μέρες με υψηλή ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας** (SD>8) **στο σταθμό της Αράξου

Πίνακας** 2.V: **Συντελεστές της αρμονικής συνάρτησης ενδοημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας αέρα του μήνα Δεκεμβρίου σε ημέρες υψηλής ηλιοφάνειας

Συντελεστής	Τιμή	Όρια εμπιστοσύνης	
a_o	9,79 °C	9,41 °C	10,18 °C
a_1	-2,43	-3,45	-1,41
b_1	-3,01	-3,99	-2,02
a_2	0,40	-0,29	1,09
b_2	0,59	0,14	1,05
w	0,31	0,28	0,34

Για το μήνα Ιούλιο και για το σύνολο των μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα της 15-ετίας, οι ημέρες διαχωρίστηκαν σε 13 ομάδες σύμφωνα με τις τιμές των μετρήσεων της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση της ενδοημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας αέρα τις ημέρες του Ιουλίου, όπου η ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας εμφανίζει τιμές μεταξύ των 12 και 13 ωρών (Σχήμα 2.11). Παρατηρώντας το σχήμα διαπιστώνεται ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ ημερών με ίδια επίπεδα ηλιοφάνειας παρουσιάζει διαφορές έως και ±10°C, έχοντας μικρότερη διασπορά σε σχέση με τις ημέρες χαμηλής ηλιοφάνειας του Ιανουαρίου και τις ημέρες υψηλής ηλιοφάνειας του Δεκεμβρίου. Οι συντελεστές της περιοδικής συνάρτησης, καθώς επίσης και τα όρια μεταβολής τους με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, όπως προέκυψε κατά την εφαρμογή της ανάλυσης Fourier, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.VI. Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού είναι σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, καθώς η τιμή του είναι ίση 0,73. Αντίστοιχα, η τιμή του συντελεστή RMSE είναι ίση με 2,14°C.



Σχήμα** 2.11: **Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα το μήνα Ιούλιο σε ημέρες με υψηλή ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας**, $SD \in (12, 13]$, **στο σταθμό του Αράξου

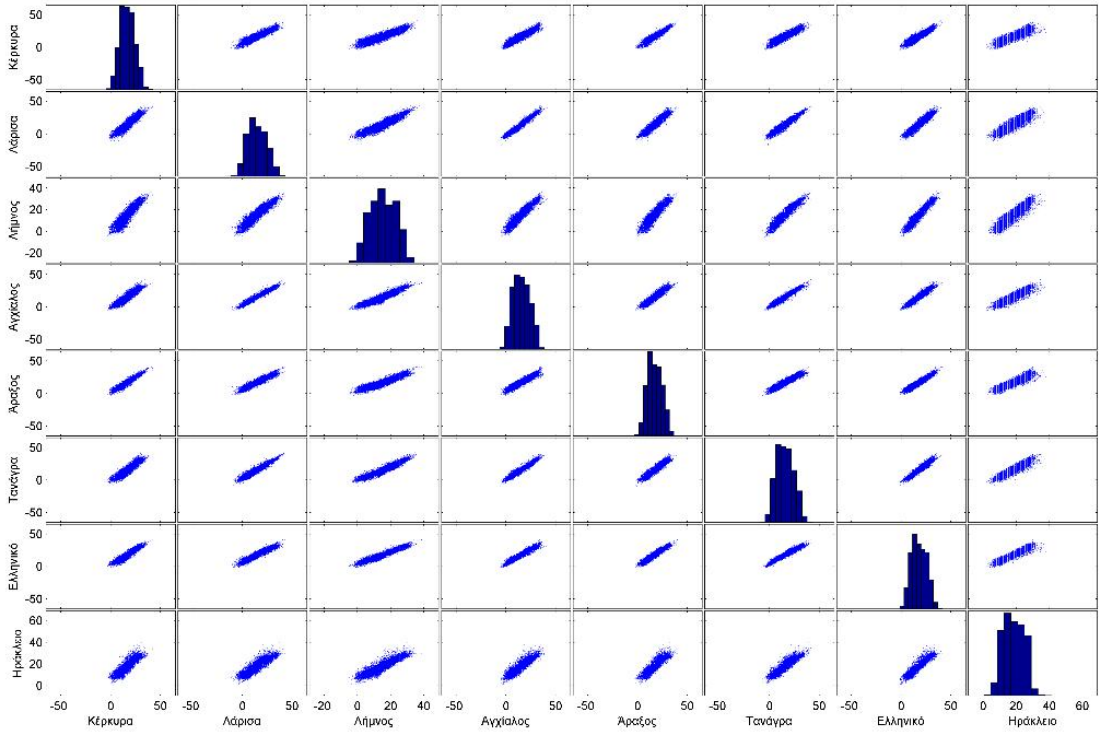
Πίνακας** 2.VI: **Συντελεστές της αρμονικής συνάρτησης ενδοημερήσιας μεταβολής θερμοκρασίας αέρα του μήνα Ιουλίου σε ημέρες υψηλής ηλιοφάνειας

Συντελεστής	Τιμή	Όρια εμπιστοσύνης	
a_o	25,59 °C	25,45 °C	25,74 °C
a_1	-4,32	-4,55	-1,97
b_1	-2,33	-2,685	2,98
a_2	0,16	-0,006	0,33
b_2	-0,74	-0,93	-0,56
w	0,28	0,27	0,29

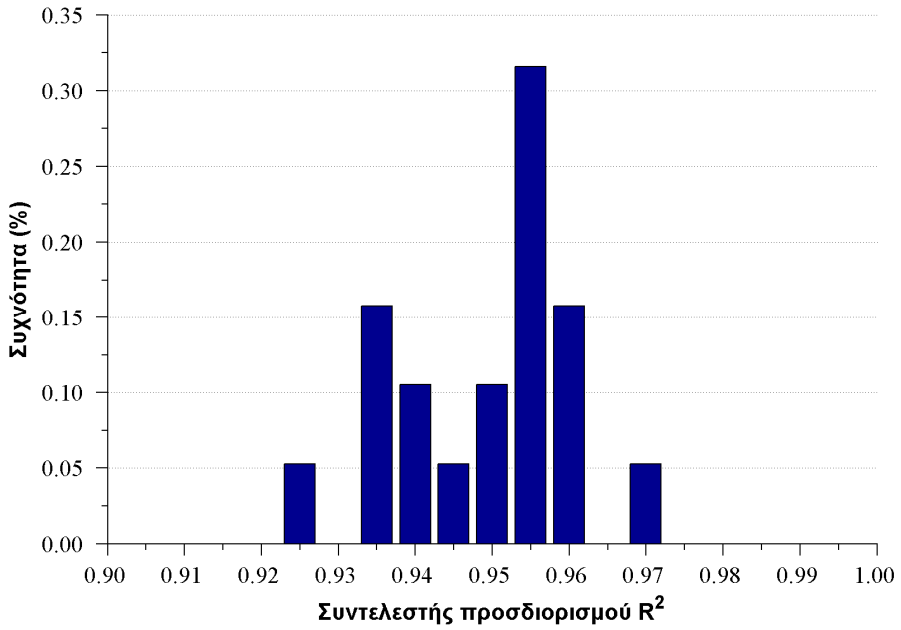
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα κατά τους θερινούς μήνες του έτους και τις ημέρες με υψηλές τιμές ηλιοφάνειας. Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι για τη συμπλήρωση των κενών στις συγκεκριμένες ημέρες θα πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας, περιορίζοντας σημαντικά το εύρος των ελλειπουσών τιμών που μπορούν να συμπληρωθούν. Ως εκ τούτου, η μέθοδος δεν κρίθηκε κατάλληλη και διερευνήθηκε η δυνατότητα συμπλήρωσης των ελλειπουσών τιμών με τη βοήθεια γειτονικών σταθμών.

Οι χρονοσειρές των 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα για το σύνολο της 15-ετίας παρουσιάζουν ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των γειτονικών σταθμών (Σχήμα 2.12). Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζονται τα διαγράμματα διασποράς τιμών θερμοκρασίας αέρα όλων των συνδυασμών 8 μετεωρολογικών σταθμών. Στο ίδιο σχήμα, τα γραφήματα στη διαγώνιο απεικονίζουν το διάγραμμα συχνοτήτων των τιμών θερμοκρασίας αέρα του μετεωρολογικού σταθμού που αντιστοιχεί στο ίδιο x και y. Ωστόσο, καθώς η θερμοκρασία αέρα εξαρτάται σημαντικά από το μικροκλίμα και την ιδιομορφία της περιοχής, επιλέχθηκε η μέθοδος της βηματικής γραμμικής παλινδρόμησης ούτως ώστε να αποκλείονται σταθμοί οι οποίοι, ως προς την ερμηνευτική τους αξία, δεν αποτελούν στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές και κατά συνέπεια θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά τη συμπλήρωση μεμονωμένων κενών της χρονοσειράς. Για την εισαγωγή ενός σταθμού

στο μοντέλο ελέγχεται η πιθανότητα που συνοδεύει την τιμή του λόγου F με προκαθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας ίσο με 0,05 και για την αφαίρεση ενός σταθμού από το μοντέλο ίση με 0,10.



***Σχήμα** 2.12: **Συσχέτιση των μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα** 15-ετίας μεταξύ των σταθμών*



Σχήμα** 2.13: **Διάγραμμα συχνοτήτων του συντελεστή προσδιορισμού** R^2 **των μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη συμπλήρωση των μακροχρόνιων ελλειπουσών τιμών της θερμοκρασίας αέρα

Με τη διαδικασία αυτή συμπληρώθηκαν οι χρονοσειρές της θερμοκρασίας αέρα 29 σταθμών. Για την αξιολόγηση των συναρτήσεων παλινδρόμησης, που προέκυψαν από την ανάλυση, το Σχήμα 2.13 απεικονίζει την κατανομή των τιμών του R^2 για στο σύνολο των προς συμπλήρωση σταθμών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στο σύνολο των περιπτώσεων η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού είναι μεγαλύτερη του 92% με πιθανότερη τιμή μεταξύ του 95% και 96%.

Καθώς οι παραπάνω τιμές των συντελεστών προσδιορισμού αφορούν τη χρήση του συνόλου της χρονοσειράς, έγινε έλεγχος ως προς την ακρίβεια των συναρτήσεων παλινδρόμησης που προέκυψαν για τη συμπλήρωση ενός συγκεκριμένου μήνα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά θερμοκρασίας αέρα του σταθμού τής Λήμνου. Η συνάρτηση παλινδρόμησης του σταθμού, όπως είχε προκύψει από την ανάλυση βηματικής γραμμικής παλινδρόμησης με τη χρήση της πλήρους χρονοσειράς, ήταν:

$$t_{[\Lambda]} = -0{,}515 + 0{,}085t_{[M]} + 0{,}351t_{[K]} + 0{,}075t_{[K\varepsilon]} - 0{,}054t_{[I]} - 0{,}071t_{[\Lambda]} - 0{,}021t_{[Av]} + 0{,}282t_{[T]} + 0{,}272t_{[X]} - 0.{,}043t_{[T\rho]} + 0{,}162t_{[E]} - 0{,}106t_{[K\alpha]} + 0{,}067t_{[\Sigma]} - 0.{,}021t_{[P]} \quad (2.4)$$

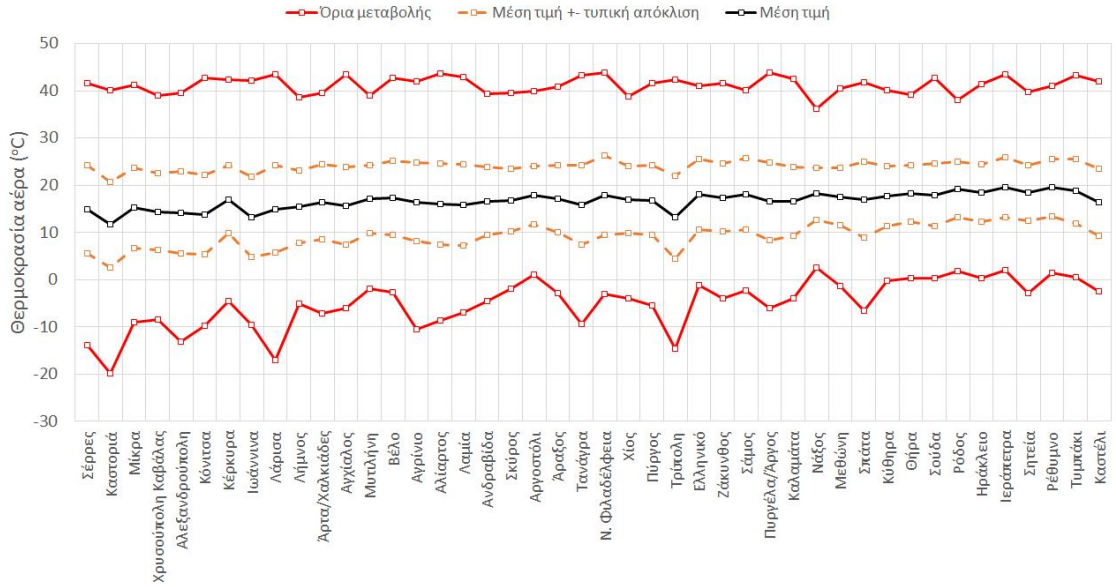
όπου: $t_{[\Lambda]}$, $t_{[M]}$, $t_{[K]}$, $t_{[K\varepsilon]}$, $t_{[I]}$, $t_{[\Lambda]}$, $t_{[Av]}$, $t_{[T]}$, $t_{[X]}$, $t_{[T\rho]}$, $t_{[E]}$, $t_{[K\alpha]}$, $t_{[\Sigma]}$, $t_{[P]}$, οι τιμές θερμοκρασίας αέρα σε ^oC των σταθμών Λήμνου, Μίκρας, Χρυσούπολης Καβάλας, Κέρκυρας, Ιωαννίνων, Λάρισας, Ανδραβίδας, Τανάγρας, Χίου, Τρίπολης, Ελληνικού, Καλαμάτας, Σούδας και Ρόδου, αντίστοιχα.

Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού του μοντέλου κατά την εφαρμογή του στην πλήρη χρονοσειρά, ήταν R^2 = 0,957. Ο σταθμός της Λήμνου παρουσιάζει διαδοχικά κενά 248 τιμών που εντοπίζονται το μήνα Οκτώβριο του 1999. Εξετάστηκε η ακρίβεια της συνάρτησης παλινδρόμησης (σχέση 2.4) στην πρόβλεψη τιμών για τον ίδιο μήνα των υπόλοιπων ετών της χρονοσειράς που δεν παρουσιάζουν ελλείψεις στις τιμές της θερμοκρασίας αέρα (Πίνακας 2.VII). Όπως φαίνεται και από τα στοιχεία του πίνακα, οι αριθμητικές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, με ελάχιστη τιμή 0,75 στην περίπτωση του Οκτωβρίου 1992. Οι τιμές του MBE ακόμη και στις περιπτώσεις των χαμηλότερων τιμών του R^2 είναι σημαντικά μικρές. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέση θερμοκρασία αέρα για το μήνα Οκτώβρη στο σταθμό της Λήμνου είναι 16.3^oC, στη δυσμενέστερη περίπτωση (Οκτώβριος 1996) προκύπτει ότι το σχετικό MBE είναι μόλις 2.7%.

Πίνακας** 2.VII: **Αξιολόγηση της συνάρτησης παλινδρόμησης στην ακρίβεια συμπλήρωσης τιμών θερμοκρασίας αέρα για το μήνα Οκτώβριο στο σταθμό της Λήμνου

Έτος	R^2	MBE (^oC)
1985	0,84	-0,16
1986	0,80	0,14
1987	0,88	-0,06
1988	0,85	0,12
1989	0,79	-0,23
1990	0,83	-0,03
1991	0,92	0,31
1992	0,75	-0,36
1993	0,85	0,02
1994	0,83	0,04
1995	0,81	0,12
1996	0,82	-0,45
1997	0,88	-0,07
1998	0,83	-0,07

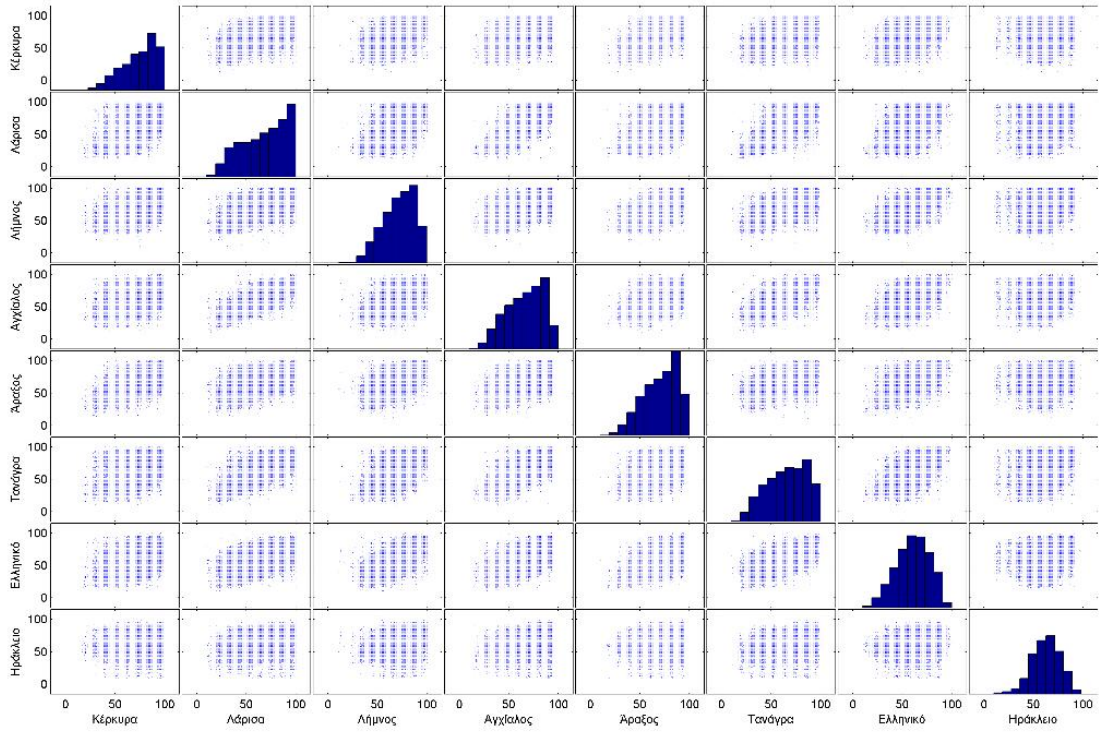
Λαμβάνοντας υπόψη τα θετικά αποτελέσματα από την αξιολόγηση της μεθόδου, συμπληρώθηκαν οι ελλείπουσες τιμές θερμοκρασίας του αέρα, δημιουργώντας μια πλήρη βάση δεδομένων για μια 15-ετία στους 44 υπό μελέτη σταθμούς. Στις συμπληρωμένες χρονοσειρές πραγματοποιήθηκε έλεγχος ως προς τα επιτρεπόμενα όρια μεταβολής καθώς και τη μέγιστη επιτρεπόμενη 3-ωριαία μεταβολή. Οι τιμές, οι οποίες βρέθηκαν εκτός ορίων, αντικαταστάθηκαν με τιμές που προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή. Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η μέση τιμή, το εύρος μεταβολής καθώς επίσης και η μεταβολή του 68,27% (± 1 τυπική απόκλιση) των 3-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα της πλήρους χρονοσειράς των σταθμών.



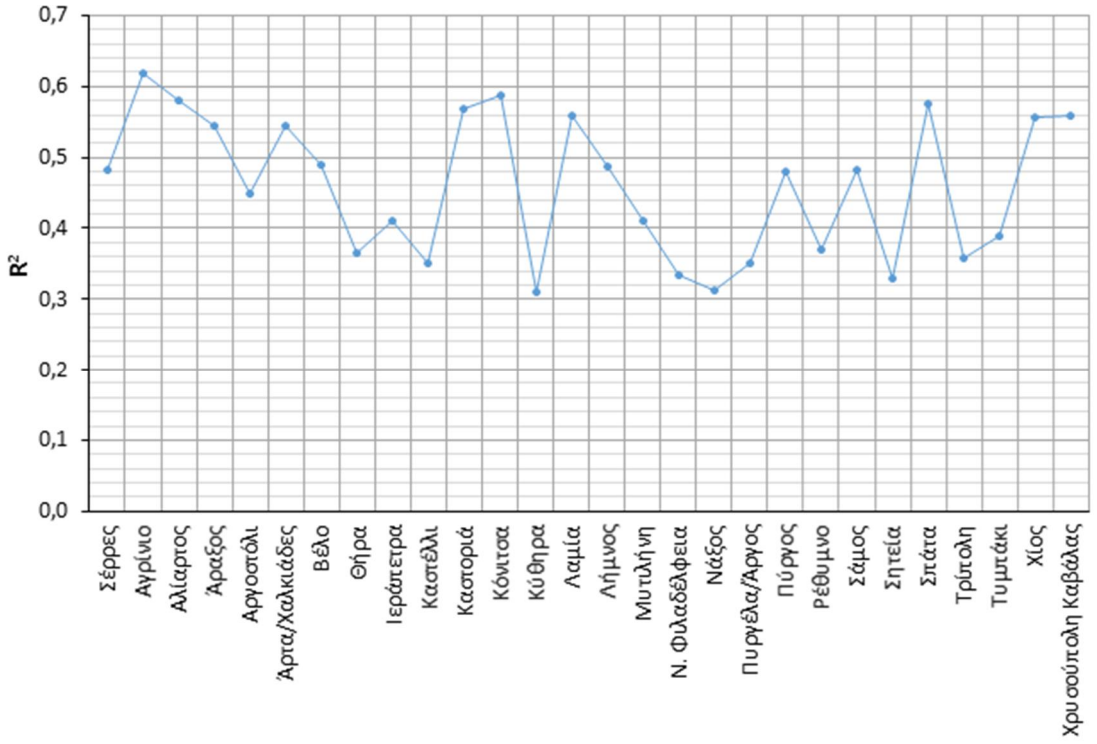
Σχήμα** 2.14: **Μέση τιμή και μεταβλητότητα των** 3**-ωριαίων μετρήσεων θερμοκρασίας αέρα** 15**-ετίας της συμπληρωμένης βάσης δεδομένων των σταθμών

Συμπλήρωση χρονοσειρών σχετικής υγρασίας

Σε αντίθεση με την παράμετρο της θερμοκρασίας αέρα, η σχετική υγρασία παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή συσχέτιση μεταξύ των χρονοσειρών των σταθμών (Σχήμα 2.15). Στο ίδιο σχήμα, τα γραφήματα στη διαγώνιο απεικονίζουν τα διαγράμματα συχνοτήτων όπως και παραπάνω για τη θερμοκρασία αέρα. Ακόμη και οι σταθμοί της Τανάγρας (ηπειρωτικός σταθμός) και του Ελληνικού (παραθαλάσσιος σταθμός), των οποίων η απόσταση μεταξύ τους είναι μόλις 50 km, η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού της γραμμικής συσχέτισης των μετρήσεων της σχετικής υγρασίας τους είναι μόλις 0,459, όταν η αντίστοιχη τιμή για τη θερμοκρασία αέρα είναι 0,926.



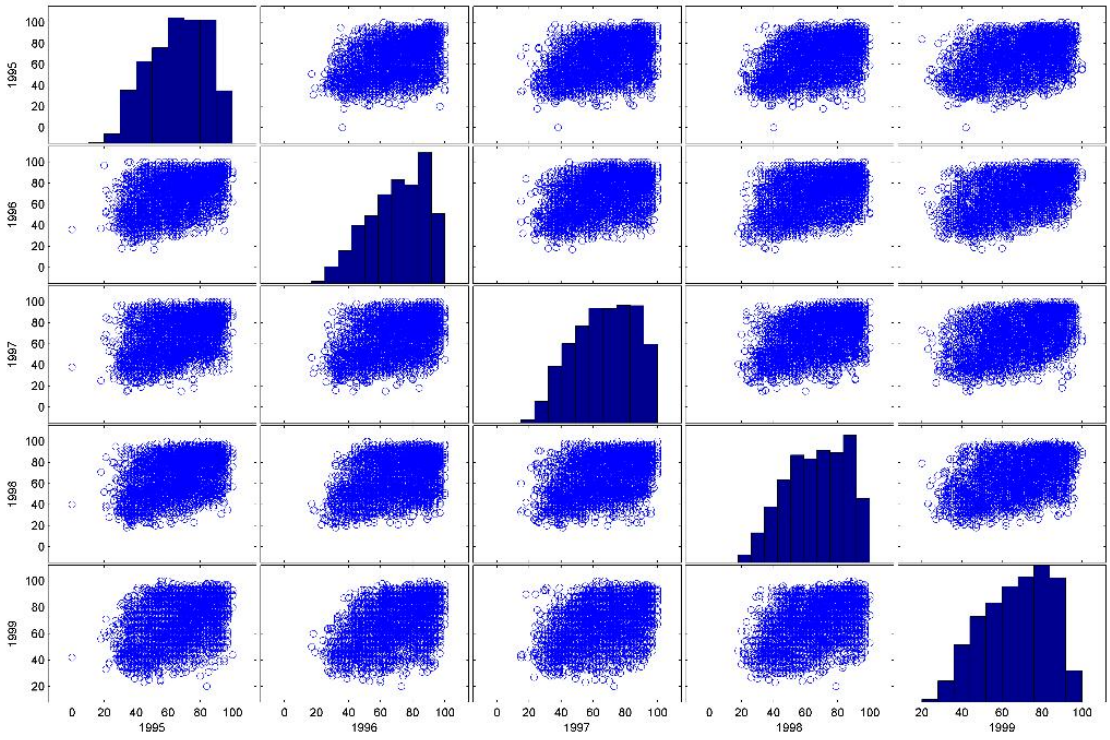
Σχήμα** 2.15: **Συσχέτιση των μετρήσεων σχετικής υγρασίας** 15-**ετίας μεταξύ των σταθμών



Σχήμα** 2.16: **Αξιολόγηση των μοντέλων παλινδρόμησης κατά τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων στις χρονοσειρές σχετικής υγρασίας της** 15-**ετίας

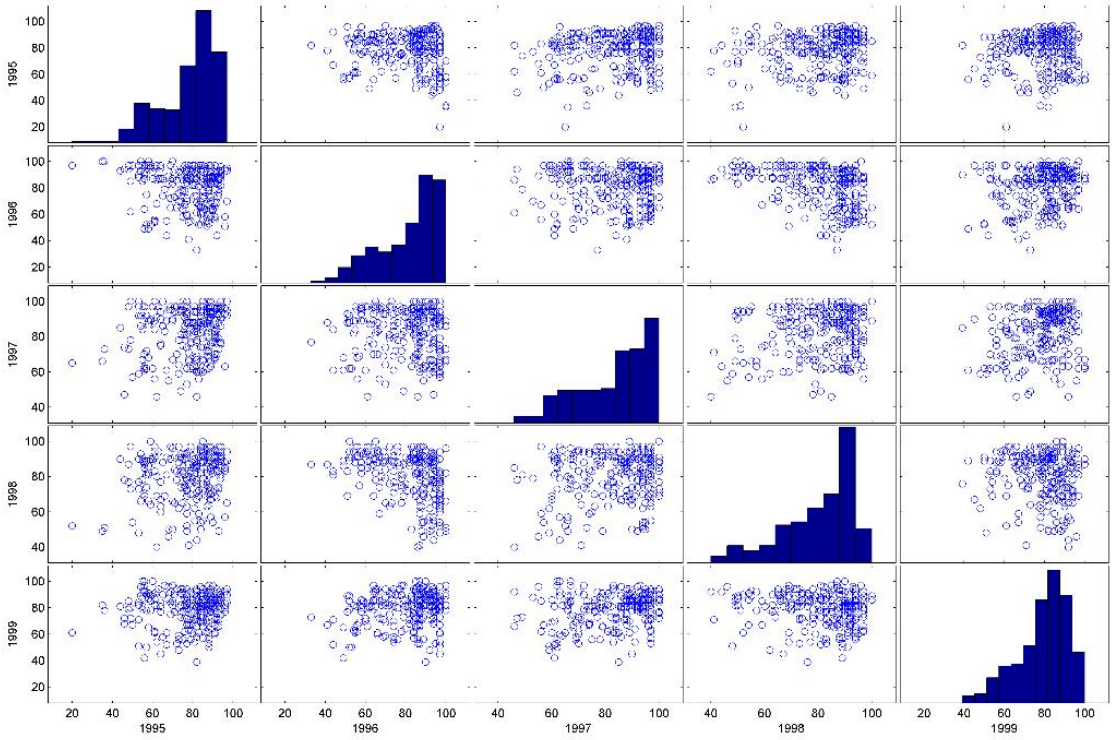
Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της εφαρμογής της βηματικής πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται ο συντελεστής προσδιορισμού των 28 προς συμπλήρωση σταθμών. Στους συγκεκριμένους σταθμούς εφαρμόστηκε η βηματική παλινδρόμηση για τη δημιουργία γραμμικών συναρτήσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το R^2 (Σχήμα 2.16) κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (0,3 έως 0,6), καθιστώντας τις συναρτήσεις ακατάλληλες. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση της σχετικής υγρασίας, με την εφαρμογή του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης αναμένεται να δημιουργηθούν τιμές για τη συμπλήρωση των ελλειπουσών μετρήσεων, με χαμηλή ακρίβεια.

Διερευνήθηκε, στη συνέχεια, η δυνατότητα συμπλήρωσης των ελλειπουσών μετρήσεων μέσω γραμμικών συναρτήσεων, οι οποίες προκύπτουν από την κατ' έτος συσχέτιση των χρονοσειρών του ίδιου σταθμού. Τα αποτελέσματα της συσχέτισης παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 2.17. Οι γραμμικές συναρτήσεις προσαρμογής που προκύπτουν έχουν επίσης χαμηλούς συντελεστές συσχέτισης, οπότε και η συγκεκριμένη μέθοδος απορρίφθηκε.

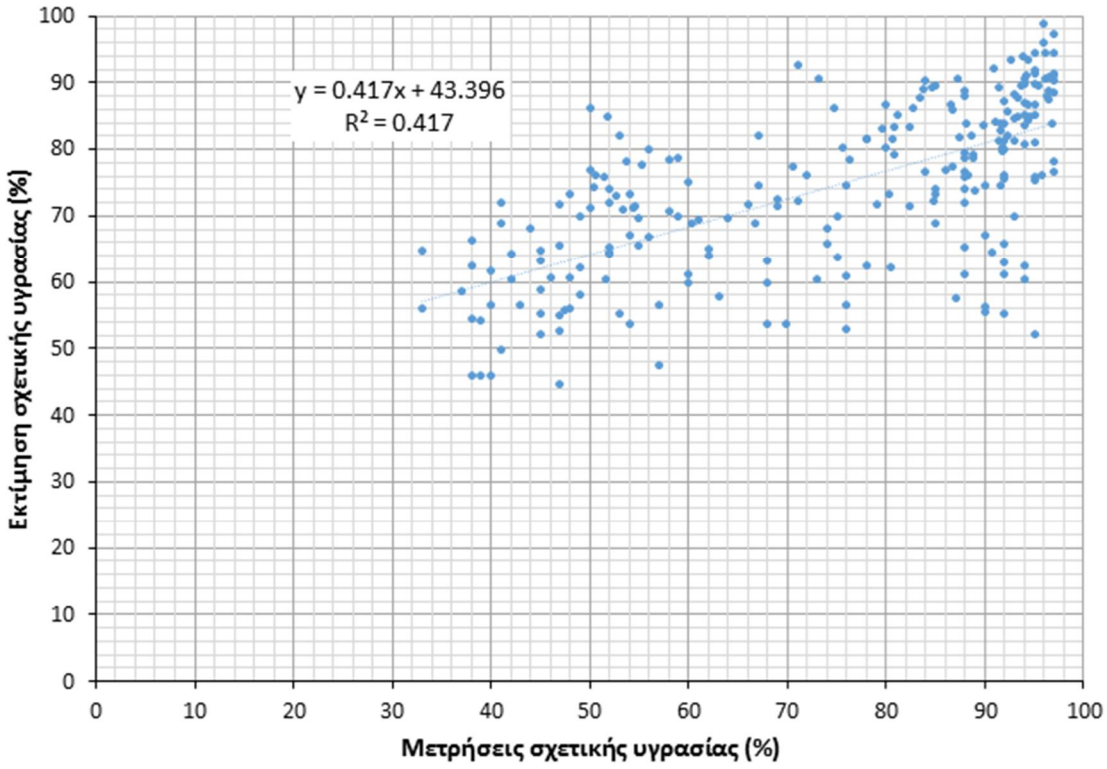


Σχήμα** 2.17: **Συσχέτιση μετρήσεων σχετικής υγρασίας** 15-**ετίας μεταξύ των ετών του σταθμού Μίκρας

Επίσης, ελέγχθηκε η δυνατότητα συσχέτισης των χρονοσειρών του ίδιου μήνα για τη 15-ετία (Σχήμα 2.18) με αποτελέσματα ακόμη χαμηλότερης ακρίβειας. Η αναζήτηση γραμμικού μοντέλου συσχέτισης μεμονωμένου μήνα με τους ίδιους μήνες άλλων ετών πραγματοποιήθηκε επίσης και με ανάλυση πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα στο Σχήμα 2.19 αφορούν τον έλεγχο της γραμμικής συνάρτησης που προέκυψε από την ανάλυση για τη συμπλήρωση των ελλειπουσών μετρήσεων του μήνα Μαρτίου 1985 του σταθμού της Άρτας, με ανεξάρτητες μεταβλητές τις τιμές του ίδιου μήνα των υπόλοιπων ετών. Η προκύπτουσα γραμμική συνάρτηση δεν μπορεί να αξιοποιηθεί, καθώς οι υπολογιζόμενες τιμές της σχετικής υγρασίας διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες μετρήσεις.



Σχήμα** 2.18: **Συσχέτιση των μετρήσεων σχετικής υγρασίας μεταξύ των χρονοσειρών του Ιανουαρίου για τη** 15**-ετία στο σταθμό της Μίκρας

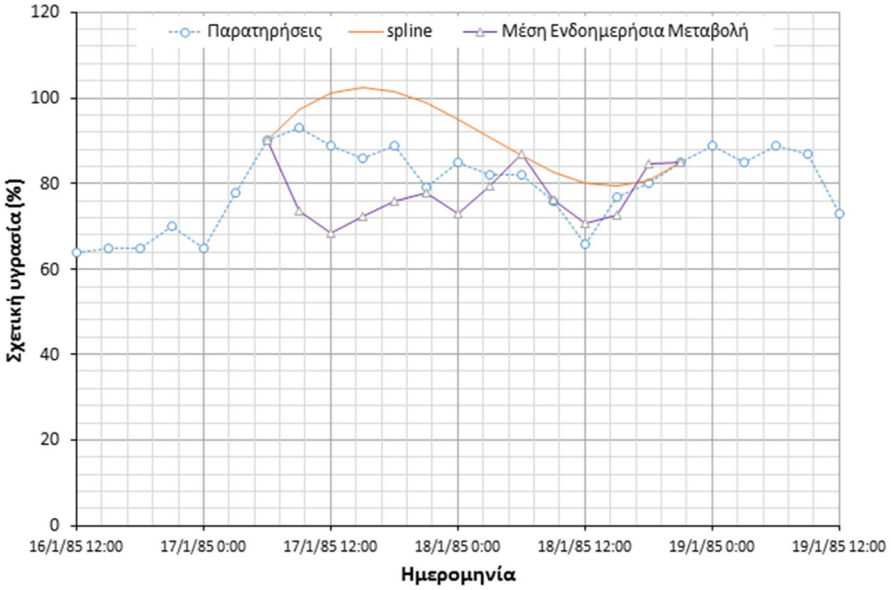


Σχήμα** 2.19: **Σύγκριση αποτελεσμάτων συνάρτησης γραμμικής παλινδρόμησης με μετρήσεις σχετικής υγρασίας για το μήνα Μάρτιο** 1985 **στο σταθμό της Άρτας

Μετά από τους παραπάνω ελέγχους κατέστη σαφές ότι καμία μέθοδος γραμμικής συσχέτισης δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τη συμπλήρωση των χρονοσειρών της σχετικής υγρασίας. Ως εκ τούτου, διερευνήθηκαν μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται σε βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη των ελλειπουσών μετρήσεων γύρω από το σημείο όπου εμφανίζεται το κενό. Οι μέθοδοι οι οποίοι ελέγχθηκαν είναι οι φυσικές splines και η μέση ενδοημερήσια μεταβολή. Για τον έλεγχο των μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοσειρές ενός χειμερινού (Ιανουάριος 1985) και ενός θερινού μήνα (Ιούλιος 1995) σε τυχαία έτη του σταθμού της Αγχιάλου. Στις χρονοσειρές αυτές αφαιρέθηκαν 12 ενδιάμεσες συνεχόμενες 3-ωριαίες μετρήσεις δημιουργώντας κενό διάρκειας 1,5 ημέρας. Η μέση ενδοημερήσια μεταβολή για κάθε ελλείπουσα μέτρηση υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση:

$$RH_{d,h} = RH_{0,h} + \frac{\left(RH_{n+1,h} - RH_{0,h}\right) \cdot d}{(n+1)} \qquad (.25)$$

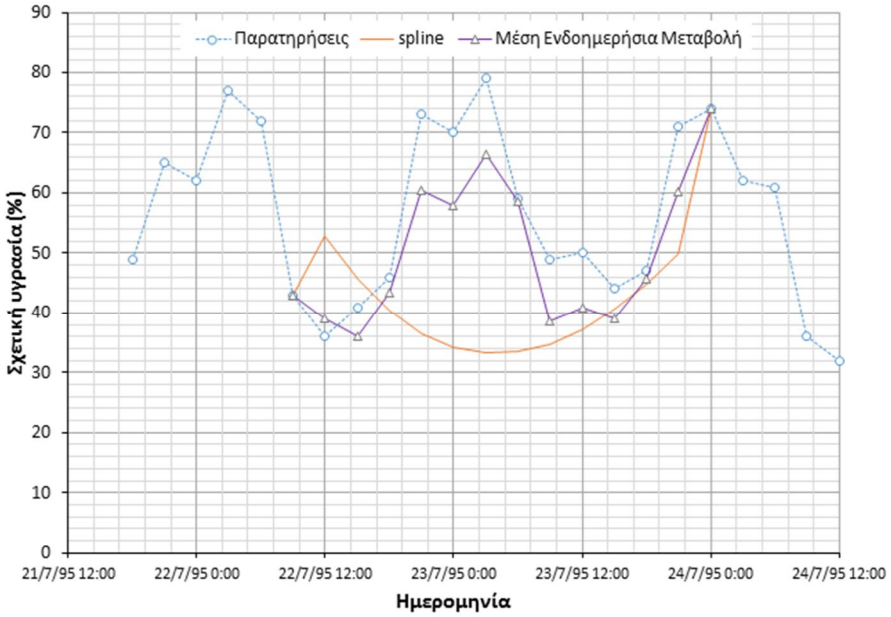
όπου: $RH_{d,h}$, η ελλείπουσα μέτρηση στην ώρα *h* της ημέρας *d*,
$RH_{0,h}$, η μέτρηση στην ώρα *h* της τελευταίας ημέρας πριν το κενό που υπάρχουν μετρήσεις,
$RH_{n+1,h}$, η μέτρηση στην ώρα *h* της πρώτης ημέρας μετά το κενό που υπάρχουν μετρήσεις,
d, ο αριθμός της ημέρας με ελλείπουσα τιμή την ώρα *h*, ($d = 1, 2, 3, \dots, n$).
n, ο συνολικός αριθμός ημερών με ελλείπουσες μετρήσεις.



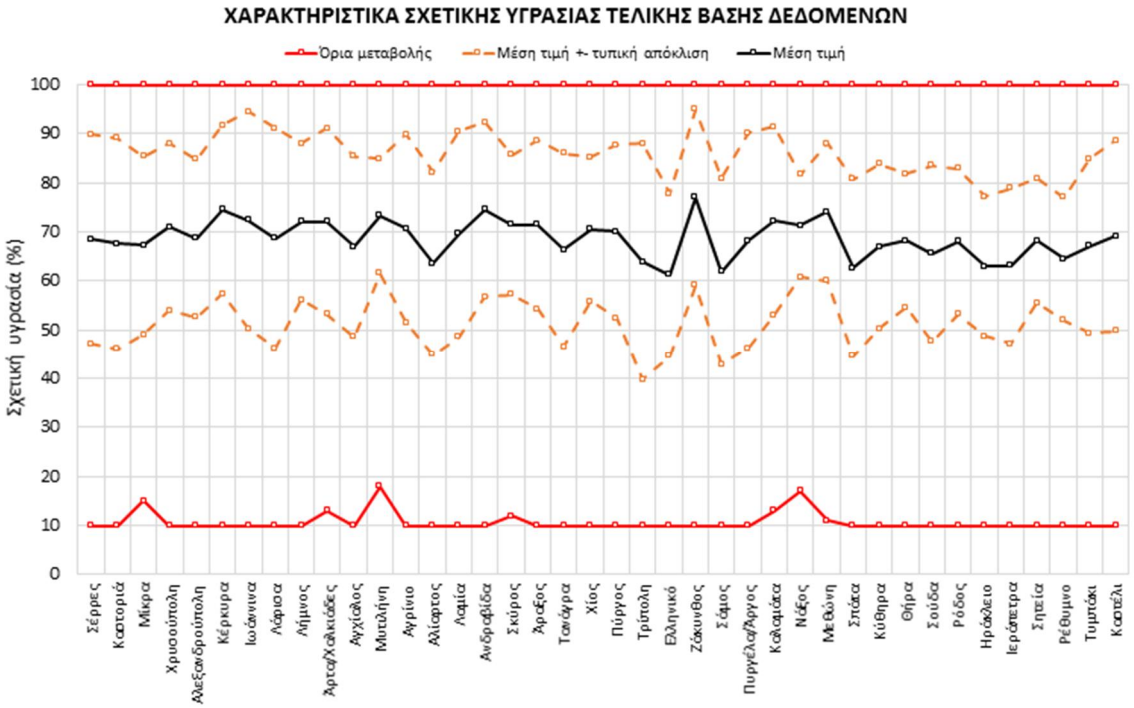
Σχήμα** 2.20: **Έλεγχος των μεθόδων συμπλήρωσης ελλειπουσών μετρήσεων σχετικής υγρασίας το μήνα Ιανουάριο στο σταθμό Αγχιάλου

Οι μέθοδοι ελέγχθηκαν γραφικά σύμφωνα στα Σχήματα 2.20 και 2.21. Και στις δύο περιπτώσεις, η μέθοδος φυσικών κυβικών τμηματικά πολυωνυμικών καμπυλών δεν μπορεί να περιγράψει με ικανοποιητική ακρίβεια τη μεταβολή της σχετικής υγρασίας για το διάστημα εμφάνισης του κενού. Αυτό φαίνεται εντονότερα στην περίπτωση του Ιουλίου όπου, ενώ, σύμφωνα με τις μετρήσεις, η σχετική υγρασία εμφανίζει άνοδο κατά τη διάρκεια της νύκτας, το μοντέλο, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή πριν και μετά το κενό, προβλέπει μείωση. Το μοντέλο της ενδοημερήσιας μεταβολής παράγει πολύ καλύτερα αποτελέσματα, με μέγιστες τοπικές διαφορές μεταξύ μετρήσεων και προβλέψεων του μοντέλου, της τάξης του 10%. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι η αξιοποίηση της βάσης δεδομένων αλλά και του ΤΜΕ που θα προκύψει, αφορά ενεργειακές εφαρμογές, στις

οποίες οι διαφορές μετρήσεων και προβλέψεων της ενδοημερήσιας διακύμανσης, που παρουσιάζουν τα διαγράμματα, είναι ελάσσονος σημασίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της σύγκρισης, για τη συμπλήρωση των χρονοσειρών, επιλέχθηκε το μοντέλο της μέσης ενδοημερήσιας μεταβολής.



Σχήμα** 2.21: **Έλεγχος των μεθόδων συμπλήρωσης ελλειπουσών μετρήσεων σχετικής υγρασίας το μήνα Ιούλιο στο σταθμό Αγχιάλου



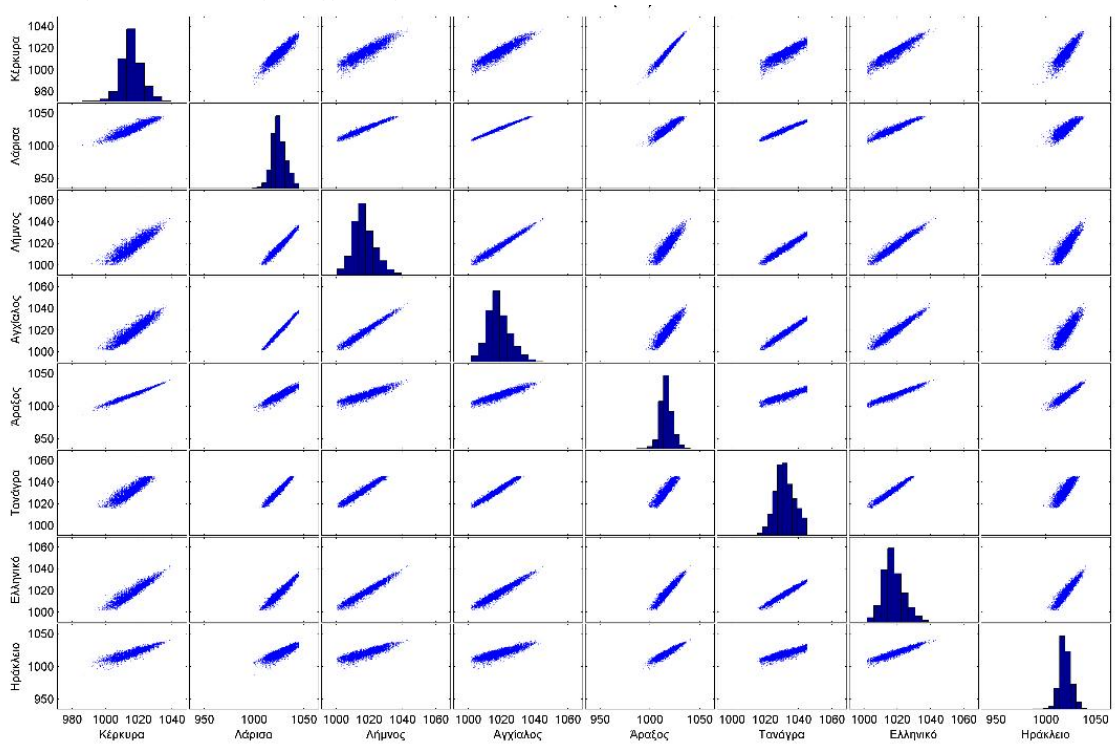
Σχήμα** 2.22: **Μέση τιμή και μεταβλητότητα των 3-ωριαίων μετρήσεων σχετικής υγρασίας 15-ετίας της συμπληρωμένης βάσης δεδομένων των σταθμών

Η μέθοδος της ενδοημερήσιας μεταβολής απαιτεί μετρήσεις πλησίον της περιόδου, όπου εμφανίζεται το κενό. Σε περίπτωση που οι συνεχόμενες ελλείπουσες μετρήσεις είναι μεγάλης χρονικής διάρκειας, είναι προφανές ότι η μέθοδος καθίσταται ακατάλληλη. Για το λόγο αυτό εξαιρέθηκαν από τη διαδικασία συμπλήρωσης οι σταθμοί Αργοστολίου, Βέλου, Κόνιτσας και Νέας Φιλαδέλφειας, οι οποίοι μετά και από τη διαδικασία συμπλήρωσης τριών διαδοχικών κενών, παρέμειναν σε χαμηλή πληρότητα λόγω των πολλών συνεχόμενων κενών τους. Οι συγκεκριμένοι σταθμοί εξαιρέθηκαν εξ ολοκλήρου από τη βάση ως μη αξιοποιήσιμοι. Συνολικά, με τη μέθοδο της ενδοημερήσιας μεταβολής, συμπληρώθηκαν 24 σταθμοί.

Στις συμπληρωμένες χρονοσειρές πραγματοποιήθηκε έλεγχος ως προς τα επιτρεπόμενα όρια μεταβολής καθώς και τη μέγιστη επιτρεπόμενη 3-ωριαία μεταβολή. Οι τιμές οι οποίες βρέθηκαν εκτός ορίων, αντικαταστάθηκαν από τιμές οι οποίες προέκυψαν κατόπιν γραμμικής παρεμβολής. Στο Σχήμα 2.22 παρουσιάζεται η μέση τιμή, το εύρος μεταβολής και η μεταβολή του 68,27% των 3-ωριαίων τιμών σχετικής υγρασίας της πλήρους χρονοσειράς των 40 σταθμών για τους οποίους επιτεύχθηκε πληρότητα 100%.

Συμπλήρωση χρονοσειρών ατμοσφαιρικής πίεσης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23, η ατμοσφαιρική πίεση αποτελεί το μετεωρολογικό μέγεθος με τον ισχυρότερο δεσμό μεταξύ των μετρήσεων γειτονικών σταθμών, καθώς η έκταση των βαρομετρικών συστημάτων είναι κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερη από την έκταση της Ελλάδας. Ακόμη και απομακρυσμένοι σταθμοί, όπως ο σταθμός της Κέρκυρας, με το σταθμό Ηρακλείου Κρήτης, παρουσιάζουν πολύ καλή συσχέτιση.



Σχήμα** 2.23: **Συσχέτιση των μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης** 15-**ετίας μεταξύ των σταθμών

Κατά συνέπεια, η επιλεγείσα μέθοδος για τη συμπλήρωση των μακροχρόνιων ελλειπουσών μετρήσεων, είναι η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των γειτονικών σταθμών. Αρχικά διερευνήθηκε ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστεί η μέθοδος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα

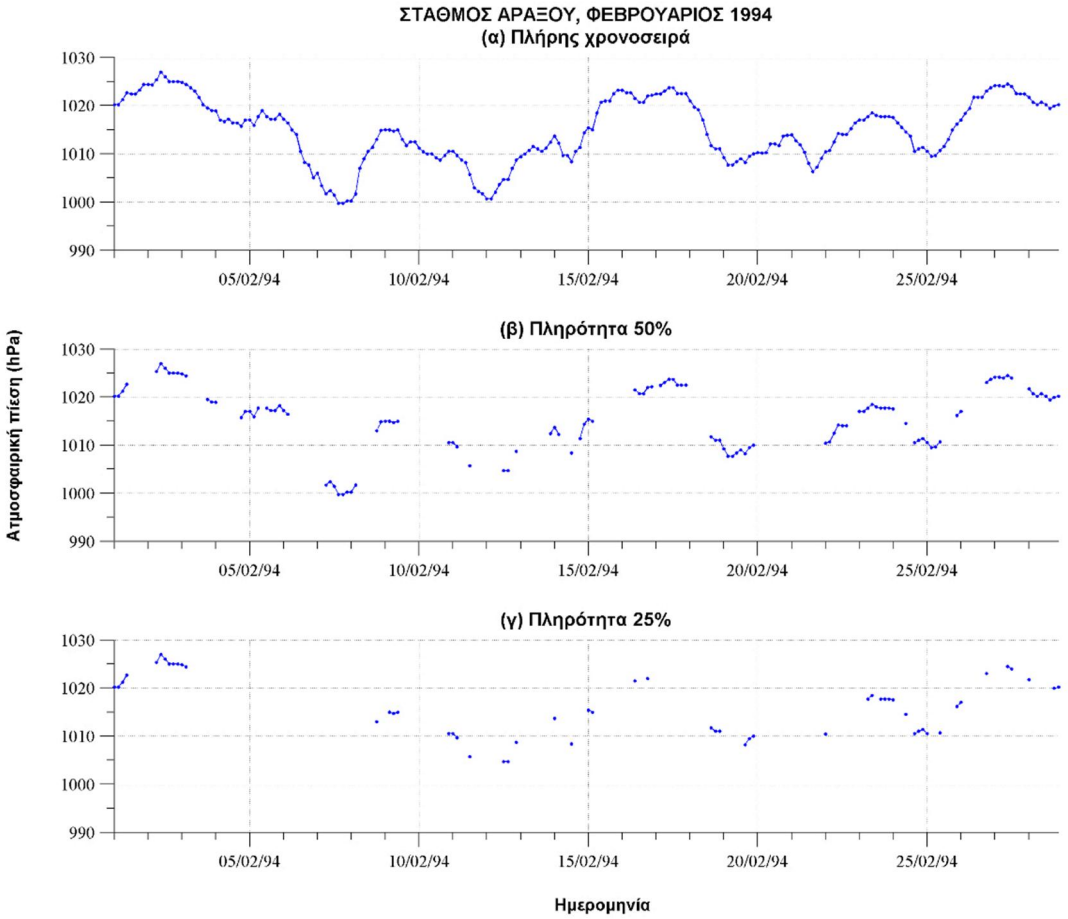
του μοντέλου της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, όταν εφαρμοστεί στο σύνολο της χρονοσειράς και όταν εφαρμοστεί σε υποσύνολα της χρονοσειράς όπου κάθε υποσύνολο αποτελείται από τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης την ίδια ώρα και μήνα.

Στην πρώτη περίπτωση, ως εξαρτημένη μεταβλητή του μοντέλου της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά των 3-ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης του σταθμού Σερρών της 15-ετίας, η οποία αποτελείται από 43000 μετρήσεις. Ως ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες χρονοσειρές των σταθμών Αλεξανδρούπολης, Καβάλας και Μίκρας. Από την ανάλυση προέκυψε η ευθεία παλινδρόμησης:

$$P_{[\Sigma]} = -2{,}157 + 0{,}583P_{[A]} + 0{,}264P_{[K]} + 0{,}155P_{[M]} \qquad (2.6)$$

όπου: $P_{[\Sigma]}$, $P_{[A]}$, $P_{[K]}$, $P_{[M]}$, οι τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης σε hPa των σταθμών Σερρών, Αλεξανδρούπολης, Καβάλας και Μίκρας, αντίστοιχα.

Η παραπάνω συνάρτηση ερμηνεύει το 97,8% της διακύμανσης των τιμών ατμοσφαιρικής πίεσης του σταθμού των Σερρών ($R^2 = 0{,}978$) και μόλις το 2,2% της μεταβλητότητας των τιμών τής ατμοσφαιρικής πίεσης στο σταθμό των Σερρών οφείλεται σε τυχαία σφάλματα. Η ακρίβεια του μοντέλου επιβεβαιώνεται επίσης από την τιμή του RMSE = 0,736 hPa, καθιστώντας το μοντέλο ιδιαίτερα αξιόπιστο στη συμπλήρωση ακόμη και μεγάλων διαδοχικών διαστημάτων χωρίς μετρήσεις, υπό την προϋπόθεση, φυσικά, ότι στο ίδιο διάστημα οι σταθμοί Αλεξανδρούπολης, Καβάλας και Μίκρας διαθέτουν τιμές.



Σχήμα** 2.24: **Δημιουργία τεχνητών κενών στη χρονοσειρά** 3-**ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης του μήνα Φεβρουαρίου** 1994 **του σταθμού του Αράξου

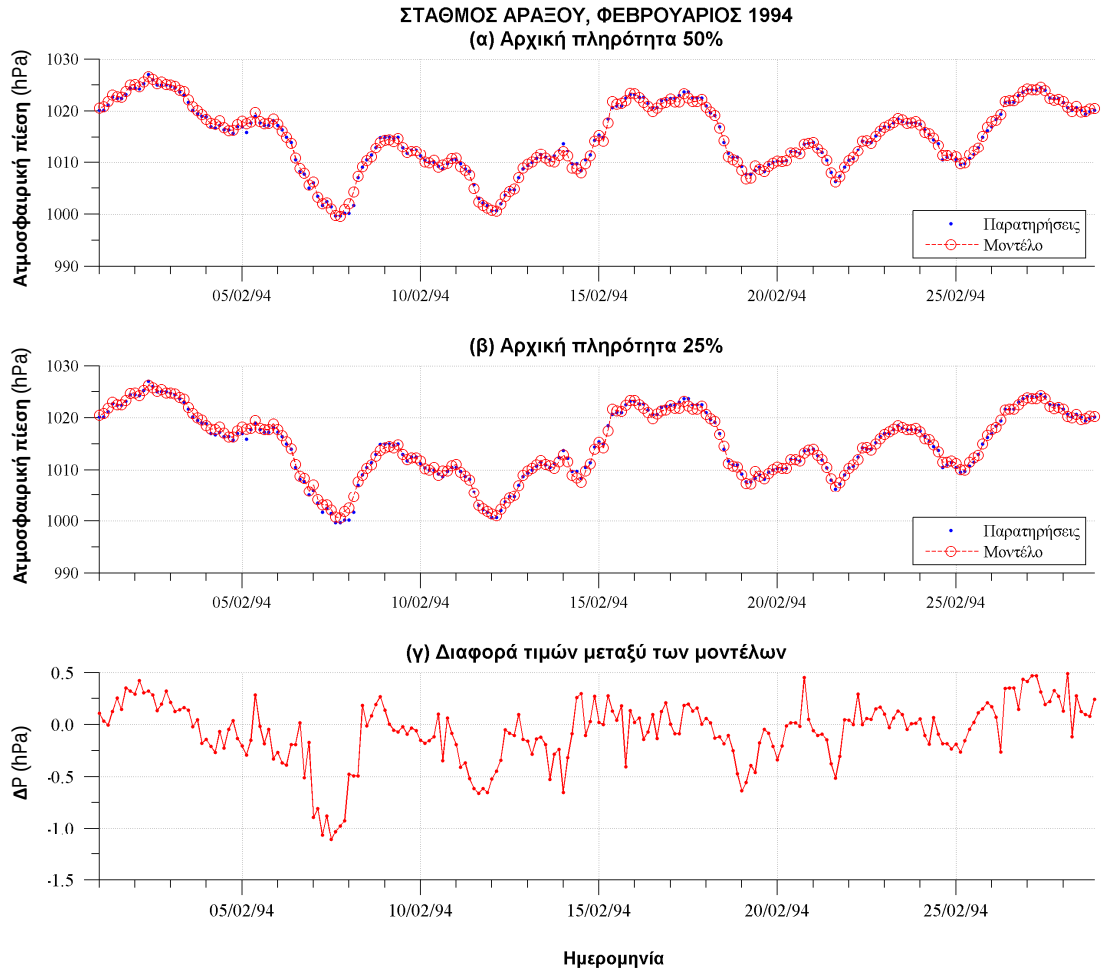
Η ικανότητα του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων από γειτονικούς σταθμούς, επιβεβαιώθηκε ακόμη και σε περιπτώσεις μικρότερου δείγματος μετρήσεων, με χαμηλές τιμές πληρότητας (έως και 25%). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε χρονοσειρά των 3-ωριαίων μετρήσεων ενός μήνα του σταθμού του Αράξου (Σχήμα 2.24α) στον οποίο δημιουργήθηκαν τεχνητά κενά μειώνοντας την πληρότητα της χρονοσειράς στο 50% (Σχήμα 2.24β) και στο 25% (Σχήμα 2.24γ). Ως ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοσειρές των σταθμών της Ανδραβίδας και της Ζακύνθου για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Από την ανάλυση πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψαν οι συναρτήσεις:

$$P_{[A\rho]} = -20{,}491 + 0{,}789P_{[Av]} - 0{,}229P_{[Z]} \quad \text{(πληρότητα 50\%)} \quad (2.7)$$

$$P_{[A\rho]} = -2{,}702 + 1{,}046P_{[Av]} - 0{,}044P_{[Z]} \quad \text{(πληρότητα 25\%)} \quad (2.8)$$

όπου: $P_{[A\rho]}$, $P_{[Av]}$, $P_{[Z]}$, οι τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης σε hPa των σταθμών Αράξου, Ανδραβίδας και Ζακύνθου, αντίστοιχα.



Σχήμα** 2.25: **Χρονοσειρές διαφορετικής πληρότητας** 3-ωριαίων **μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης το μήνα Φεβρουάριο** 1994 **του σταθμού Αράξου

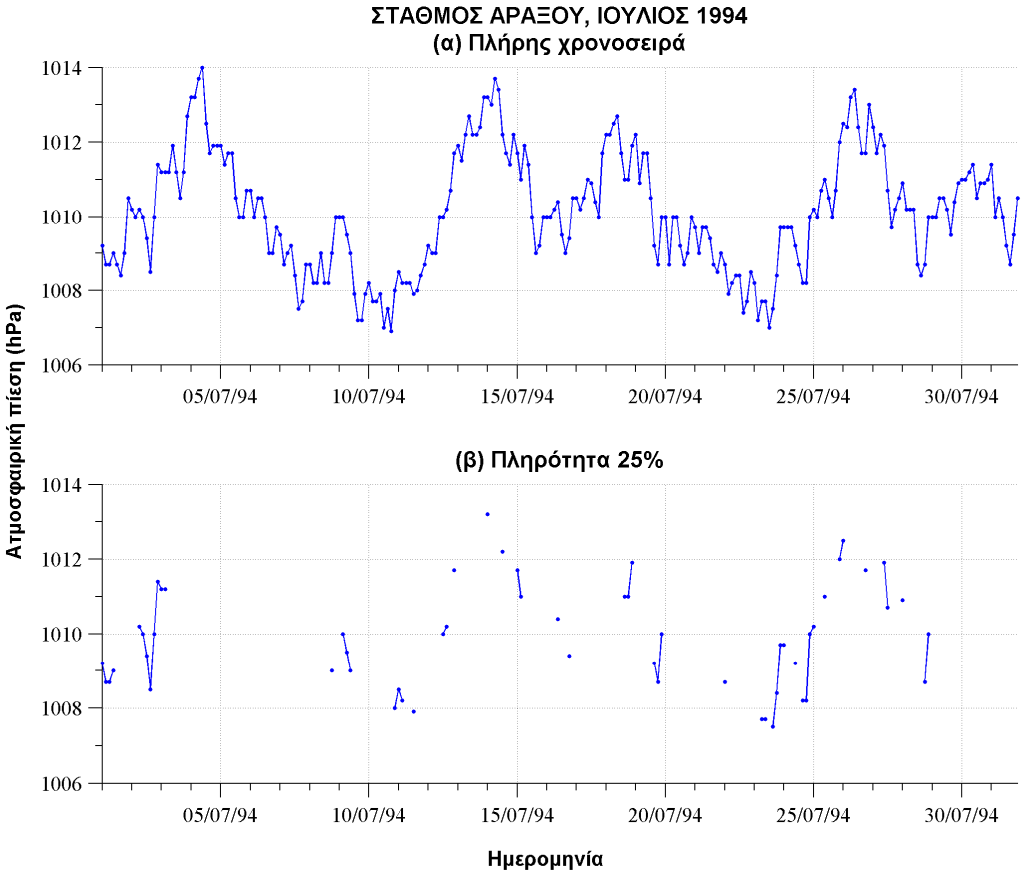
Η ακρίβεια των δύο μοντέλων ήταν εξαιρετικά υψηλή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25. Από τα Σχήματα 2.25α και 2.25β φαίνεται σχεδόν ταύτιση μεταξύ των τιμών των δύο μοντέλων αλλά και των τιμών των μοντέλων με τις μετρήσεις ατμοσφαιρικής πίεσης του σταθμού. Οι διαφορές μεταξύ των πραγματικών τιμών και εκτιμήσεων (Σχήμα 2.25γ) είναι μικρότερες του 1 hPa δηλαδή 1‰ που αποτελεί αμελητέα ποσότητα.

Όσον αφορά στους στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης (Πίνακας 2.VIII) είναι εμφανής η ακρίβεια των δύο μοντέλων καθώς παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή προσδιορισμού (R^2) και ιδιαίτερα χαμηλές τιμές στατιστικών δεικτών MBE και RMSE.

Πίνακας** 2.VIII: **Δείκτες αξιολόγησης του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συμπλήρωση ελλειπουσών** 3-**ωριαίων μετρήσεων το μήνα Φεβρουάριο** 1994 **στο σταθμό του Αράξου

	R^2	MBE (hPa)	RMSE (hPa)	IA
Πληρότητα 50%	0,994	0,012	0,523	0,998
Πληρότητα 25%	0,993	0,083	0,549	0,997

Καθώς οι χειμερινοί μήνες παρουσιάζουν κατά κανόνα υψηλή συσχέτιση ατμοσφαιρικής πίεσης μεταξύ γειτονικών σταθμών, πραγματοποιήθηκε αντίστοιχος έλεγχος και για το μήνα Ιούλιο του ίδιου σταθμού. Αφαιρέθηκαν από την πλήρη χρονοσειρά των μετρήσεων (248 τιμές, Σχήμα 2.26α), τυχαίες μετρήσεις έως ότου η πληρότητα του μήνα να φτάσει στο 25% (Σχήμα 2.26β).



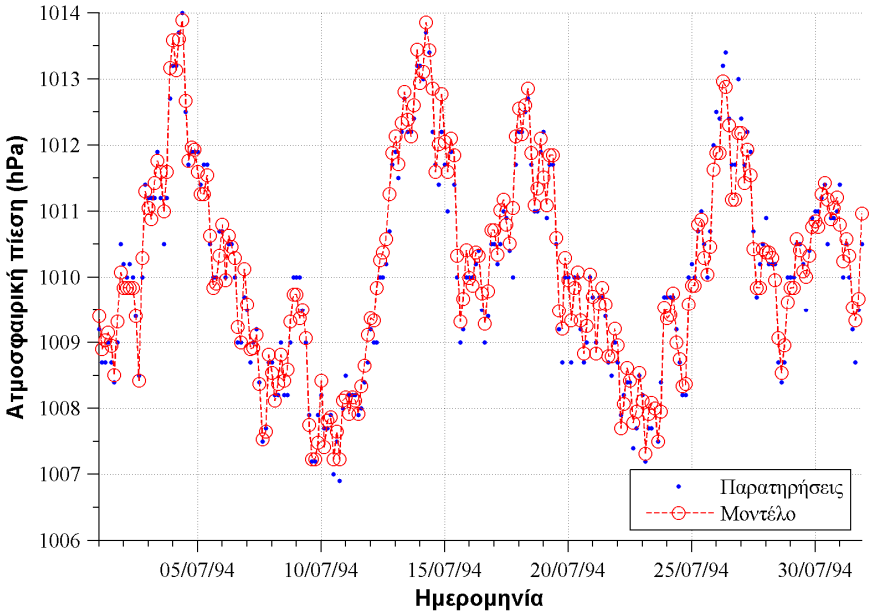
Σχήμα** 2.26: **Χρονοσειρές διαφορετικής πληρότητας** 3-**ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης το μήνα Ιούλιο** 1994 **του σταθμού Αράξου

Από την ανάλυση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε η συνάρτηση:

$$P_{[A\rho]} = -4{,}346 + 0{,}838P_{[Av]} - 0{,}165P_{[Z]} \quad (2.9)$$

όπου: $P_{[Aρ]}$, $P_{[Av]}$, $P_{[Z]}$, οι τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης σε hPa των σταθμών Αράξου, Ανδραβίδας και Ζακύνθου, αντίστοιχα.

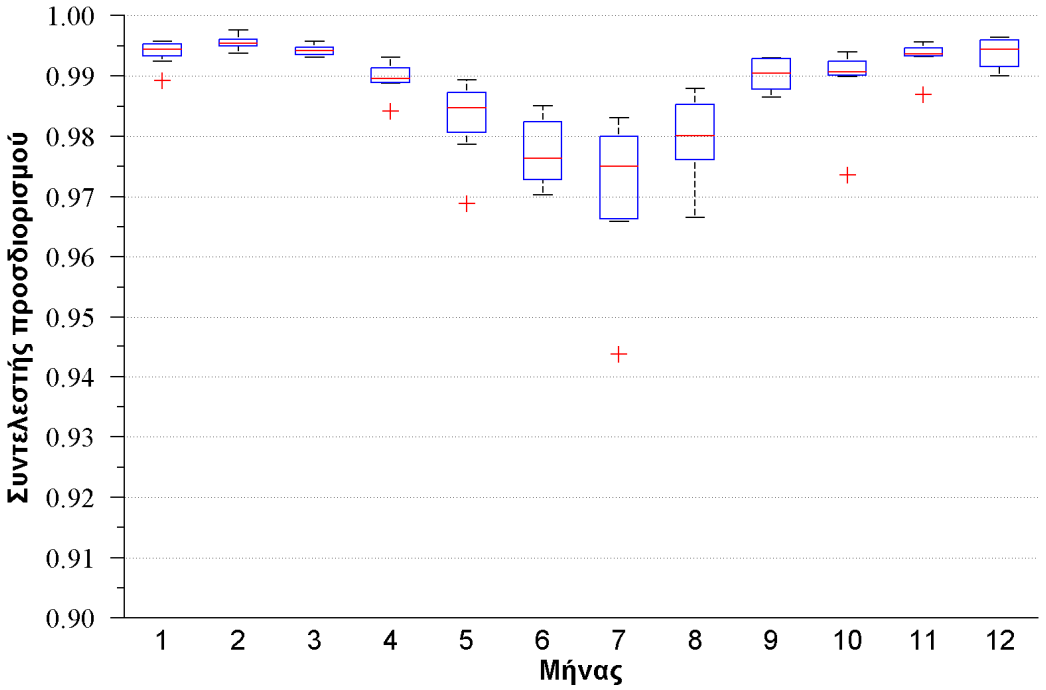
Στο Σχήμα 2.27 φαίνεται ότι και στην περίπτωση του Ιουλίου τα αποτελέσματα είναι εξίσου ικανοποιητικά, αλλά με εμφανή μείωση της ακρίβειας του μοντέλου. Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού μειώθηκε σε 0,95 από 0,99 που ήταν η αντίστοιχη τιμή του μήνα Φεβρουαρίου· παραμένει όμως σε υψηλά επίπεδα.



Σχήμα** 2.27: **Αξιολόγηση μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με αρχική πληρότητα χρονοσειράς** 25% **για το μήνα Ιούλιο** 1994 **στο σταθμό του Αράξου

Οι προηγούμενες δοκιμές αφορούσαν την εφαρμογή της μεθόδου με μεταβλητές όλη τη χρονοσειρά· ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ακρίβειας του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και σε υποσύνολα της χρονοσειράς, όπου κάθε υποσύνολο αποτελείται από τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης ίδια ώρα και μήνα. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν για κάθε σταθμό 96 υποσύνολα, ένα για κάθε ώρα της ημέρας και μήνα ({μετρήσεις ανά ημέρα} x {μήνες ανά έτος}). Κάθε ένα από τα υποσύνολα περιέχει περίπου 450 τιμές, ανάλογα με τον αριθμό ημερών του μήνα ({αρ. ημερών μήνα} x {συνολικά έτη}). Κατά την εφαρμογή τής πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης δημιουργούνται συνολικά 96 συναρτήσεις παλινδρόμησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη συμπλήρωση των ελλειπουσών τιμών. Κάθε γραμμική συνάρτηση συμπληρώνει τιμές στη συγκεκριμένη ώρα της ημέρας από τις αντίστοιχες ώρες του μήνα των υπόλοιπων σταθμών. Συγκρίνοντας την αριθμητική τιμή του συντελεστή προσδιορισμού, που προκύπτει από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου (Σχήμα 2.28) με την αντίστοιχη τιμή της εφαρμογής στην πλήρη χρονοσειρά (R^2=0,973), παρατηρούμε ότι, πλην μεμονωμένων περιπτώσεων, η αριθμητική τιμή του συντελεστή, που προκύπτει από την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης σε υποσύνολα της χρονοσειράς, παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης, από τη διασπορά των τιμών του R^2 προκύπτει ότι η συσχέτιση των τιμών της ατμοσφαιρικής πίεσης

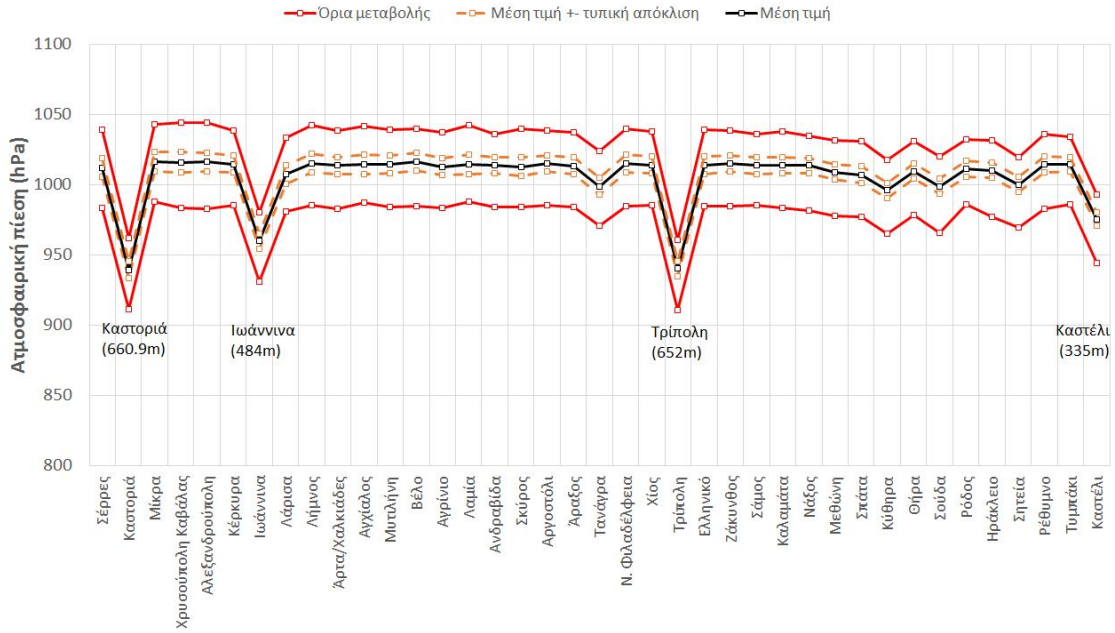
μεταξύ των σταθμών είναι ιδιαίτερα ισχυρή κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ παρουσιάζει εξασθένιση κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους (Μάιος-Σεπτέμβριος).



Σχήμα 2.28: Θηκόγραμμα κατανομής τιμών συντελεστή προσδιορισμού R^2 των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης για τη συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών ατμοσφαιρικής πίεσης στη χρονοσειρά του σταθμού Σερρών

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέθοδος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλη ακρίβεια για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης, είτε στην πλήρη χρονοσειρά, είτε σε υποσύνολά της, τα οποία αποτελούνται από τις μετρήσεις κατά μήνα, είτε σε υποσύνολα τα οποία αποτελούνται από μετρήσεις στην ίδια ώρα της ημέρας του εκάστοτε μήνα. Επιλέχθηκε η τελευταία μέθοδος καθώς αφενός μεν παρείχε καλύτερα αποτελέσματα αφετέρου δε λαμβάνει υπόψη της τα βαρομετρικά συστήματα της ατμόσφαιρας κάθε ώρα. Η τελική βάση 3-ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης, μετά την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, συμπληρώθηκε πλήρως για τους 39 σταθμούς που καταγράφουν αυτή την παράμετρο.

Στις συμπληρωμένες χρονοσειρές πραγματοποιήθηκε έλεγχος ως προς τα επιτρεπόμενα όρια μεταβολής καθώς και τη μέγιστη επιτρεπόμενη 3-ωριαία μεταβολή. Οι τιμές, οι οποίες βρέθηκαν εκτός ορίων, αντικαταστάθηκαν από τιμές που προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή. Στο Σχήμα 2.29 παρουσιάζεται η μέση τιμή, το εύρος μεταβολής καθώς και η μεταβολή τού 68,27% (± 1 τυπική απόκλιση) των 3-ωριαίων τιμών ατμοσφαιρικής πίεσης της πλήρους χρονοσειράς των σταθμών. Οι τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης έχουν ήδη αναχθεί στο υψόμετρο του σταθμού, γεγονός που διαφοροποιεί σημαντικά τα χαρακτηριστικά της ατμοσφαιρικής πίεσης σε σταθμούς που βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο.

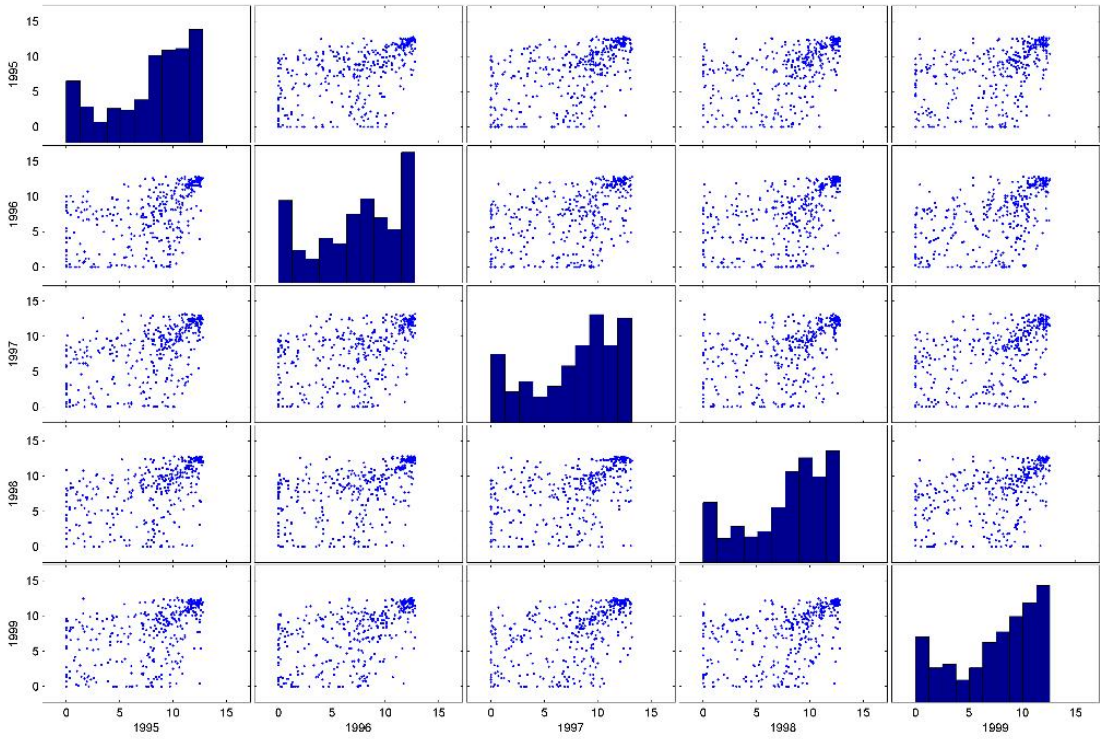


Σχήμα** 2.29: **Μέση τιμή και μεταβλητότητα των** 3-**ωριαίων μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης** 15-**ετίας της συμπληρωμένης βάσης δεδομένων των σταθμών. Στο σχήμα εντοπίζονται σταθμοί με το μεγαλύτερο υ-ψόμετρο, το οποίο αναφέρεται στην παρένθεση

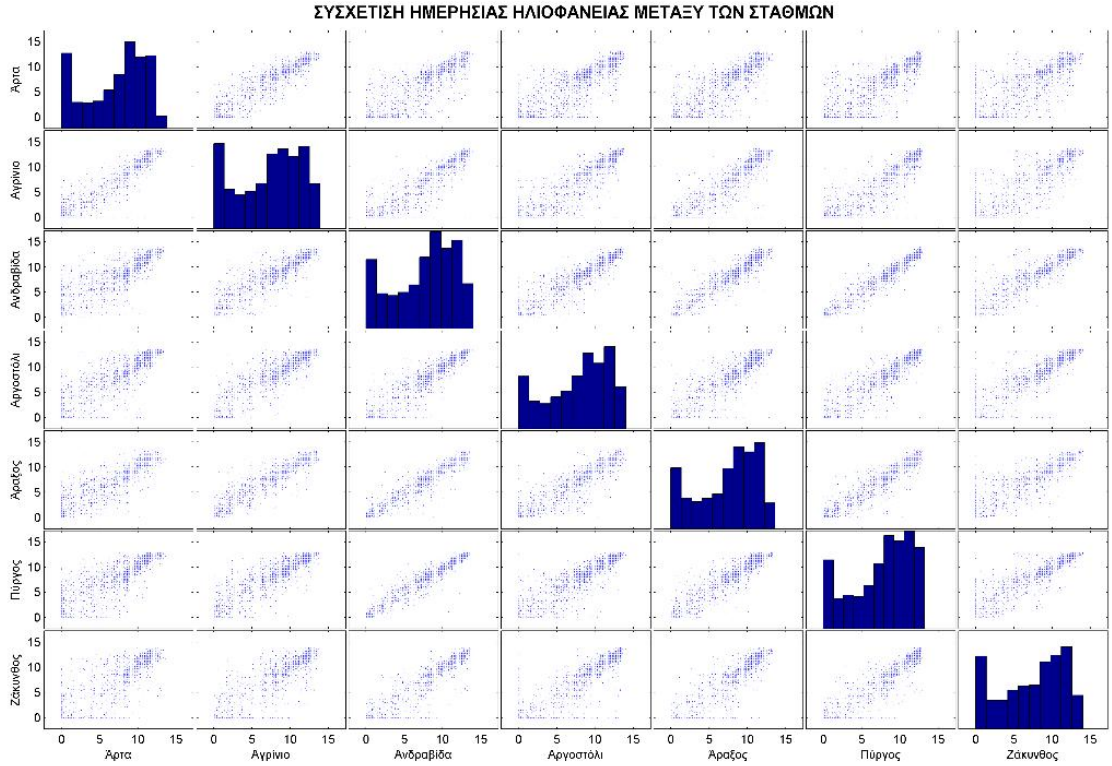
2.5.4 Συμπλήρωση χρονοσειρών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας

Η ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας αποτελεί την παράμετρο με τη σημαντικότερη επίδραση στα μοντέλα υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία τη χρησιμοποιούν. Η έλλειψη έστω και μίας μέτρησης ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας καθιστά το μήνα, στον οποίο περιέχεται, ως μη αξιοποιήσιμο, καθώς ο μήνας δεν μπορεί να συμμετέχει στη διαδικασία επιλογής του Τυπικού Μετεωρολογικού Μήνα. Από τους 44 σταθμούς της διατριβής που καταγράφουν ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας, αφαιρέθηκε από τη διαδικασία συμπλήρωσης ο σταθμός της Καβάλας καθώς παρουσιάζει πληρότητα μόλις 17%. Ακόμη και στην περίπτωση μοντέλου με υψηλή ακρίβεια προσομοίωσης της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας, τα αποτελέσματα της συμπλήρωσης των κενών του συγκεκριμένου σταθμού ενδεχομένως να τίθεντο υπό ισχυρή αμφισβήτηση λόγω της χαμηλής πληρότητας. Οι σταθμοί Αργοστολίου, Βέλου, Κόνιτσας και Νέας Φιλαδέλφειας κρίθηκαν, από τη διαδικασία συμπλήρωσης των 3-ωριαίων μετρήσεων, ως μη αξιοποιήσιμοι και ως εκ τούτου δεν εξετάζεται η συμπλήρωση των χρονοσειρών τους.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι για το διάστημα 1/6/1993 έως και 31/12/1993 δεν υπάρχει καταγραφή ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας, το εν λόγω διάστημα θα μπορούσε να συμπληρωθεί μόνο με αυτοσυσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων διάρκειας ηλιοφάνειας του ίδιου σταθμού. Για το λόγο αυτό διερευνήθηκε αρχικά η συσχέτιση της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μεταξύ των ετήσιων χρονοσειρών του ίδιου σταθμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν μπορεί να προκύψει συνάρτηση η οποία να αποδίδει με ικανοποιητική ακρίβεια μετρήσεις ενός έτους με ανεξάρτητες μεταβλητές τις μετρήσεις άλλων ετών του ίδιου σταθμού. Από το Σχήμα 2.30 μπορούν να διακριθούν έτη, π.χ. σχήμα συσχέτισης των ετών 1987 και 1988, όπου για τιμές ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μεγαλύτερης των 6 h εμφανίζουν υψηλότερη συσχέτιση, η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων διάρκειας ηλιοφάνειας. Όμως, η παραπάνω διαπίστωση δεν αποτελεί γενικευμένο κανόνα οπότε και απορρίφθηκε. Ως εκ τούτου, η μέγιστη πληρότητα που μπορεί να επιτευχθεί είναι 96% λόγω του γενικευμένου κενού ενός εξάμηνου το 1993 που παρουσιάζουν οι χρονοσειρές διάρκειας ηλιοφάνειας σε όλους τους σταθμούς.



Σχήμα** 2.30: **Συσχέτιση των μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας** 15-**ετίας μεταξύ των ετών του σταθμού του Πύργου



Σχήμα** 2.31: **Συσχέτιση των μετρήσεων** 15-**ετίας ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μεταξύ των σταθμών

Σε δείγμα γειτονικών σταθμών της Κεντρικής Ελλάδας, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της συσχέτισης των χρονοσειρών της 15-ετίας μεταξύ των μετρήσεων των σταθμών (Σχήμα 2.31), προκειμένου να αξιολογηθεί η δυνατότητα συμπλήρωσης των ελλειπουσών μετρήσεων εφαρμόζοντας τη μέθοδο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Σε σύγκριση με το Σχήμα 2.30, προκύπτει φανερά καλύτερη συσχέτιση μεταξύ γειτονικών σταθμών, η οποία όμως διαφοροποιείται, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις (όπως για παράδειγμα στο σταθμό της Άρτας) εμφανίζεται χαμηλή συσχέτιση.

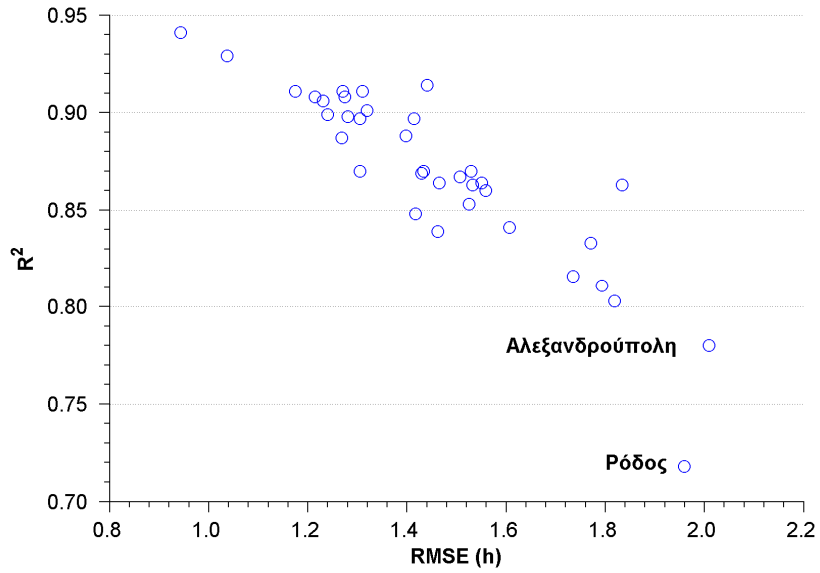
Μετά από τους παραπάνω ελέγχους, επιλέχθηκε, για τη συμπλήρωση των ελλειπουσών μετρήσεων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας η μέθοδος της βηματικής πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, προκειμένου να επιλέγονται σταθμοί που αποτελούν στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές. Για την εισαγωγή ενός σταθμού στο μοντέλο ελέγχεται η πιθανότητα που συνοδεύει την τιμή του λόγου F με προκαθορισμένο επίπεδο στατιστικής βεβαιότητας ίσο με 0,05 και για την αφαίρεση ενός σταθμού από το μοντέλο ίσο με 0,10. Η επιλογή μεγάλου αριθμού στατιστικά σημαντικών σταθμών δημιούργησε πρόβλημα στη συμπλήρωση κενών, αφού μπορούσαν να συμπληρωθούν μόνο οι ελλείπουσες τιμές ημερών όπου κανένας από τους σταθμούς που συμμετέχουν στο μοντέλο δεν εμφανίζει κενό. Για το λόγο αυτό, μετά την αρχική επιλογή των ανεξάρτητων μεταβλητών, αφαιρούνται με φθίνουσα σειρά ως προς τη σειρά εισαγωγής τους στο μοντέλο, σταθμοί, έως ότου παραμείνουν στο μοντέλο κατά μέγιστο 5 ανεξάρτητες μεταβλητές. Ο αριθμός αυτός προέκυψε μετά από έλεγχο ότι είναι και ο κρίσιμος αριθμός μεταβλητών που διατηρεί τους στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης σε υψηλά επίπεδα. Αρχικά, επιλέχθηκαν οι σταθμοί με πληρότητα μεγαλύτερη του 80% (38 σταθμοί στο σύνολο των 44 της αρχικής βάσης δεδομένων) μεταξύ των οποίων εφαρμόστηκε η βηματική μέθοδος παλινδρόμησης για τη συμπλήρωση των 36 εξ αυτών (καθώς οι 2 από τους σταθμούς έχουν απορριφθεί κατά τη διαδικασία συμπλήρωσης των 3-ωριαίων μετρήσεων). Με την επιλογή σταθμών υψηλής πληρότητας εξασφαλίστηκε η μέγιστη δυνατή συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων των σταθμών. Ο Πίνακας 2.IX εμφανίζει τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών για κάθε σταθμό που χρησιμοποιήθηκαν στο αρχικό μοντέλο παλινδρόμησης όπως αυτό προέκυψε με την εισαγωγή όλων των στατιστικά σημαντικών σταθμών, καθώς επίσης και τον αριθμό των σταθμών που παρέμειναν στο τελικό μοντέλο μετά τη σταδιακή μείωση των ανεξάρτητων μεταβλητών. Και στις δύο περιπτώσεις (αρχικό και τελικό μοντέλο) οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, καθώς στην πλειοψηφία τους οι τιμές είναι μεγαλύτερες του 80%. Η μείωση που προκύπτει από την αφαίρεση ανεξάρτητων μεταβλητών είναι στην ακραία περίπτωση 2,6% στο σταθμό της Ρόδου. Ο συγκεκριμένος σταθμός παρουσιάζει και τη μικρότερη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού στο τελικό μοντέλο (72%). Η μέγιστη τιμή του RMSE των τελικών μοντέλων παλινδρόμησης είναι 2,01 h και εμφανίζεται στο σταθμό της Αλεξανδρούπολης.

Πίνακας** 2.IX: **Στοιχεία μοντέλων παλινδρόμησης κάθε σταθμού

Α/Α	***ΣΤΑΘΜΟΣ***	***ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ***		*R^2*		*RMSE (h)*
		ΑΡΧΙΚΟΣ	***ΤΕΛΙΚΟΣ***	***ΑΡΧΙΚΟ***	***ΤΕΛΙΚΟ***	***ΤΕΛΙΚΟ***
1	Αγρίνιο	11	3	0,910	0,897	1,31
2	Αγχίαλος	6	3	0,914	0,911	1,27
3	Αλεξανδρούπολη	7	3	0,790	0,780	2,01
4	Αλίαρτος	14	3	0,905	0,897	1,41
5	Ανδραβίδα	11	3	0,947	0,941	0,94
6	Άραξος	10	3	0,905	0,899	1,24
7	Άρτα/Χαλκιάδες	6	3	0,915	0,911	1,17

Α/Α	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ		R^2		RMSE (h)
		ΑΡΧΙΚΟΣ	ΤΕΛΙΚΟΣ	ΑΡΧΙΚΟ	ΤΕΛΙΚΟ	ΤΕΛΙΚΟ
8	Ελληνικό	16	4	0,918	0,898	1,28
9	Ηράκλειο	16	4	0,927	0,906	1,23
10	Θήρα	13	3	0,866	0,853	1,53
11	Ιεράπετρα	17	5	0,876	0,870	1,31
12	Ιωάννινα	9	3	0,850	0,841	1,61
13	Καλαμάτα	14	4	0,874	0,864	1,46
14	Καστέλλι	18	5	0,908	0,887	1,27
15	Καστοριά	10	3	0,836	0,816	1,73
16	Κέρκυρα	6	4	0,817	0,811	1,79
17	Λαμία	10	3	0,912	0,901	1,32
18	Λάρισα	9	3	0,914	0,908	1,27
19	Λήμνος	10	3	0,869	0,860	1,56
20	Μεθώνη	12	4	0,852	0,839	1,46
21	Μίκρα	8	3	0,867	0,863	1,53
22	Μυτιλήνη	10	3	0,873	0,864	1,55
23	Νάξος	15	4	0,880	0,870	1,53
24	Πυργέλα/Άργος	14	4	0,921	0,914	1,44
25	Πύργος	13	3	0,947	0,929	1,04
26	Ρέθυμνο	18	4	0,915	0,908	1,21
27	Ρόδος	16	4	0,744	0,718	1,96
28	Σέρρες	3	2	0,815	0,803	1,82
29	Σητεία	15	4	0,884	0,869	1,43
30	Σκύρος	13	4	0,845	0,833	1,77
31	Σούδα	16	4	0,900	0,888	1,40
32	Σπάτα	14	3	0,879	0,863	1,83
33	Τανάγρα	14	3	0,923	0,911	1,31
34	Τρίπολη	13	3	0,875	0,870	1,43
35	Τυμπάκι	17	5	0,862	0,848	1,42
36	Χίος	13	4	0,872	0,867	1,51

Συγκρίνοντας τις τιμές του R^2 με αυτές του RMSE, είναι φανερό ότι οι σταθμοί με χαμηλή τιμή του R^2 παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές RMSE (Σχήμα 2.32).



Σχήμα** 2.32: **Σύγκριση των τιμών του** R^2 **με τις τιμές του** RMSE **για τα μοντέλα παλινδρόμησης των σταθμών κατά τη συμπλήρωση των ελλειπουσών μετρήσεων διάρκειας ηλιοφάνειας

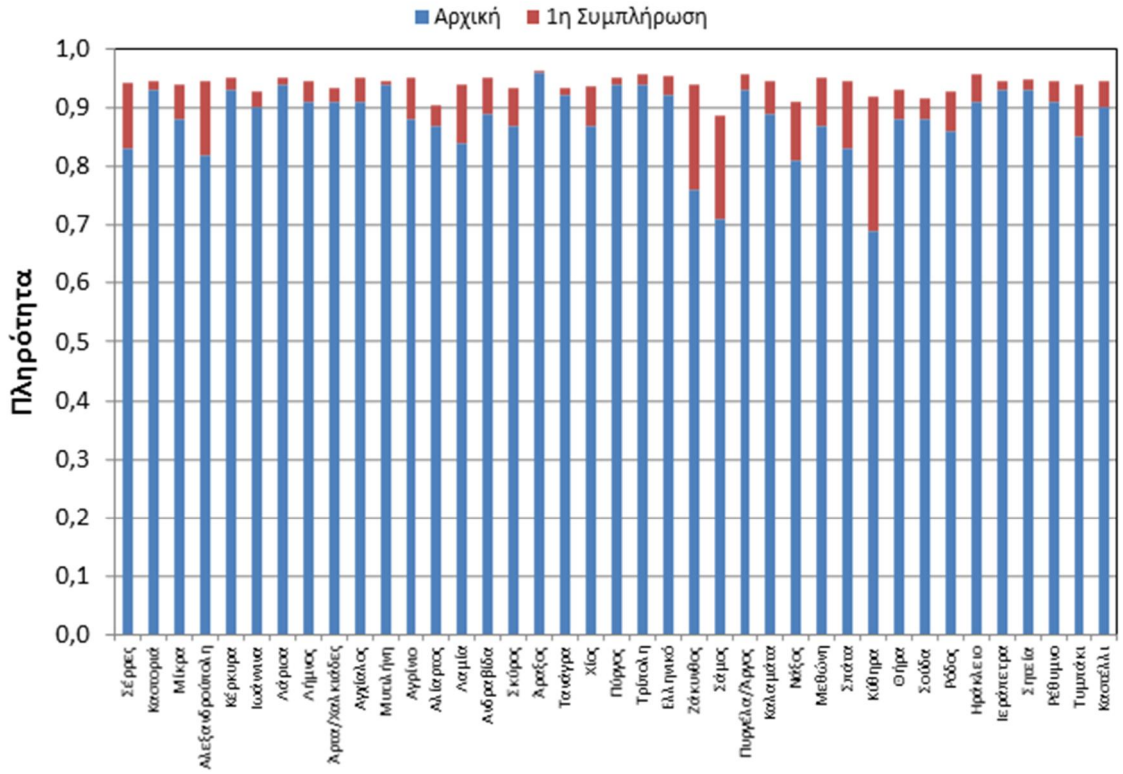
Οι σταθμοί, οι οποίοι παρουσιάζουν τις δυσμενέστερες τιμές στατιστικών δεικτών, είναι ο σταθμός της Ρόδου και της Αλεξανδρούπολης. Η πληρότητα των δύο αυτών σταθμών είναι 86% και 82%, αντίστοιχα· ως εκ τούτου τα μοντέλα που προέκυψαν χρησιμοποιούνται για τη συμπλήρωση του 10% και 14% της χρονοσειράς (λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέγιστη πληρότητα που μπορεί να επιτευχθεί είναι 96%) αποτελώντας μικρό ποσοστό στο σύνολο των μετρήσεων. Εξετάζοντας και τους υπόλοιπους στατιστικούς δείκτες για τους συγκεκριμένους σταθμούς, για τη Ρόδο MBE = 0,28 h και IA = 0,84 και για την Αλεξανδρούπολη MBE = 0,71 h και IA = 0,81, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα μοντέλα παλινδρόμησης των σταθμών μπορούν με ικανοποιητική ακρίβεια να συμπληρώσουν τις ελλείπουσες μετρήσεις.

Με την ίδια διαδικασία συμπληρώθηκαν στη συνέχεια οι σταθμοί Ζακύνθου, Κυθήρων, και Σάμου, των οποίων οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης των μοντέλων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.Χ.

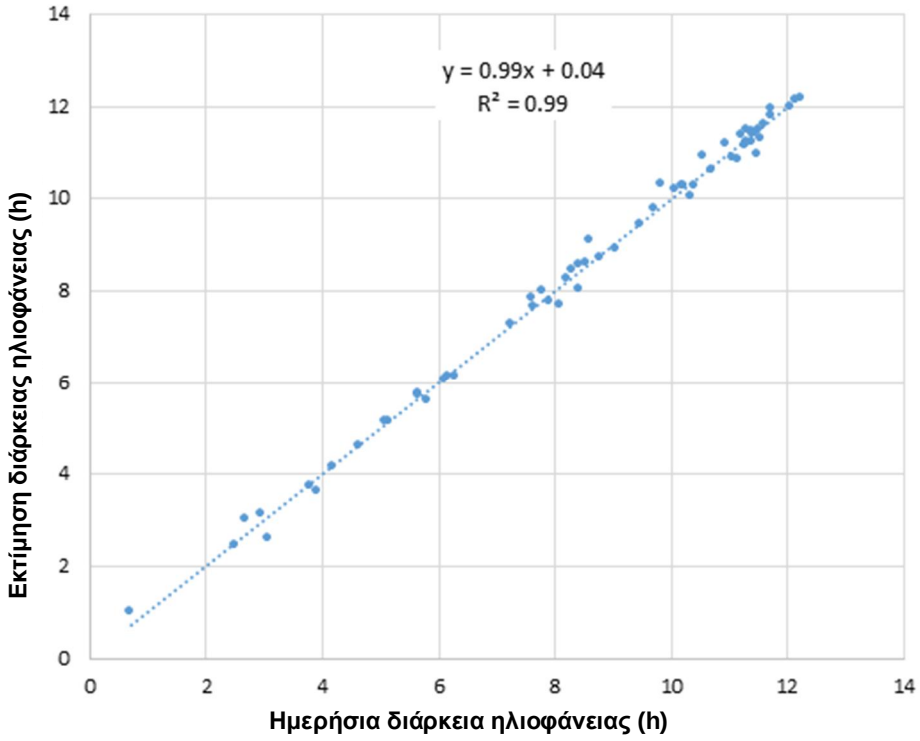
Πίνακας** 2.Χ: **Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης μοντέλων παλινδρόμησης

Α/Α	**ΣΤΑΘΜΟΣ**	R^2	RMSE (h)
1	Ζάκυνθος	0,88	1,47
2	Κύθηρα	0,77	1,83
3	Σάμος	0,88	1,46

Με τη χρήση συναρτήσεων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης συμπληρώθηκαν τα κενά 39 εκ των 44 σταθμών· οι σταθμοί αυτοί απέκτησαν πληρότητα σε τιμές ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας για το σύνολο της 15-ετίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.33. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, στις χρονοσειρές παρέμειναν ελλείπουσες τιμές οι οποίες στη συνέχεια αντιμετωπίστηκαν με δημιουργία νέων μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με ανεξάρτητες μεταβλητές τις μετρήσεις ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας του προηγούμενου και του επόμενου μήνα από το μήνα όπου εμφανίζονται τα κενά.



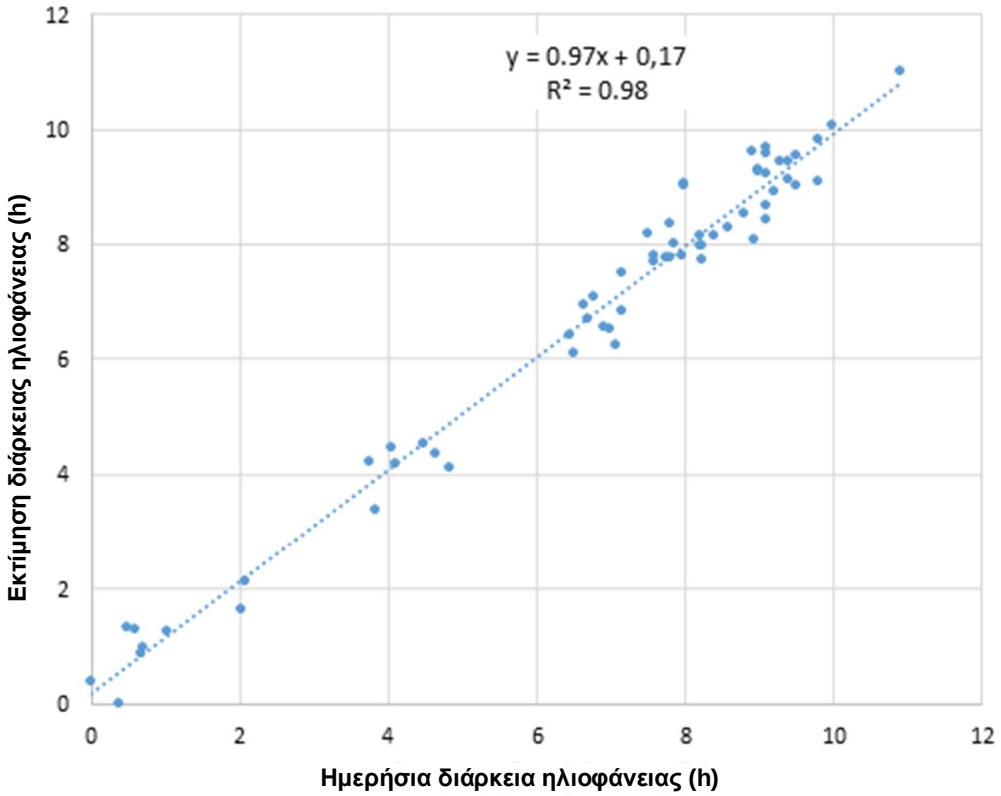
***Σχήμα** 2.33: **Πληρότητα χρονοσειρών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μετά την εφαρμογή μοντέλων παλινδρόμησης για τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων σε όλη την** 15-ετία*



Σχήμα** 2.34: **Σύγκριση τιμών ημερήσιας ηλιοφάνειας μοντέλου και μετρήσεων κατά τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων στο σταθμό Μίκρας

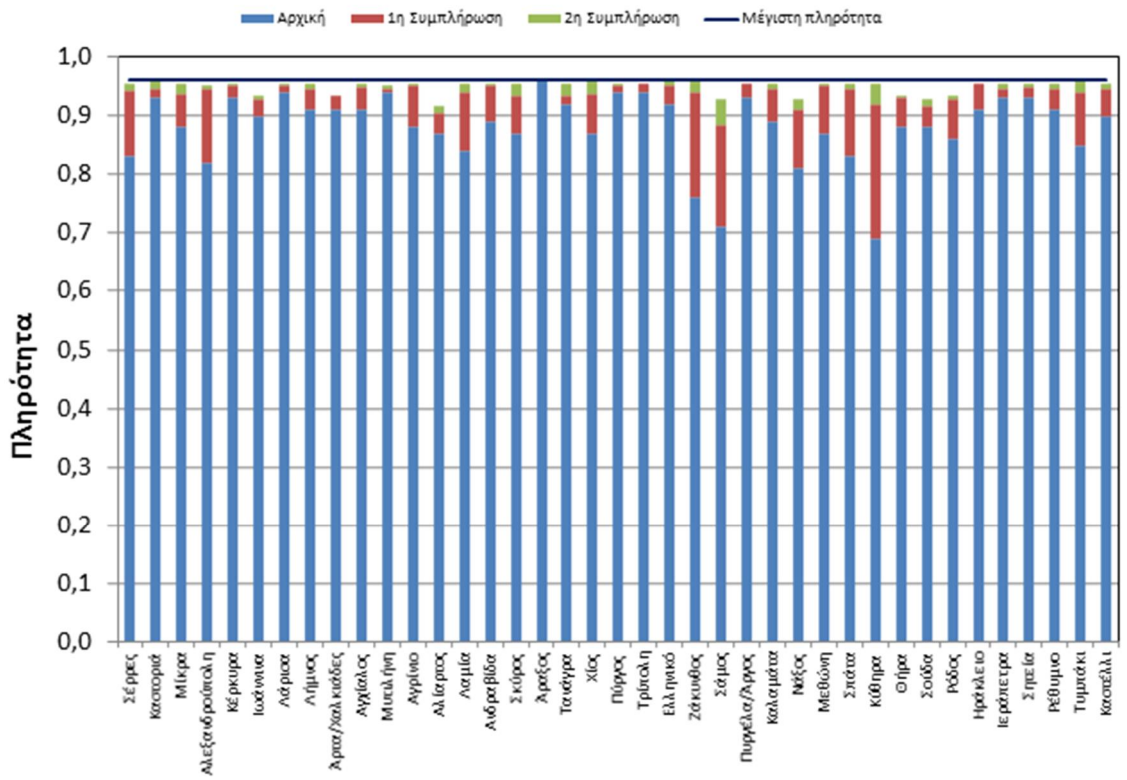
Για παράδειγμα, στη συμπλήρωση του μήνα Σεπτεμβρίου 1991 του σταθμού της Μίκρας, η συνάρτηση παλινδρόμησης προέκυψε από τις μετρήσεις διάρκειας ηλιοφάνειας Αυγούστου και Οκτωβρίου του ίδιου έτους των άλλων σταθμών. Οι σταθμοί που εισήχθησαν στο μοντέλο μετά την ανάλυση της βηματικής παλινδρόμησης είναι οι σταθμοί Λήμνου, Μυτιλήνης, Χίου, Θήρας, Ηρακλείου, Ιεράπετρας και Καστελλίου. Το μοντέλο παλινδρόμησης είχε μεγάλη ακρίβεια στην πρόβλεψη των τιμών, η οποία επιβεβαιώνεται και από την τιμή του R^2 = 0,99 (Σχήμα 2.34).

Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και από την εφαρμογή του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης στη συμπλήρωση κενών του μήνα Φεβρουαρίου 1990 του σταθμού της Καλαμάτας. Η συνάρτηση παλινδρόμησης υπολογίστηκε με τις μετρήσεις ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας των μηνών Ιανουαρίου και Μαρτίου του ίδιου έτους των σταθμών Λάρισας, Τανάγρας, Πύργου, Πυργέλας, Μεθώνης και Θήρας. Η αριθμητική τιμή του συντελεστή προσδιορισμού της συνάρτησης παλινδρόμησης προκύπτει 0,98, επιβεβαιώνοντας για άλλη μια φορά την αξιοπιστία του μοντέλου (Σχήμα 2.35).

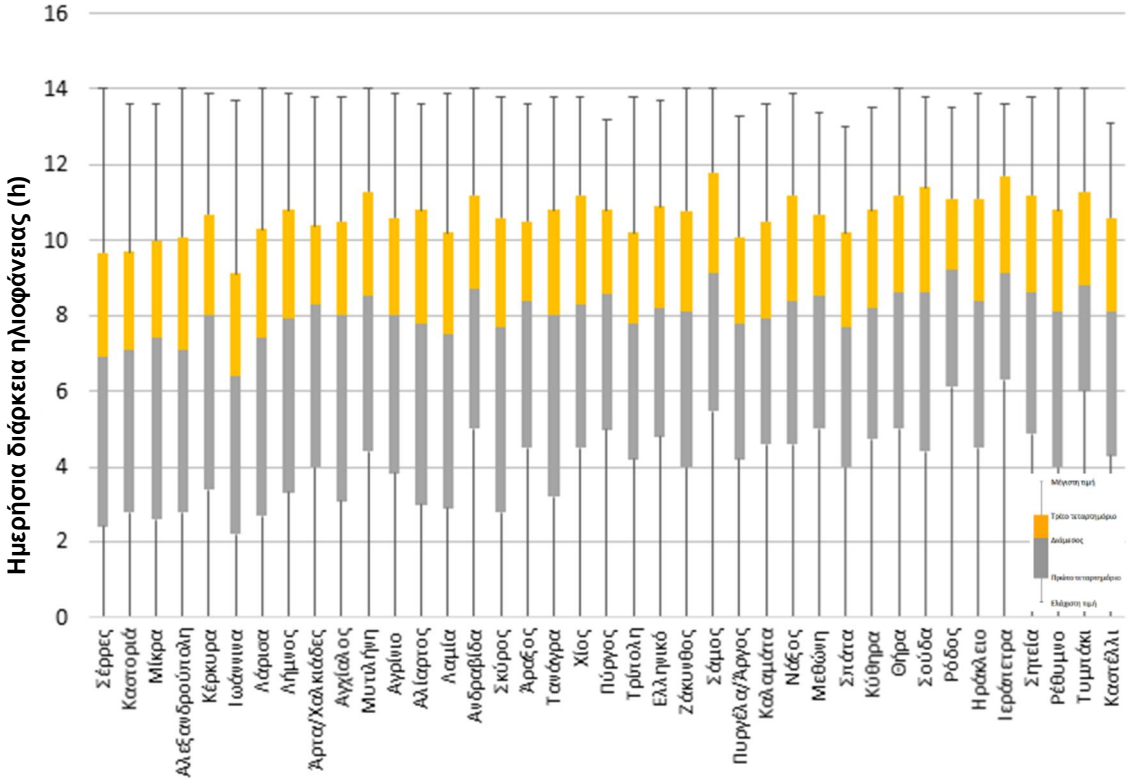


Σχήμα** 2.35: **Σύγκριση τιμών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας μοντέλου και μετρήσεων κατά τη συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων στο σταθμό Καλαμάτας

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας επιτεύχθηκε η μέγιστη δυνατή συμπλήρωση ελλειπουσών μετρήσεων στις χρονοσειρές ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας με τη μέγιστη δυνατή στατιστική αξιοπιστία. Όπως παρατηρείται στο νέο διάγραμμα πληρότητας των σταθμών (Σχήμα 2.36), οι σταθμοί δεν συμπληρώθηκαν έως τη μέγιστη δυνατή πληρότητα (96%) αλλά έως την πληρότητα που προκύπταν στατιστικά αποδεκτά αποτελέσματα. Οι μήνες, που συνέχισαν να περιέχουν ελλείπουσες τιμές, αφαιρέθηκαν από τη βάση δεδομένων για τη συγκρότηση του Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους.



***Σχήμα** 2.36: **Πληρότητα χρονοσειράς ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας σταθμών στα διάφορα στάδια συμπλήρωσης των ελλειπουσών μετρήσεων της** 15-ετίας*



Σχήμα** 2.37: **Μεταβλητότητα των τιμών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας των σταθμών της τελικής βάσης δεδομένων

Τέλος, πραγματοποιήθηκε νέος έλεγχος ποιότητας των τιμών της ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας, ελέγχοντας τα όρια μεταβολής να βρίσκονται μεταξύ 0 και 14 ωρών. Στο Σχήμα 2.37 παρουσιάζεται σε θηκόγραμμα η μεταβλητότητα των τιμών ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας της τελικής βάσης δεδομένων. Το πρώτο τεταρτημόριο λαμβάνει τιμές από 2 έως 6 ώρες ηλιοφάνειας με μικρότερες τιμές στις περιοχές που βρίσκονται σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Το τρίτο τεταρτημόριο παρουσιάζει τιμές μικρότερου εύρους, 10 έως 12 ωρών ηλιοφάνειας. Το μέσο ενδοτεταρτημοριακό εύρος, όπου συγκεντρώνεται το 50% των τιμών, είναι 6,55 h με μέση διαφορά του 1ου και του 2ου τεταρτημορίου 2,6 h, ενώ η αντίστοιχη διαφορά του 2ου και 3ου τεταρτημορίου είναι 3,99 h.

2.6 Δημιουργία ωριαίων χρονοσειρών – Τελική βάση δεδομένων

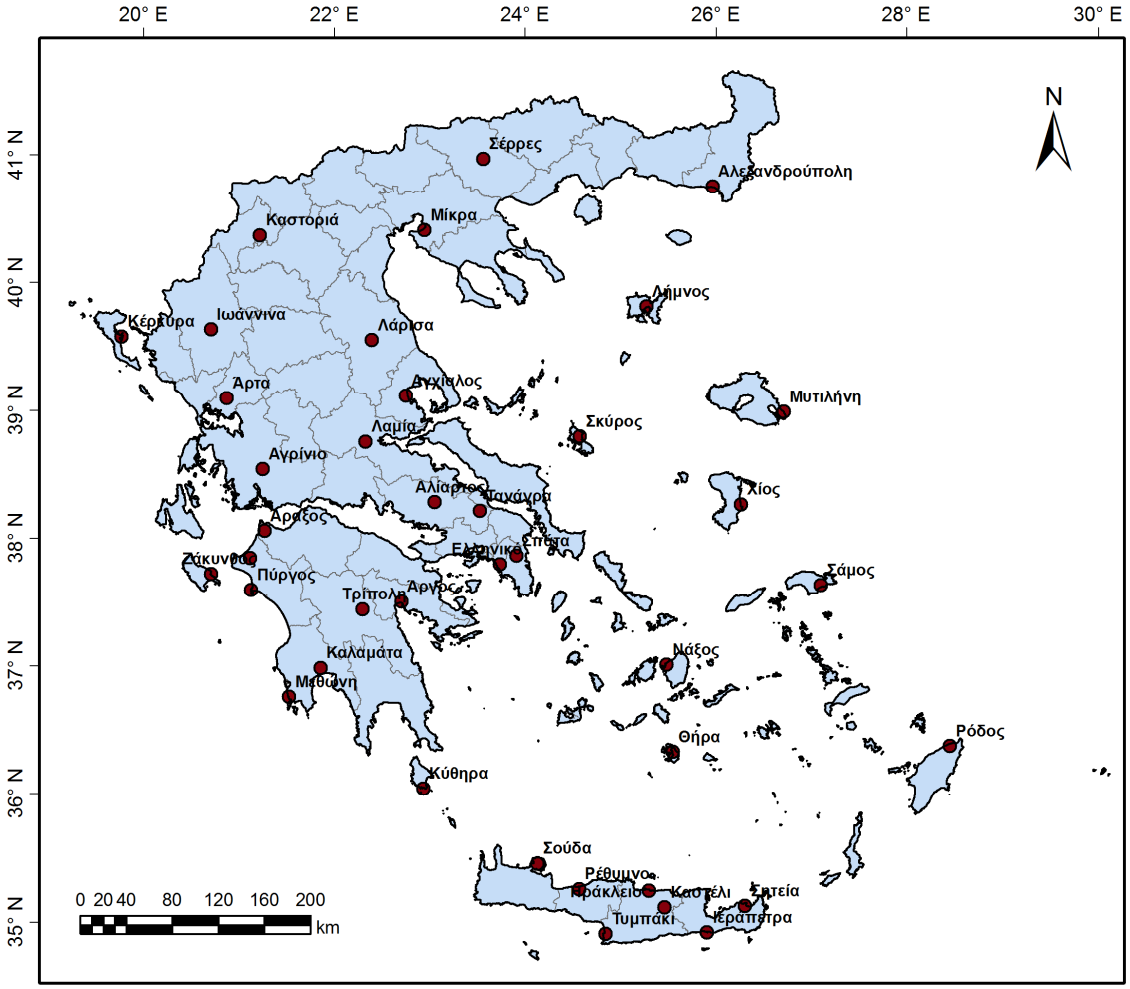
Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων της βιβλιογραφίας (Walsh et al. 1983, Marion & Urban 1995, Petrakis et al. 1996, Skeiker 2004 κ.λπ.), οι χρονοσειρές 3-ωριαίων μετρήσεων μετατρέπονται σε ωριαίες, με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. Η μόνη διαφοροποίηση στη βιβλιογραφία αφορά το μέγεθος της σχετικής υγρασίας για το οποίο οι Colliver et al. (1995) προτείνουν ως καλύτερη μέθοδο αυτή των κυβικών τμηματικά πολυωνυμικών καμπυλών. Για λόγους πληρότητας ελέγχθηκε η ακρίβεια συμπλήρωσης τιμών μεταξύ των 3-ωριαίων μετρήσεων σε χρονοσειρά ωριαίων τιμών του έτους 2005 από διαθέσιμες μετρήσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο σταθμό του Λόφου Νυμφών. Από τις ωριαίες μετρήσεις παρέμειναν οι τιμές των 3-ωρων και οι υπόλοιπες χαρακτηρίστηκαν ως ελλείπουσες. Για τη συμπλήρωση των ενδιάμεσων τιμών, εφαρμόστηκε αρχικά η γραμμική παρεμβολή και στη συνέχεια η μέθοδος των κυβικών τμηματικά πολυωνυμικών καμπυλών. Οι τιμές, που συμπληρώθηκαν από τις μεθόδους, συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης (Πίνακας 2.XI) έδειξαν ότι η γραμμική παρεμβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγάλη αξιοπιστία καθώς δίνει εξίσου μεγάλη ακρίβεια με αυτή των κυβικών τμηματικά πολυωνυμικών καμπυλών.

Πίνακας** 2.XI: **Σύγκριση μεθόδων μετατροπής** 3-**ωριαίας χρονοσειράς μετρήσεων σχετικής υγρασίας σε ωριαία

	Γραμμική Παρεμβολή	Splines
R^2	0,951	0,950
MBE	-0,010%	-0,015%
RMSE	3,13%	3,28%
IA	0,9871	0,9872

Ως εκ τούτου, η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής χρησιμοποιήθηκε και για τις τρεις μετεωρολογικές παραμέτρους (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία και ατμοσφαιρική πίεση) για τη μετατροπή των 3-ωριαίων χρονοσειρών σε ωριαίες.

Η τελική βάση δεδομένων που προέκυψε αποτελείται από 39 σταθμούς και περιέχει 400 χιλιάδες τιμές ανά σταθμό, δηλαδή συνολικά 15,6 εκατομμύρια τιμές. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης καθώς και τιμές ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας για τη χρονική περίοδο 1985-1999. Η απόρριψη 5 σταθμών (Χρυσούπολης Καβάλας, Κόνιτσας, Βέλου, Αργοστολίου και Ν. Φιλαδέλφειας) κατά τη διαδικασία συμπλήρωσης των κενών (Σχήμα 2.38), δεν επέφερε σημαντική μεταβολή της διασποράς των σταθμών στην ελληνική επικράτεια καθιστώντας τους αντιπροσωπευτικό δείγμα για την κάλυψη όλης της γεωγραφικής περιοχής.



Σχήμα** 2.38: **Χάρτης με τους 39 σταθμούς της βάσης δεδομένων για τη συγκρότηση του ΤΜΕ

Βιβλιογραφία

Argiriou, A., Lykoudis, S., Kontoyiannidis, S., Balaras, C.A., Asimakopoulos, D.N., Petrakis, M. & Kassomenos, P., 1999. Comparison of methodologies for TMY generation using 20 years data for Athens, Greece. *Solar Energy*, 66(1), pp.33–45.

Aubinet, M. et al., 1999. *Advances in Ecological Research Volume 30*, Elsevier.

Claridge, D.E. & Chen, H., 2006. Missing data estimation for 1–6 h gaps in energy use and weather data using different statistical methods. *International Journal of Energy Research*, 30(13), pp.1075–1091.

Colliver, D.G., Zhang, H., Gates, R.S. & Priddy, K.T., 1995. 3904 Determination of the 1%, 2.5%, and 5% Occurrences of Extreme Dew-Point Temperatures and Mean Coincident Dry-Bulb Temperatures. *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin*, 101(2), pp.265–286.

Falge, E., Baldocchi, D. & Olson, R., 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, pp.43–69.

Goulden, M.L., Munger, W.J., Fan, S.-M., Daube, B.C. & Wofsy, S.C., 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 2, pp.169–182.

Granier, A. et al., 2000. The carbon balance of a young beech forest. *Functional Ecology*, 14, pp.312–325.

Greco, S. & Baldocchi, D.D., 1996. Seasonal variations of CO_2 and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, pp.183–197.

Hui, D., Luo, Y. & Katul, G., 2003. Partitioning interannual variability in net ecosystem exchange between climatic variability and functional change. *Tree physiology*, 23(7), pp.433–42.

Hui, D., Shiqiang, W., Su, B., Katul, G., Monson, R. & Luo, Y., 2004. Gap-filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (MI) for annual estimations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), pp.93–111.

Jarvis, P.G., Massheder, J.M., Hale, S.E., Moncrieff, J.B., Rayment, M. & Scott, S.L., 1997. Seasonal variation of carbon dioxide, water vapor, and energy exchanges of a boreal black spruce forest. *Journal of Geophysical Research*, 102(D24), p.28953.

Jiang, Y., 2010. Generation of typical meteorological year for different climates of China. *Energy*, 35(5), pp.1946–1953.

Kemp, W.P., Burnell, D.H., Everson, D.O. & Thomson, A.J., 1983. Estimating missing daily maximum and minimum temperatures. *Journal of Climate Applied Meteorology*, 22, pp.1587–1593.

Kotsiantis, S., Kostoulas, A., Lykoudis, S., Argiriou, A. & Menagias, K., 2006. Filling missing temperature values in weather data banks. In *2nd IEE International Conference on Intelligent Environments*. Athens, Greece, pp. 327–334.

Little, R.J.A. & Rubin, D.B., 2002. *Statistical Analysis with Missing Data, 2nd Edition*, Wiley.

Marion, W. & Urban, K., 1995. *User's manual for TMY2s—Typical Meteorological Years*, National Renewable Energy Laboratory.

Monson, R.K., Turnipseed, A.A., Sparks, J.P., Harley, P.C., Scott-Denton, L.E., Sparks, K. & Huxman, T.E., 2002. Carbon sequestration in a high-elevation, subalpine forest. *Global Change Biology*, 8(5), pp.459–478.

Petrakis, M., Lykoudis, S. & Kassomenos, P., 1996. A software tool for the creation of a typical meteorological year. *Environmental Software*, 11(4), pp.221–227.

Pilegaard, K., Hummelshøj, P., Jensen, N.O. & Chen, Z., 2001. Two years of continuous CO 2 eddy-flux measurements over a Danish beech forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, pp.29–41.

Lo Presti, R., Barca, E. & Passarella, G., 2010. A methodology for treating missing data applied to daily rainfall data in the Candelaro River Basin (Italy). *Environmental monitoring and assessment*, 160(1-4), pp.1–22.

Schafer, J.L., 1997. *Analysis of incomplete multivariate data*, New York: Chapman and Hall/CRC.

Skeiker, K., 2004. Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein–Schafer statistical method. *Energy Conversion and Management*, 45(1), pp.99–112.

Sturges, H.A., 1926. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), pp.65–66.

Theil, H., 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I. *Nederl. Akad. Wetensch., Proc.*, 53, pp.386–392.

Walsh, P.J., Munro, M.C. & Spencer, J.W., 1983. *An Australian climatic data bank for use in the estimation of building energy use*, Highett, Australia.

3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Υπολογισμός Ηλιακής Ακτινοβολίας

3.1 Εισαγωγή

Η ενεργειακή απόδοση ενός ηλιακού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας, αλλά και οι απαιτούμενοι ενεργειακοί υπολογισμοί για την εκτίμηση του θερμικού ισοζυγίου ενός κτηρίου, απαιτούν την ύπαρξη διαθέσιμων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή εγκατάστασης. Η διαθεσιμότητα μακροχρόνιων και αξιόπιστων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας σε ευρύ φάσμα περιοχών αποτελεί έως και σήμερα μείζον πρόβλημα για τους μελετητές, καθώς το ενδιαφέρον υλοποίησης μιας ηλιακής ενεργειακής εγκατάστασης μπορεί να προκύψει σε οποιαδήποτε περιοχή, υπό την προϋπόθεση ύπαρξης κατάλληλου ηλιακού δυναμικού. Ως συνέπεια των παραπάνω και λόγω της μικρής πυκνότητας ηλιακών σταθμών ανά τον κόσμο, προέκυψε αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον στην ανάπτυξη μοντέλων ικανών να εκτιμήσουν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης.

Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: 1) στα εμπειρικά μοντέλα, τα οποία προϋποθέτουν την εύρεση μιας εμπειρικής σχέσης που συνδέει την ηλιακή ακτινοβολία με διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους, 2) στα στατιστικά ή στοχαστικά μοντέλα, τα οποία βασίζονται στη στατιστική επεξεργασία δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας χωρίς να απαιτούνται άλλα μετεωρολογικά δεδομένα, και 3) στα ατμοσφαιρικά ή προσδιοριστικά/ντετερμινιστικά μοντέλα, ή ηλιακά ατμοσφαιρικά ή ολοφασματικά, τα οποία στηρίζονται στον υπολογισμό της απορρόφησης και της σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα συστατικά της ατμόσφαιρας (Σανταμούρης 1985). Κατωτέρω δίνεται μια σύντομη περιγραφή της κάθε κατηγορίας.

Εμπειρικά μοντέλα

Τα εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους, βασίζονται στη συσχέτιση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας με αστρονομικές και μετεωρολογικές παραμέτρους για τις περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται. Τα περισσότερα εμπειρικά μοντέλα βασίζονται στο συσχετισμό των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας με τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας ή νέφωσης. Οι συνηθέστερες παράμετροι συσχετισμού είναι η σχετική ηλιοφάνεια[3], καθώς και ο βαθμός νέφωσης. Οι μετρήσεις διάρκειας ηλιοφάνειας συμπεριλαμβάνονται στις παραμέτρους που καταγράφονται στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς και παρουσιάζουν σχετικά μεγάλη ακρίβεια, σε αντίθεση με το βαθμό νέφωσης ο οποίος εκτιμάται οπτικά. Πρέπει να τονιστεί

[3] Η σχετική ηλιοφάνεια υπολογίζεται ως ο λόγος των μετρούμενων ωρών ημερήσιας ηλιοφάνειας της ημέρας προς το μέγιστο αριθμό ωρών ηλιοφάνειας για τη συγκεκριμένη ημέρα.

ότι οι συντελεστές συσχέτισης των εμπειρικών μοντέλων έχουν καθαρά τοπική ισχύ. Μερικά από τα πιο γνωστά εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αυτά που προτάθηκαν από τους Page (1964), Reddy (1971), Hottel (1976), Barra (1983), ASHRAE (1981) και Ångström (1924).

Στοχαστικά μοντέλα

Ένα στοχαστικό μοντέλο υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στηρίζεται στη στατιστική επεξεργασία δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας της υπό μελέτης περιοχής, χωρίς να απαιτούνται κλιματικά δεδομένα του τόπου. Η βασική λειτουργία των μοντέλων αυτών βασίζεται στην ανάπτυξη μιας διαδικασίας πρόβλεψης της τιμής, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (π.χ. μία ώρα ή μία ημέρα), όταν είναι γνωστές οι αντίστοιχες τιμές της προηγούμενης περιόδου. Η πρόβλεψη βασίζεται στη στατιστική επεξεργασία των διαδοχικών τιμών του δείκτη αιθριότητας (clearness index)[4]. Κατά συνέπεια, ένα στοχαστικό μοντέλο κρίνεται πάνω στη βάση του κατά πόσο μπορεί να αναπαραγάγει πιστά τις τιμές της φαινόμενης διαπερατότητας σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Μερικά από τα πιο γνωστά στοχαστικά μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το μοντέλο ARMA (Auto-Regressive Moving Average) που χρησιμοποιήθηκε από τους Goh & Tan (1977), η μέθοδος παραγοντικής ανάλυσης (Principal Component Analysis Method) που προτάθηκε από τον Harman (1960) (Sen 2008) και η μέθοδος των πινάκων Markov.

Ατμοσφαιρικά μοντέλα

Ως ατμοσφαιρικά χαρακτηρίζονται τα μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, τα οποία βασίζονται στον υπολογισμό της απορρόφησης και σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας από κάθε συστατικό της ατμόσφαιρας. Για την επίτευξη της εκτίμησης, είναι απαραίτητη η γνώση διαφόρων ατμοσφαιρικών παραμέτρων, όπως, η υγρασία, η θερμοκρασία αέρα, η ατμοσφαιρική πίεση, ο βαθμός θόλωσης της ατμόσφαιρας, η ποσότητα του ατμοσφαιρικού όζοντος, το ποσοστό νέφωσης, κ.λπ. Κύριο χαρακτηριστικό των ατμοσφαιρικών μοντέλων είναι η μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού, για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα, δυνατότητα η οποία δεν παρέχεται από τα εμπειρικά μοντέλα, ενώ είναι σχεδόν αδύνατο να επιτευχθεί με στοχαστικές διαδικασίες. Μερικά από τα σημαντικότερα ατμοσφαιρικά μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας είναι εκείνα που προτάθηκαν από τους Atwater & Ball (1978), Davies & Hay (1978), Watt (1978), Hoyt (1978), Lacis & Hansen (1974), Bird & Hulstrom (1980), Bird & Hulstrom (1981), Barbaro et al. (1979), Lyons & Edwards (1982), Gueymard (1989), Psiloglou et al. (2000) και Kambezidis et al. (1998).

3.2 Επιλογή μοντέλου υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας

Λαμβάνοντας υπόψη τη βάση μετεωρολογικών δεδομένων, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αλλά και τα χαρακτηριστικά (πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα) των μοντέλων υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας, επιλέχθηκε η χρήση ατμοσφαιρικού μοντέλου. Η επιλογή ατμοσφαιρικού μοντέλου βασίστηκε, μεταξύ άλλων, στα πλεονεκτήματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας που παρουσιάζει έναντι των υπολοίπων, καθώς παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής σε κάθε τόπο, με μοναδική προϋπόθεση την ύπαρξη διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων. Παράλληλα, μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε επιθυμητό χρονικό βήμα, δίνοντας τη δυ-

[4] Ως δείκτης αιθριότητας ορίζεται το πηλίκο της προσπίπτουσας στο έδαφος ηλιακής ακτινοβολίας, προς την ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας, στο ίδιο χρονικό διάστημα Kondratyev & Fedorova (1977)

νατότητα αξιοποίησης της υπολογιζόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε μοντέλα υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης ηλιακών συστημάτων, στα οποία είναι απαραίτητη η γνώση της χρονικής μεταβολής της. Τέλος, επιτρέπει τον υπολογισμό της διάχυτης και της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνοντας την αξιοπιστία των ενεργειακών υπολογισμών σε εγκαταστάσεις συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών, καθώς επίσης, κατά το σχεδιασμό βιοκλιματικών κτηρίων.

Από τα διαθέσιμα ατμοσφαιρικά μοντέλα της βιβλιογραφίας, επιλέχθηκε το Μετεωρολογικό Μοντέλο Ακτινοβολίας, ή όπως είναι γνωστό στη βιβλιογραφία Meteorological Radiation Model (MRM) (Kambezidis & Papanikolaou 1989, Kambezidis & Papanikolaou 1990, Kambezidis & Tsangrassoulis 1993, Kambezidis et al. 1997) το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Ατμοσφαιρικής Έρευνας του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Η δημιουργία του μοντέλου MRM ξεκίνησε το 1987 και αποτελεί ένα προσδιοριστικό/ντετερμινιστικό ολοφασματικό μοντέλο υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουσας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης. Αρχικά αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού, ενώ στη συνέχεια, μέσα από σειρά αναβαθμίσεων, κατέληξε το έτος 2006 στην 5^{η} έκδοσή του (MRM v5), η οποία αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας με μεγάλη ακρίβεια, ακόμη και σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού.

Το μοντέλο MRM είναι ένα από τα ευρέως αναγνωρισμένα μοντέλα υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο έχει αξιολογηθεί από ερευνητές σε διεθνές επίπεδο. Οι Muneer et al. (1998) χρησιμοποίησαν για την αξιολόγησή του ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικών παραμέτρων από 10 σταθμούς του Ηνωμένου Βασιλείου και χρονική περίοδο 10 ετών. Τα μετεωρολογικά δεδομένα των σταθμών αυτών χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο MRM για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στις θέσεις των 10 σταθμών. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας των εν λόγω σταθμών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας, το MBE σε συνθήκες καθαρού ουρανού ήταν 9%, ενώ σε συνθήκες νεφοσκεπούς έφθανε το 24%. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της σύγκρισης σε μέσες ωριαίες και ημερήσιες τιμές ανά μήνα, το σχετικό MBE μειώθηκε σημαντικά, φθάνοντας στο 3%. Το ίδιο έτος, οι Kambezidis et al. (1998), χρησιμοποίησαν μετεωρολογικά δεδομένα μιας 4-ετίας από μετεωρολογικούς σταθμούς της Αθήνας και της Λισαβόνας για την αξιολόγηση της 3^{ης} έκδοσης του MRM. Από τα αποτελέσματα προέκυψε, για μεν την Αθήνα MBE ίσο με 5,5 W/m^2, για δε τη Λισαβόνα 13,3 W/m^2. Το 2006, οι Muneer & Younes (2006), πραγματοποίησαν αξιολόγηση του μοντέλου MRM σε 10 περιοχές του βόρειου ημισφαίριου. Στις περιοχές μελέτης περιλαμβάνονταν τρεις ευρωπαϊκές πόλεις (Μπράκνελ στο Ηνωμένο Βασίλειο, Ζιρόνα και Μαδρίτη στην Ισπανία) και επτά πόλεις της Ασίας (Μπαχρέιν στη Μέση Ανατολή, Τσεννάι, Μουμπάι, Νέο Δελχί και Πούνε στην Ινδία, Φουκουόκα και Σαππόρο στην Ιαπωνία). Οι χρονοσειρές των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν σε χρονικές περιόδους 2 έως 11 ετών. Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μετρήσεων με τα αποτελέσματα του μοντέλου MRM, προέκυψε ότι οι τιμές του MBE κυμάνθηκαν από 12,3 έως 33,8 W/m^2. Σχετικά πρόσφατα, σε εργασία των Psiloglou & Kambezidis (2007), πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου MRM στην εκτίμηση ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια δύο συνεχόμενων ημερών, στη μία εκ των οποίων έλαβε χώρα έκλειψη ηλίου. Και για τις δύο ημέρες τα αποτελέσματα της σύγκρισης έδειξαν ότι το μοντέλο MRM μπορεί να υπολογίσει με μεγάλη ακρίβεια την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς για την ημέρα της έκλειψης η τιμή του σχετικού MBE ήταν ίση με −1,7% και για την προηγούμενη ημέρα, όπου επικρατούσαν συνθήκες καθαρού ουρανού, ίση με 2%.

Παράλληλα, το μοντέλο MRM έχει συγκριθεί με άλλα μοντέλα σε ερευνητικές εργασίες, λαμβάνοντας πρώτες θέσεις στη συγκριτική κατάταξη. Ενδεικτικά αναφέρεται η εργασία των Gul et al. (1998) όπου το μοντέλο MRM συγκρίνεται με το μοντέλο CRM (Cloud-cover Radiation Model), σε

δεδομένα 3-ετίας, από μετεωρολογικούς σταθμούς της Ζυρίχης και του Νταβός, όπου, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας, το μοντέλο MRM υπολογίζει την ηλιακή ακτινοβολία με μεγαλύτερη ακρίβεια. Σε νεότερη εργασία, οι Muneer & Gul (2000) συγκρίνουν στην εργασία τους το μοντέλο MRM με το μοντέλο CRM και το μοντέλο PRM (Page Radiation Model, Page 1997). Για την αξιολόγηση των μοντέλων οι ερευνητές χρησιμοποίησαν μετεωρολογικά δεδομένα από 5 περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού το μοντέλο MRM κατατάσσεται δεύτερο στην ακρίβεια πρόβλεψης, ενώ στην περίπτωση καθαρού ουρανού, πρώτο. Τέλος, ο Gueymard (2012) συγκρίνει 18 από τα πιο γνωστά και επιστημονικώς αποδεκτά ατμοσφαιρικά μοντέλα ως προς την ικανότητα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε πέντε περιοχές διαφορετικών κλιματικών χαρακτηριστικών, στο Λαμόντ (Lamont) της Οκλαχόμα, στο Μπόντβιλ (Bondville) του Ιλινόις, στο Γκόλντεν του Κολοράντο, στο ορεινό παρατηρητήριο Μάουνα Λόα στη Χαβάη και στο Ηλιακό Χωριό στην περιοχή Ναζντ (Najd) της Σαουδικής Αραβίας. Το μοντέλο MRM, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, κατατάχθηκε στην 7η θέση, επιβεβαιώνοντας την ικανότητά του να αναπαράγει με καλή ακρίβεια τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας.

3.3 Το μοντέλο MRM

Το μοντέλο MRM βασίζεται στο μοντέλο των Bird & Hulstrom (1980) και Bird & Hulstrom (1981). Για την εκτίμηση της ολικής και διάχυτης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας, το μοντέλο λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου τυπικές μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως είναι η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία και η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του εδάφους καθώς επίσης και η διάρκεια ηλιοφάνειας. Στους υπολογισμούς εμπεριέχει όλες τις βασικές διεργασίες απορρόφησης και σκέδασης της εισερχόμενης ακτινοβολίας από τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της έντασης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε χρονικό βήμα, το οποίο εξαρτάται αποκλειστικά από το χρονικό βήμα των δεδομένων εισόδου που χρησιμοποιούνται. Οι υπολογισμοί των αστρονομικών παραμέτρων, που χρησιμοποιούνται στο MRM, για τον καθορισμό της τροχιάς του ήλιου στον ουράνιο θόλο (π.χ. ηλιακό ύψος, ωριαία γωνία κ.λπ.), πραγματοποιούνται από τον ενσωματωμένο σε αυτό κώδικα SUNAE (Walraven 1978) όπως έχει τροποποιηθεί από τους Wilkinson (1981), Muir (1983), Kambezidis & Papanikolaou (1990) και Kambezidis & Tsangrassoulis (1993). Στη συνέχεια, περιγράφονται οι βασικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο και οδηγούν στον υπολογισμό της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας.

3.3.1 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού

Η άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια στη Γη, σε συνθήκες καθαρού ουρανού, ισούται με την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας μειωμένη λόγω της απορρόφησης και της σκέδασης που υφίσταται από τα διάφορα συστατικά που αποτελούν την ατμόσφαιρα. Επομένως, η άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, I_b, που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια στη Γη ανά μονάδα επιφάνειας (W/m^2), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_b = I_{ex} \cdot sina \cdot T_a \cdot T_r \cdot T_{o_3} \cdot T_{H_2O} \cdot T_{mg} \qquad (3.1)$$

όπου: I_{ex}, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια οποιαδήποτε ημέρα του έτους (Σχήμα 3.1). Όπως διαπι-

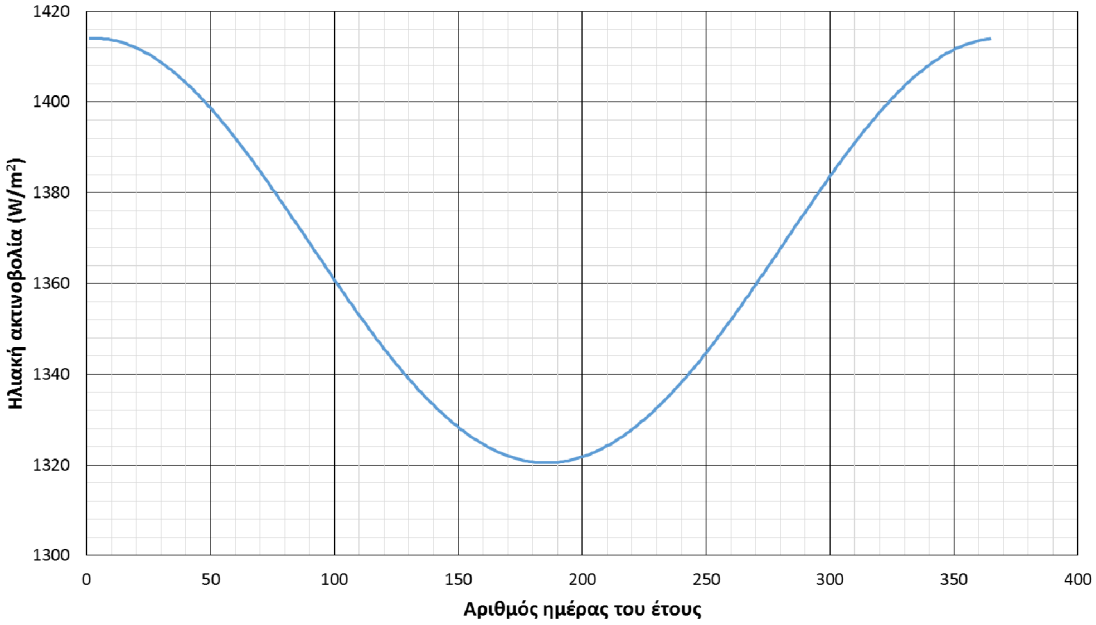
στώνεται από το Σχήμα 3.1, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας παρουσιάζει υψηλότερες τιμές την περίοδο όπου το βόρειο ημισφαίριο του πλανήτη διανύει το χειμώνα και αντίστοιχα χαμηλότερες τιμές το καλοκαίρι, καθώς το χειμώνα η Γη βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από τον ήλιο από ότι το καλοκαίρι. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας υπολογίζεται ως (Spencer 1971, Duffie & Beckman 1980):

$$I_{ex} = I_o \cdot 1{,}00011 + 0{,}034221 \cdot cosD + 0{,}00128 \cdot sinD + 0{,}000719 \cdot cos2D + 0{,}000077 \cdot sin2D \quad (3.2)$$

όπου: I_o, η ηλιακή σταθερά, ίση με 1366,1 W/m^2, η οποία αποτελεί την πλέον σύγχρονη εκτίμηση (Gueymard 2004).
και D, η ημερήσια γωνία, σε rad, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{2\pi(DN - 1)}{365} \quad (3.3)$$

όπου: DN, ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους (γνωστή και ως Ιουλιανή ημέρα). Λαμβάνει τιμές από 1 (1η Ιανουαρίου) μέχρι 365 (31η Δεκεμβρίου), θεωρώντας ότι ο Φεβρουάριος έχει πάντα 28 ημέρες.
a, η γωνία του ηλιακού ύψους σε rad και
T_a, T_r, T_{o_3}, T_{H_2O}, T_{mg}, οι διαπερατότητες της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης από ατμοσφαιρικά αερολύματα, τη σκέδαση Rayleigh, απορρόφηση από το όζον, τους υδρατμούς και τα ομοιόμορφα κατανεμημένα αέρια, αντίστοιχα. Οι συντελεστές διαπερατότητας περιγράφονται στην Ενότητα 3.3.3.



Σχήμα** 3.1: **Ενδοετήσια μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια στο όριο της γήινης ατμόσφαιρας

Αντίστοιχα, η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, I_d, που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης ηλιακής

ακτινοβολίας, η οποία σκεδάζεται αρχικά από τα μόρια της ατμόσφαιρας και τα σωματίδια των αερολυμάτων, και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προέρχεται από πολλαπλή ανάκλαση (Psiloglou & Kambezidis 2007, Atwater & Brown 1974), δηλαδή:

$$I_d = I_{ds} + I_{dm} \tag{3.4}$$

όπου: I_{ds}, η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία που οφείλεται στη σκέδαση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από τα μόρια της ατμόσφαιρας, που υπολογίζεται ως:

$$I_{ds} = I_{ex} \cdot sina \cdot T_{o_3} \cdot T_{H_2O} \cdot T_{mg} \cdot T_{aa} \cdot \frac{1 - T_{as} \cdot T_r}{2} \tag{3.5}$$

όπου: η ποσότητα $\left(\frac{I_{ex}}{2} \cdot sina \cdot T_{o_3} \cdot T_{H_2O} \cdot T_{mg} \cdot T_{aa}\right)$ αφορά την ηλιακή ακτινοβολία μετά την απορρόφηση από τα ατμοσφαιρικά αέρια και τα αερολύματα και η ποσότητα $\left(\frac{I_{ex}}{2} \cdot sina \cdot T_{o_3} \cdot T_w \cdot T_{mg} \cdot T_{aa} \cdot T_{as} \cdot T_r\right)$ εκφράζει το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που συμπεριλαμβάνει και τη σκέδαση από τα μόρια της ατμόσφαιρας (σκέδαση Rayleigh) και από τα σωματίδια των αερολυμάτων (σκέδαση Mie), με κατεύθυνση προς την επιφάνεια της Γης. Η διαφορά των δύο όρων αναφέρεται στην ενέργεια που απομένει από τη σκέδαση αποκλειστικά της ηλιακής ακτινοβολίας από τα συστατικά της ατμόσφαιρας. Η ποσότητα αυτή θεωρείται ότι είναι το 50% της ολικά σκεδαζόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς το υπόλοιπο 50% κατευθύνεται προς το διάστημα.

I_{dm}, το τμήμα της διάχυτης ακτινοβολίας το οποίο οφείλεται στην πολλαπλή ανάκλαση και σκέδαση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (I_b και I_{ds}) μεταξύ του εδάφους και των ατμοσφαιρικών συστατικών· υπολογίζεται από τη σχέση (Atwater & Brown 1974):

$$I_{dm} = (I_b + I_{ds}) \cdot \frac{\rho_g}{1 - \rho_g \cdot \rho_\alpha} \tag{3.6}$$

όπου: ρ_g, η λευκαύγεια (albedo) του εδάφους, που ποικίλει ανάλογα με το είδος της ανακλαστικής επιφάνειας. Χαρακτηριστικά είδη επιφάνειας εδάφους δίνονται από τους Calafell & Hunnt (1977), ενώ συνήθως στους υπολογισμούς λαμβάνεται ίση με 0,2.

ρ_α, είναι η λευκαύγεια της ατμόσφαιρας, που αποτελεί το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που επιστρέφει πίσω στο διάστημα, μετά από την ανάκλασή της στο έδαφος, τα νέφη ή τα μόρια της ατμόσφαιρας, σε σχέση με τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γη. Για συνθήκες καθαρού ουρανού μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$\rho_\alpha = \rho_r + \rho_{a\alpha} = 0{,}0685 + 0{,}16 \cdot \left(1 - T_{a,1{,}66}\right) \tag{3.7}$$

όπου: ρ_r, η λευκαύγεια της ατμόσφαιρας λόγω μοριακής σκέδασης (σκέδαση Rayleigh), η οποία λαμβάνει την τιμή 0,0685, όπως προτάθηκε από τους Lacis & Hansen (1974),

και $\rho_{a\alpha}$ είναι η λευκαύγεια λόγω σκέδασης από τα αερολύματα της ατμόσφαιρας, όπως προτάθηκε από τους Bird & Hulstrom (1980) και Bird &

Hulstrom (1981), η οποία υπολογίζεται βάσει της διαπερατότητας των αερολυμάτων της ατμόσφαιρας, $T_{a,1,66}$, λόγω σκέδασης και απορρόφησης, υπολογισμένη όμως για οπτική αέρια μάζα m = 1,66 που αντιστοιχεί σε ύψος ηλίου $\alpha = 37^{o}$.

Τέλος, η ολική ηλιακή ακτινοβολία, I, που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, δίνεται από το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας, δηλαδή:

$$I = I_b + I_d \tag{3.8}$$

3.3.2 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού

Τα νέφη αποτελούν σημαντικό παράγοντα σκέδασης και απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά, που καθορίζουν το ποσοστό μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι το είδος των νεφών, το σχήμα, το πάχος και η σύστασή τους. Τα νέφη χαμηλού ύψους, τα οποία αποτελούνται κυρίως από υδροσταγόνες, έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με τα νέφη μεγάλου ύψους, τα οποία αποτελούνται κυρίως από παγοκρυστάλλους, λόγω της διαφοράς πάχους και των ιδιοτήτων απορρόφησης και σκέδασης ανάμεσα στα σωματίδια του νερού και του πάγου.

Το μοντέλο MRM, για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας με την παρουσία νεφών, βασίζεται στη λογική του μοντέλου των Barbaro et al. (1979), κυρίως σε ό,τι αφορά στη μορφή των σχέσεων υπολογισμού της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας νεφοσκεπούς ουρανού.

Ειδικότερα, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία υπό νεφοσκεπή ουρανό, I'_b, δίνεται από τη σχέση:

$$I'_b = I_b \cdot T_c \tag{3.9}$$

όπου: T_c, ο συντελεστής διαπερατότητας των νεφών στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ο οποίος εξαρτάται από το είδος της νεφοκάλυψης και εκφράζεται σε συνάρτηση με τη σχετική ηλιοφάνεια, ως:

$$T_c = k \cdot \frac{SD}{SD_t} \tag{3.10}$$

όπου: k, είναι εμπειρική παράμετρος νέφωσης με τιμή συνήθως ίση με τη μονάδα,
SD, η πραγματική διάρκεια ηλιοφάνειας (σε ώρες) και
SD_t, η μέγιστη (αστρονομική) διάρκεια ηλιοφάνειας, που υπολογίζεται ως η διαφορά του χρόνου δύσης του ηλίου από τον χρόνο ανατολής του (σε ώρες).

Η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας υπό νεφοσκεπή ουρανό, I'_d, υπολογίζεται κατ' αντιστοιχία με τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε συνθήκες καθαρού ουρανού, από τη σχέση:

$$I'_d = I'_{ds} + I'_{dm} \tag{3.11}$$

όπου: I'_{ds}, η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας υπό νεφοσκεπή ουρανό, που οφείλεται στη σκέδαση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από τα μόρια της ατμόσφαιρας και υπολογίζεται ως:

$$I'_{ds} = I_{ds} \cdot T_c + K \cdot (1 - T_c) \cdot (I_b + I_{ds}) \tag{3.12}$$

όπου: K, εμπειρική σταθερά, που δίνεται από τους Berland & Danilchenko (1961), για διάφορα γεωγραφικά πλάτη, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.Ι.

Πίνακας** 3.Ι: **Τυπικές τιμές της εμπειρικής παραμέτρου** K **για διάφορα γεωγραφικά πλάτη

Γεωγραφικό πλάτος φ	**K**
30°	0,32
35°	0,32
40°	0,33
45°	0,34

I'_{dm}, η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, υπό νεφοσκεπή ουρανό, που προέρχεται από την πολλαπλή ανάκλαση μεταξύ του εδάφους και των μορίων της ατμόσφαιρας και υπολογίζεται με την ίδια λογική όπως και στην περίπτωση του ανέφελου ουρανού, δηλαδή:

$$I'_{dm} = (I'_b + I'_{ds}) \cdot \frac{\rho_g \cdot \rho'_a}{1 - \rho_g \cdot \rho'_a} \tag{3.13}$$

όπου: ρ'_a, η λευκαύγεια του νεφοσκεπούς ουρανού, η οποία υπολογίζεται με βάση τον υπολογισμό της λευκαύγειας του ανέφελου ουρανού, αλλά με την προσθήκη ενός επιπλέον όρου που αναπαριστά τη λευκαύγεια των νεφών:

$$\rho'_a = \rho_r + \rho_{a\alpha} + \rho_c \tag{3.14}$$

όπου: ρ_c, είναι ο συντελεστής λευκαύγειας των νεφών που υπολογίζεται ως:

$$\rho_c = \nu \cdot \left(1 - \frac{SD}{SD_t}\right) \tag{3.15}$$

όπου: ν, είναι παράμετρος που λαμβάνει τιμές από 0,3 έως 0,6.

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία, I', που δέχεται ένα οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, υπό νεφοσκεπή ουρανό, δίνεται από το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας, δηλαδή:

$$I' = I'_b + I'_d \tag{3.16}$$

3.3.3 Υπολογισμοί της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας

Η συνάρτηση διαπερατότητας της ατμόσφαιρας, T_i, λόγω απορρόφησης από τα μόρια των διαφόρων συστατικών της (υδρατμοί, O_3, CO_2, CO, N_2O, CH_4 και O_2), δίνεται από τη γενική μορφή της σχέσης (Gueymard 1989):

$$T_i = 1 - \frac{A \cdot m \cdot l_i}{(1 + B \cdot m \cdot l_i)^C + D \cdot m \cdot l_i} \tag{3.17}$$

όπου: A, B, C, D, είναι οι συντελεστές που καθορίζονται από την εκάστοτε διαδικασία εξασθένησης, οι τιμές των οποίων δίνονται στον Πίνακα 3.ΙΙ,

m, η οπτική αέρια μάζα, η οποία σε κανονικές συνθήκες πίεσης, υπολογίζεται σύμφωνα με τους Kasten F. & Young A. T. (1989) ως:

$$m = [sina + 0{,}50572 \cdot (a + 6{,}07995)^{-1{,}6364}]^{-1} \quad (3.18)$$

Η σχέση 3.18 είναι ακριβής όταν υπολογίζεται για γωνίες ύψους ηλίου α>15° με σφάλμα υπολογισμού μικρότερο από 0,5%.

Το l_i συμβολίζει την ολική συγκέντρωση των μορίων του εκάστοτε συστατικού της ατμόσφαιρας σε μια κατακόρυφη ατμοσφαιρική στήλη, με μοναδιαία βάση, που ξεκινά στην επιφάνεια της Γης και εκτείνεται στα όρια της ατμόσφαιρας. Στην περίπτωση των υδρατμών και του όζοντος, η αντίστοιχη ποσότητα μεταβάλλεται και παριστάνεται με l_{H_2O} (σε cm) και l_{o_3} [5](σε $atm-cm$), αντίστοιχα. Για τα υπόλοιπα αέρια της ατμόσφαιρας, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.II, η συγκέντρωσή τους σε κατακόρυφη ατμοσφαιρική στήλη, l_i (σε $atm-cm$), είναι σταθερή και ομοιόμορφα κατανεμημένη παγκοσμίως όπως δίνεται στον Πίνακα 3.III (Pierluissi & Tsai 1987, Psiloglou et al. 1995).

Πίνακας** 3.II: **Τιμές των συντελεστών** A, B, C **και** D **της γενικής σχέσης διαπερατότητας της ατμόσφαιρας για τα μόρια των διαφόρων συστατικών της

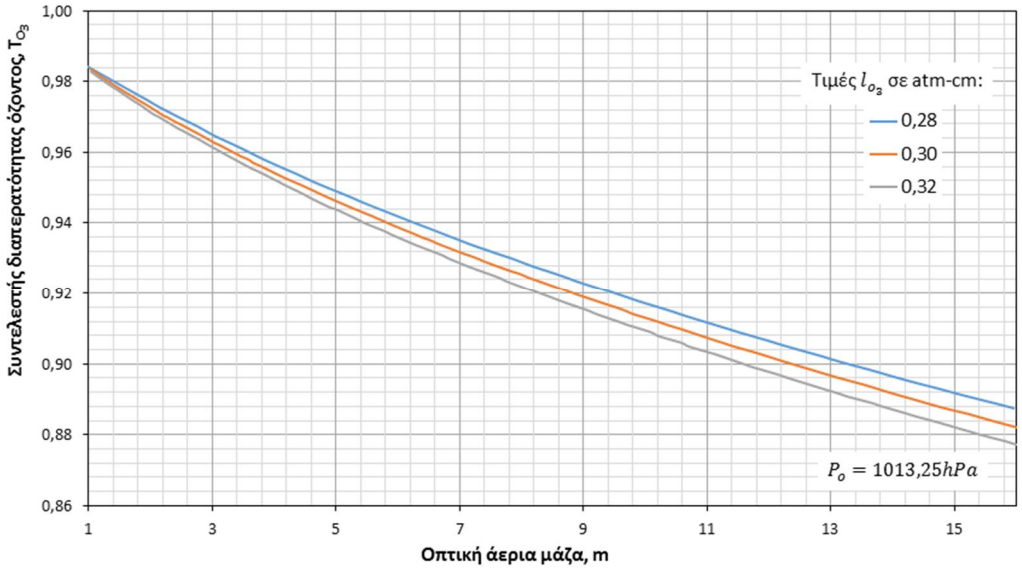
Συστατικό της ατμόσφαιρας	*A*	*B*	*C*	*D*
Υδρατμοί	3,014	119,3	0,644	5,814
O_3	0,2554	6107,26	0,204	0,471
CO_2	0,0721	377,89	0,5855	3,1709
CO	0,0062	243,67	0,4246	1,7222
N_2O	0,0326	107,413	0,5501	0,9093
CH_4	0,0192	166,095	0,4221	0,7186
O_2	0,0003	476,934	0,4892	0,1261

Πίνακας** 3.III: **Τιμές ολικής συγκέντρωσης μορίων, l_i, του εκάστοτε συστατικού της ατμόσφαιρας σε κατακόρυφη ατμοσφαιρική στήλη

Συστατικό της ατμόσφαιρας	CO_2	CO	N_2O	CH_4	O_2
$\boldsymbol{l_i\ (atm-cm)}$	350	0,075	0,28	1,6	$2{,}095 \cdot 10^5$

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η επίδραση της ολικής συγκέντρωσης των μορίων του όζοντος της ατμόσφαιρας, l_{o_3}, στην ατμόσφαιρα, στη διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, T_{O_3}.

[5] Η μονάδα atm-cm χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συνολικής ποσότητας ενός αερίου που περιέχεται στην ατμοσφαιρική στήλη (από το έδαφος μέχρι και το όριο της ατμόσφαιρας). Για παράδειγμα, μια στήλη 10 atm-cm υδρατμών σημαίνει ότι όλα τα γραμμομόρια των υδρατμών, που περιέχονται σε μια στήλη ατμοσφαιρικού αέρα σε 0°C και πίεση 1atm, θα έχουν ύψος 10cm.



***Σχήμα** 3.2: **Μεταβολή της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω της ύπαρξης των μορίων του όζοντος, για διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού όζοντος** (*Psiloglou & Kambezidis 2007*)*

Για τον υπολογισμό της συνολικής ποσότητας υδρατμών, που περιέχονται σε κατακόρυφη στήλη, l_w, με μοναδιαία βάση, που εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης μέχρι το άνω όριο της ατμόσφαιρας (περίπου 100 km), γνωστό ως "υετήσιμο ύδωρ", χρησιμοποιείται η σχέση που προτάθηκε από τον Leckner (1978):

$$l_w = 0{,}493 \cdot \frac{e_s}{T} \cdot \frac{RH}{100} \tag{3.19}$$

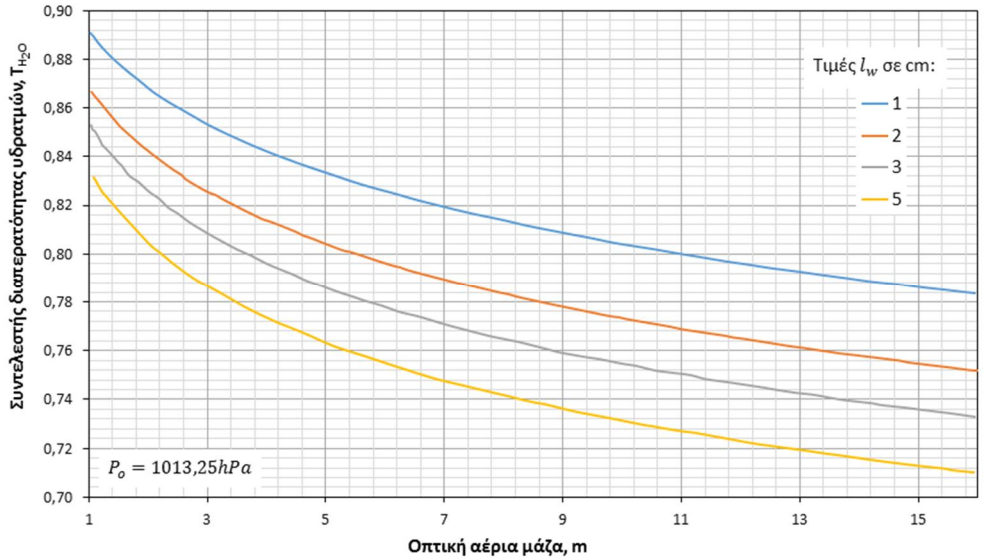
όπου: T, η θερμοκρασία του αέρα (K) στο υψόμετρο του σταθμού,

e_s, η πίεση των κορεσμένων υδρατμών (σε hPa) που δίνεται από τη σχέση (Gueymard 1993):

$$e_s = exp(22{,}329699 - 49{,}140396 \cdot \frac{T^{-1}}{100} - 10{,}921853 \cdot \frac{T^{-2}}{100} - 0{,}39015156 \cdot \frac{T}{100}) \tag{3.20}$$

RH, η σχετική υγρασία (%) στη θέση του σταθμού.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η επίδραση της συγκέντρωσης του υετήσιμου ύδατος της ατμόσφαιρας, l_{H_2O}, στη διαπερατότητα της ατμόσφαιρας από την ηλιακή ακτινοβολία, T_{H_2O}.



***Σχήμα** 3.3: **Μεταβολή της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω της ύπαρξης των υδρατμών, για διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης υετήσιμου ύδατος** (*Psiloglou & Kambezidis 2007*)*

Η συνολική διαπερατότητα των ομοιόμορφα κατανεμημένων αερίων, T_{mg}, υπολογίζεται από το γινόμενο των επιμέρους διαπερατοτήτων κάθε αερίου, αφού ληφθεί υπόψη η συνολική συγκέντρωση κάθε αερίου στην ατμόσφαιρα:

$$T_{mg} = T_{CO_2} \cdot T_{CO} \cdot T_{N_2O} \cdot T_{CH_4} \cdot T_{O_2} \tag{3.21}$$

όπου: $T_{CO_2}, T_{CO}, T_{N_2O}, T_{CH_4}, T_{O_2}$, οι επιμέρους διαπερατότητες οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση (3.17), με τη χρήση των κατάλληλων συντελεστών του Πίνακα 3.II.

Η συνάρτηση διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω της σκέδασης από τα μόρια των αερίων της ατμόσφαιρας, γνωστή και ως σκέδαση Rayleigh, δίνεται από τη σχέση (Gueymard 1989):

$$T_r = exp[-0{,}1128 \cdot m'^{0{,}8346} \cdot (0{,}9341 - m'^{0{,}9868} + 0{,}9391 \cdot m')] \tag{3.22}$$

όπου: m', η διορθωμένη ως προς την πίεση οπτική αέρια μάζα, η οποία εκτιμάται ως:

$$m' = m \cdot \frac{P}{P_o} \tag{3.23}$$

όπου: P, η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης (σε hPa) στο υψόμετρο του σταθμού και P_o, η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης στη μέση στάθμη της θάλασσας (1013,25 hPa).

Η έλλειψη αναλυτικών μετρήσεων συγκέντρωσης και διακύμανσης των αερολυμάτων, έχει οδηγήσει τους ερευνητές στην ανάπτυξη μοντέλων εκτίμησης των αντίστοιχων τιμών. Στο μοντέλο MRM χρησιμοποιείται η σχέση διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω σκέδασης από τα μόρια των αερολυμάτων, γνωστή και ως σκέδαση Mie, όπως αυτή προτάθηκε από τους Yang et al. (2001):

$$T_a = exp\{-m \cdot \beta \cdot [0{,}6777 + 0{,}1464 \cdot m \cdot \beta - 0{,}00626 \cdot (m \cdot \beta)^2]^{-1{,}3}\} \tag{3.24}$$

όπου: β, η παράμετρος θόλωσης Ångström (Ångström's turbidity parameter), η οποία λαμβάνει τιμές από 0,05 έως 0,4 για μικρή ή μεγάλη, αντίστοιχα, συγκέντρωση αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα. Ενδεικτικές τιμές της παραμέτρου θόλωσης του Ångström για διάφορες συγκεντρώσεις αερολυμάτων δίνονται από τον Iqbal (1983).

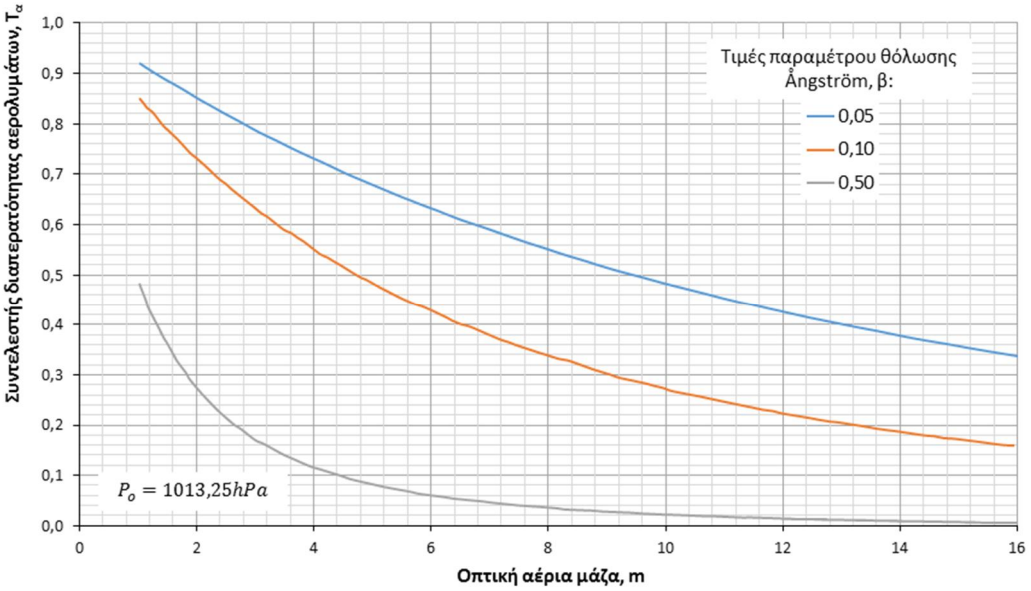
Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας της ατμόσφαιρας από την ηλιακή ακτινοβολία, T_a, για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου του Ångström, β, και διαφορετικές συγκεντρώσεις αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα.

Η συνάρτηση διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης και μόνο των αερολυμάτων, T_{aa}, δίνεται από τη σχέση (Bird & Hulstrom 1980, Bird & Hulstrom 1981):

$$T_{aa} = 1 - 0{,}6 \cdot (1 - m + m^{1{,}06}) \cdot (1 - T_a) \tag{3.25}$$

Τέλος, η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας μόνο λόγω σκέδασης των αερολυμάτων, T_{as}, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{as} = \frac{T_a}{T_{aa}} \tag{3.26}$$

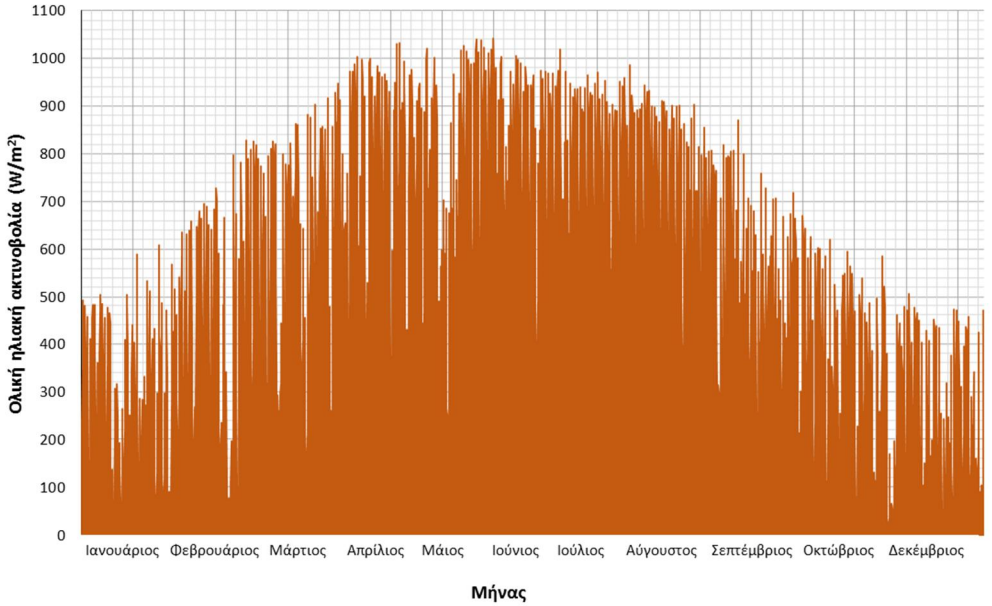


***Σχήμα** 3.4: **Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας της ατμόσφαιρας λόγω της ύπαρξης αερολυμάτων**, **για διαφορετικές τιμές του συντελεστή θόλωσης** Ångström (*Psiloglou & Kambezidis 2007*)*

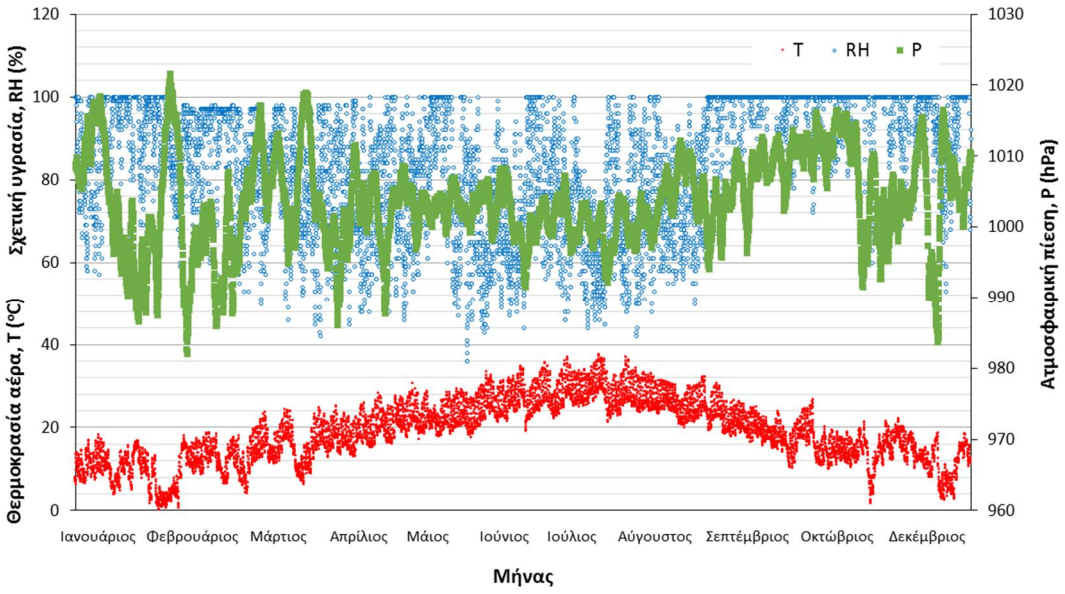
3.4 Αξιολόγηση του μοντέλου MRM

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο MRM έχει αξιολογηθεί από ερευνητές, επιβεβαιώνοντας την ικανότητά του να υπολογίζει με ακρίβεια την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα τόπο. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, έγινε προσπάθεια επαλήθευσης των υπολογιζόμενων από το μοντέλο τιμών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, από τον ακτινομετρικό-μετεωρολογικό σταθμό του Ινστιτούτου Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ), που βρίσκεται στο Θησείο (37,972° Β, 23,717° Α).

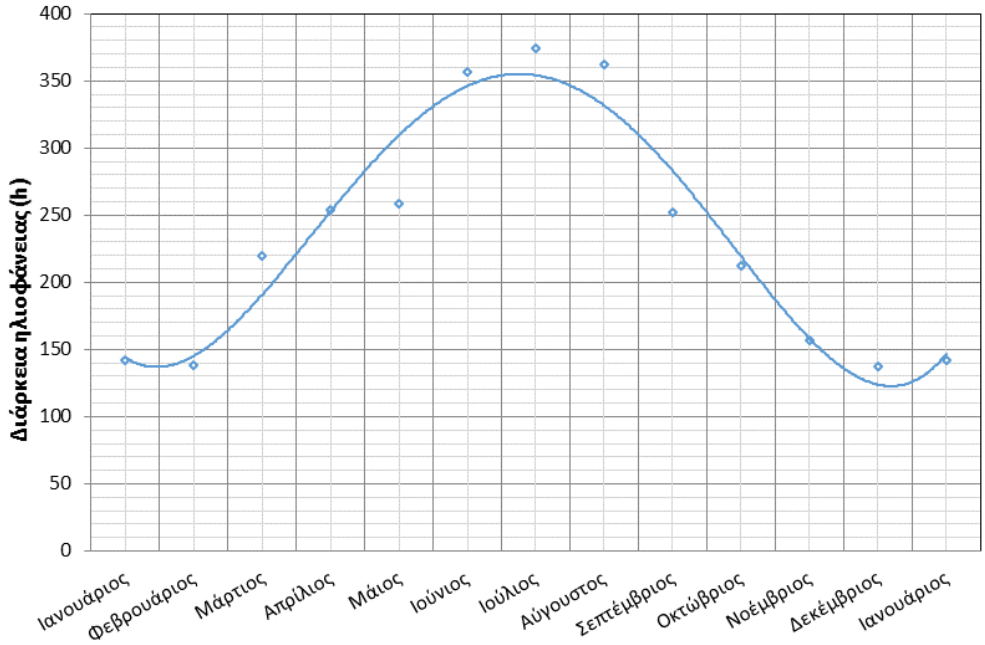
Η διαθέσιμη βάση δεδομένων αποτελείται από μέσες ωριαίες μετρήσεις ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στη γήινη επιφάνεια, για το έτος 2005 (Σχήμα 3.5). Επίσης, για την ίδια χρονική περίοδο, χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από τον ίδιο σταθμό, που περιλαμβάνουν μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης στο ύψος του σταθμού, τα οποία και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή του μοντέλου MRM (Σχήμα 3.6). Τέλος, για την ίδια χρονική περίοδο, συλλέχθηκαν από το σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο ωριαίες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας, από τις οποίες, με ημερήσια αθροίσματα, προέκυψαν οι αντίστοιχες μηνιαίες τιμές της (Σχήμα 3.7).



***Σχήμα** 3.2: **Ωριαίες τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από το σταθμού του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος** 2005*



***Σχήμα** 3.3: **Ωριαίες τιμές μετεωρολογικών παραμέτρων από το σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος** 2005*



Σχήμα** 3.4: **Μηνιαίες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας από το σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος** 2005. **Η καμπύλη αποτελεί τη γραμμική συνάρτηση** 4ου **βαθμού που περιγράφει την ενδοετήσια μεταβολή

Το έτος 2005, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση του μοντέλου MRM, δεν παρουσιάζει ακραίες μεταβολές των μετεωρολογικών παραμέτρων και αντιπροσωπεύει τον ήπιο μεσογειακό χαρακτήρα του κλίματος της περιοχής της Αθήνας. Οι μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας αέρα κυμάνθηκαν από 2,6 έως 37,8 ^{o}C, με την ελάχιστη θερμοκρασία να καταγράφεται στις 6 Φεβρουαρίου και τη μέγιστη στις 2 και 3 Αυγούστου. Η μέση ετήσια θερμοκρασία ήταν, σύμφωνα με τις μετρήσεις, 18,6 ^{o}C, όταν η αντίστοιχη κλιματική τιμή της περιόδου 1981-2010 ήταν 18,75 ^{o}C. Αντίστοιχα, η μέση ετήσια τιμή των μετρήσεων της σχετικής υγρασίας ήταν ίση με 65,6%, τιμή μικρότερη κατά 3,6% από την αντίστοιχη μέση ετήσια τιμή της σχετικής υγρασίας της κλιματικής περιόδου 1961-1990 που ήταν 62%. Οι τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης παρουσιάζουν μέση ετήσια τιμή 1003,8 hPa, που είναι πολύ κοντά στη μέση ετήσια τιμή της κλιματικής περιόδου 1961-1990 με 1002,4 hPa (ΝΟΑ 2002). Συνολικά, το έτος 2005, στο σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ, καταγράφηκαν 2864 ώρες ηλιοφάνειας που αντιστοιχεί στο 1/3 των συνολικών ωρών ενός έτους. Η τιμή αυτή, ελάχιστα διαφέρει από την κλιματική τιμή της περιόδου 1961-1990 που ήταν 2884 ώρες ΝΟΑ (2002). Τέλος, σύμφωνα με τις τιμές της μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, η αναμενόμενη ετήσια ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε επιφάνεια με οριζόντια κλίση στο σημείο όπου βρίσκεται ο σταθμός, είναι ίση με 1695 kWh/m^2. Ο μήνας με τη μικρότερη διάρκεια ηλιοφάνειας ήταν ο Δεκέμβριος (137 h), κατά τον οποίο η μηνιαία ηλιακή ενέργεια εμφάνισε τη μικρότερη τιμή (58 kWh/m^2) και ο μήνας με τη μεγαλύτερη διάρκεια ηλιοφάνειας ήταν ο Ιούλιος (374 h) με μηνιαία ηλιακή ενέργεια ίση προς 229 kWh/m^2.

Αρχικά, τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα, πριν χρησιμοποιηθούν, υποβλήθηκαν σε ποιοτικό έλεγχο για την απομάκρυνση τυχόν ακραίων τιμών. Πραγματοποιήθηκε έλεγχος επιτρεπομένων ορίων μεταβολής κάθε παραμέτρου, καθώς επίσης και έλεγχος ορίων ωριαίας μεταβολής. Όσον αφορά στις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, για τον ποιοτικό έλεγχο των τιμών, υιοθετήθηκαν τα κριτήρια ποιοτικού ελέγχου τα οποία προτάθηκαν από την Ομάδα Έρευνας Φωτισμού της Ευρωπαϊκής Κοινότητας (Littlefair et al. 1993) και συμπληρώθηκαν από τους Psiloglou &

Kambezidis (2007). Σύμφωνα με αυτά τα κριτήρια, οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας απορρίπτονται όταν:

1. η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι κατά 10% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο,
2. η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο είναι κατά 20% μεγαλύτερη από την εποχιακά διορθωμένη ηλιακή σταθερά των 1366,1 W/m^2,
3. η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο είναι μεγαλύτερη του 80% της εποχιακά διορθωμένης ηλιακής σταθεράς των 1366,1 W/m^2,
4. η τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο είναι μικρότερη ή ίση των 5 W/m^2, κατώφλι ευαισθησίας των πυρανομέτρων,
5. το ηλιακό ύψος είναι μικρότερο των 5^o, για την εξάλειψη του φαινομένου του συνημιτόνου λόγω της διάθλασης των ηλιακών ακτίνων, κατά την ανατολή και τη δύση του ήλιου,
6. η άμεση ακτινοβολία ($I_b = I - I_d \cdot sina$) που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από την εποχιακά διορθωμένη ηλιακή σταθερά των 1366,1 W/m^2.

Από τον ποιοτικό έλεγχο των τιμών αφαιρέθηκαν 211 τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, των οποίων η απόρριψη οφειλόταν κυρίως στο κριτήριο ελέγχου των 5^o. Συνολικά, ο αριθμός των ωριαίων τιμών, που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση του παρουσιαζόμενου μοντέλου, είναι 8549 ωριαίες τιμές, που αποτελούν σχεδόν το 98% της αρχικής χρονοσειράς μετρήσεων.

Εκτός των μετεωρολογικών παραμέτρων, το μοντέλο MRM χρησιμοποιεί, ως δεδομένα εισόδου, ωριαίες τιμές της συγκέντρωσης του όζοντος σε κατακόρυφη στήλη που εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης μέχρι το άνω όριο της ατμόσφαιρας , σε μονάδες Dobson [6](DU). Όταν οι τιμές συγκέντρωσης του όζοντος δεν είναι διαθέσιμες, τότε το μοντέλο MRM υπολογίζει τις τιμές της ημερήσιας στήλης του όζοντος από τις σχέσεις που προτείνει ο Van Heuklon (1979). Στον Πίνακα 3.IV παρουσιάζονται τα δεδομένα τα οποία απαιτούνται από το MRM, εκτός των μετεωρολογικών παραμέτρων.

***Πίνακας** 3.IV: **Πρόσθετα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται από το μοντέλο** MRM*

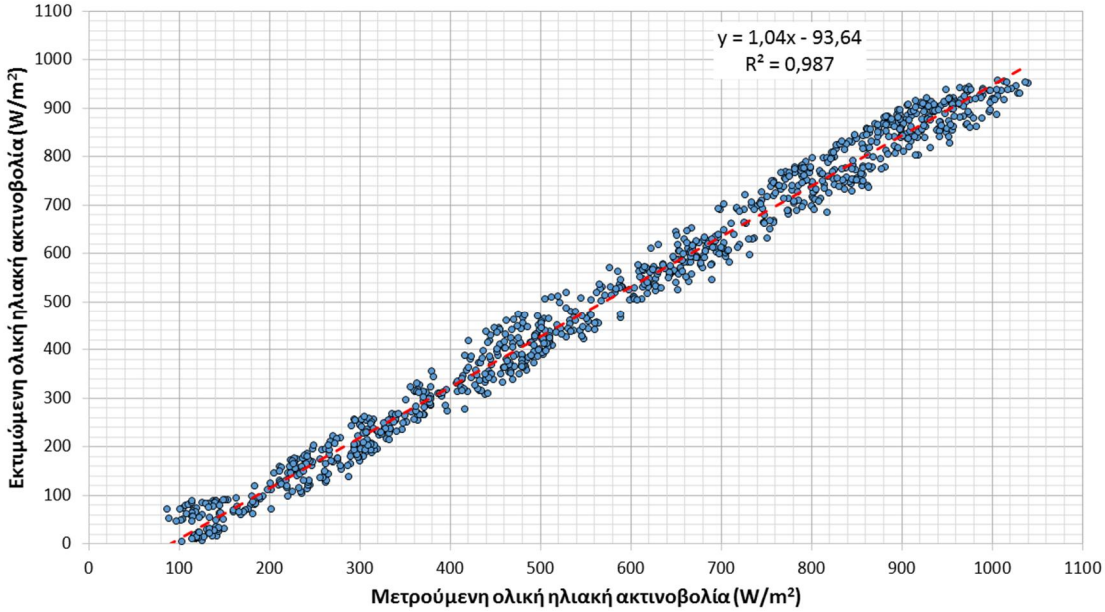
Παράμετρος εισόδου	**Τιμή**
Γεωγραφικό πλάτος (μοίρες Βόρια (+))	+37,972
Γεωγραφικό μήκος (μοίρες Ανατολικά (-))	-23,717
Σταθερός μεσημβρινός (μοίρες Ανατολικά (-))	+30
Ζώνη ώρας (Ανατολικά (-))	-2
Διάρκεια ηλιοφάνειας ((1) ημερήσιες τιμές, (2) ωριαίες τιμές)	1
Συγκέντρωση CO_2 (προεπιλεγμένη τιμή 350 ppm)	350
Συντελεστής θόλωσης του Ångström (προεπιλεγμένη τιμή 0,05)	0,05
Συντελεστής λευκαύγειας της ατμόσφαιρας (προεπιλεγμένη τιμή 0,9)	0,9
Παράμετρος K (προεπιλεγμένη τιμή 1)	1
Συντελεστής λευκαύγειας του εδάφους (προεπιλεγμένη τιμή 0,2)	0,2

Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε ως προς την ικανότητά του να προβλέπει τις τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, υπό συνθήκες ανέφελου και νεφοσκεπούς ουρανού. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά μόνο οι ημέρες με καθαρό ουρανό για τη διαθέσιμη χρονική περίοδο. Μια ημέρα χαρακτηρίστηκε ως ημέρα με καθαρό ουρανό, όταν

[6] Μονάδα μέτρησης της συγκέντρωσης του ολικού όζοντος σε κατακόρυφη στήλη (1 atm-cm = 1 DU x 10^{-3}). Μία μονάδα DU είναι ο αριθμός των μορίων του όζοντος που απαιτούνται για τη δημιουργία στρώματος όζοντος πάχους 0,01 mm, σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία 0 ^{o}C.

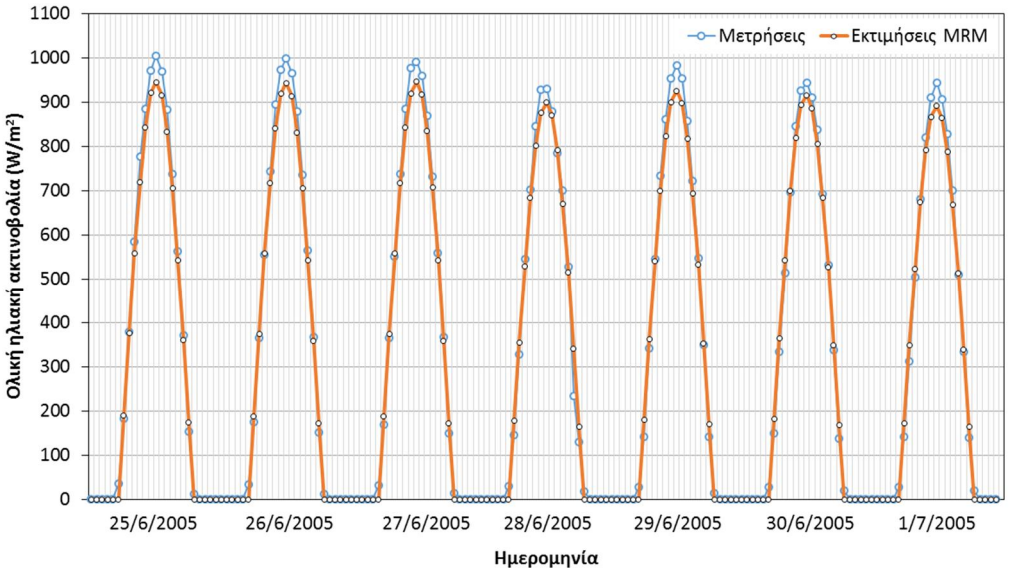
η τιμή της σχετικής ηλιοφάνειας ήταν μεγαλύτερη του 90%. Ο συνολικός αριθμός δεδομένων ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, για τις ημέρες χωρίς νέφωση, ήταν συνολικά 2208.

Από τα αποτελέσματα σύγκρισης των υπολογιζόμενων από το μοντέλο τιμών ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και των μετρήσεων του σταθμού του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ, επιβεβαιώνεται η ικανότητα του μοντέλου να υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια τιμές ηλιακής ακτινοβολίας υπό συνθήκες ανέφελου αλλά και νεφοσκεπούς ουρανού. Ειδικότερα, κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του μοντέλου MRM σε συνθήκες καθαρού ουρανού (Σχήμα 3.8) προκύπτει συντελεστής προσδιορισμού R^2 ίσος με 0,987, τιμή ιδιαίτερα υψηλή. Για τις ίδιες συνθήκες, το μέσο σφάλμα προκατάληψης-εμμονής είναι ίσο με -69,77 W/m^2 και ο δείκτης συμφωνίας ίσος με 0,98. Αξιολογώντας αυτά τα αριθμητικά αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου, ερμηνεύουν το 99,4% των ωριαίων μετρήσεων της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την αριθμητική τιμή του δείκτη συμφωνίας (IA = 0,98) που δηλώνει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ μετρήσεων και υπολογιζόμενων από το μοντέλο τιμών ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Ενδεχομένως, τα αποτελέσματα των δεικτών αξιολόγησης να ήταν ακόμη καλύτερα, αν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου εμφάνιζαν μικρότερη υποεκτίμηση των τιμών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (MBE = -69,77 W/m^2).

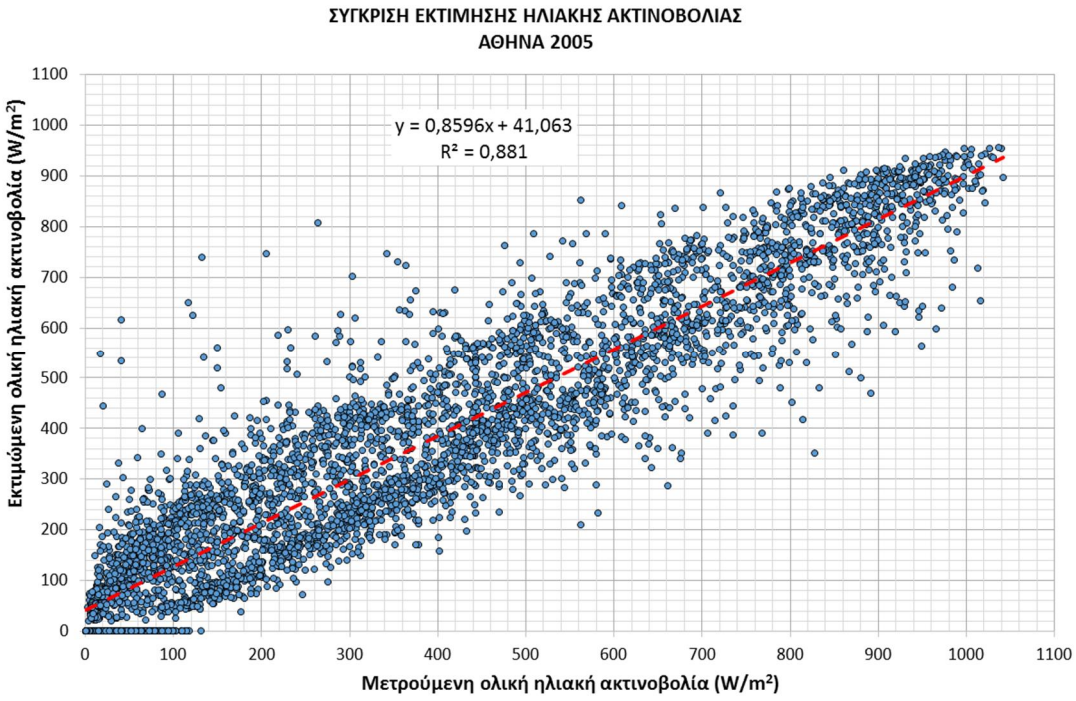


Σχήμα** 3.5: **Σύγκριση υπολογιζόμενων από το μοντέλο** MRM **τιμών ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με μετρήσεις από το σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο το έτος** 2005 **σε συνθήκες καθαρού ουρανού

Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου επιβεβαιώνεται και από τον έλεγχο της ενδοημερήσιας μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας για μια εβδομάδα του θέρους του 2005, ήτοι την περίοδο 25/6/2005 έως 1/7/2005, όπου επικρατούσαν συνθήκες καθαρού ουρανού (Σχήμα 3.9). Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, οι υπολογιζόμενες τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM βρίσκονται πολύ κοντά στις αντίστοιχες πραγματικές, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις οι διαφορές ελαχιστοποιούνται.



***Σχήμα** 3.6: **Σύγκριση ενδοημερήσιας μεταβολής ολικής ηλιακής ακτινοβολίας**, **υπολογιζόμενης από το μοντέλο** MRM, **με τις μετρήσεις από το σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο**, **για την περίοδο** 25/6/2005-1/7/2005*

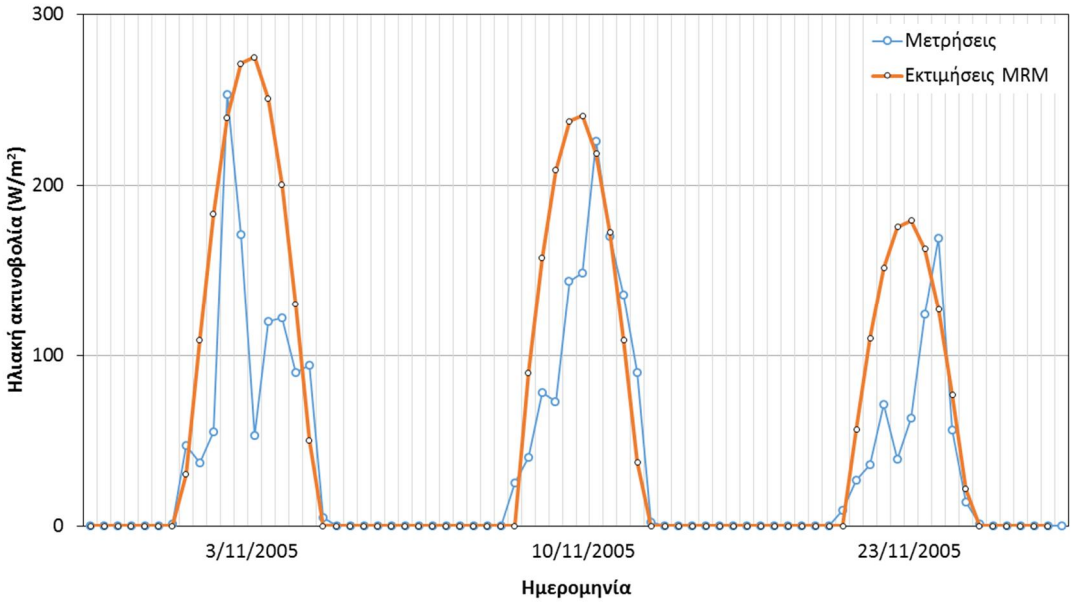


***Σχήμα** 3.7: **Σύγκριση υπολογιζόμενων από το μοντέλο** MRM **τιμών ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με τις αντίστοιχες τιμές από τον σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος** 2005*

Κατά τη σύγκριση των τιμών ηλιακής ακτινοβολίας, όπως υπολογίζονται από το μοντέλο MRM, με τις πραγματικές, στο σύνολο του έτους (σε συνθήκες καθαρού και νεφοσκεπούς ουρανού) προκύπτει επίσης υψηλή συσχέτιση (Σχήμα 3.10). Ωστόσο, όπως ήταν αναμενόμενο, η συσχέτιση είναι μικρότερη στην περίπτωση νεφοσκεπούς ουρανού. Στο σύνολο των τιμών, η τιμή του R^2 είναι ίση με 0,88, το μέσο σφάλμα προκατάληψης 9,26 W/m^2 και ο δείκτης συμφωνίας 0,97. Εξετάζοντας

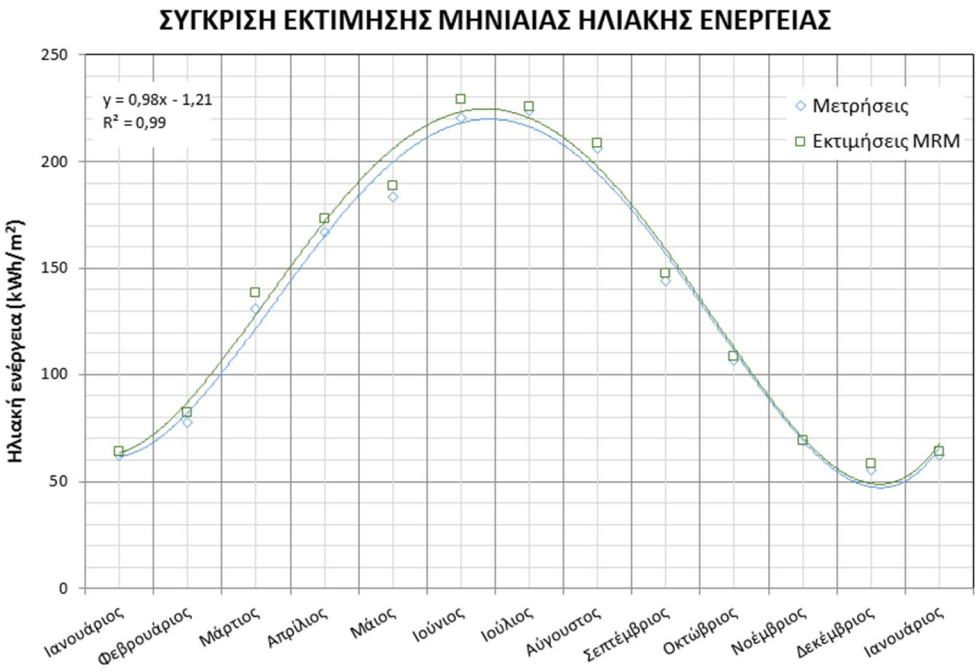
τις τιμές του MBE σε συνθήκες καθαρού ουρανού σε σχέση με την τιμή του στο σύνολο των ημερών, φαίνεται ότι η τιμή του, στο σύνολο των τιμών, είναι κατ' απόλυτη τιμή μικρότερη. Η βελτίωση αυτή δείχνει ότι, ενώ το μοντέλο σε συνθήκες καθαρού ουρανού υποεκτιμάει τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας κατά 69,77 W/m^2, σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού τις υπερεκτιμάει κατά μέσο όρο κατά 79,03 W/m^2, με αποτέλεσμα, στο σύνολο των τιμών να προκύπτει υπερεκτίμηση 9,26 W/m^2.

Η υπερεκτίμηση του μοντέλου κατά τις ημέρες μερικής ή πλήρους νεφοκάλυψης, προκύπτει και από την ενδοημερήσια μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας για ημέρες με μερική νέφωση (Σχήμα 3.11). Στο συγκεκριμένο διάγραμμα φαίνεται η αδυναμία του μοντέλου να παρακολουθήσει τις ενδοημερήσιες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας που οφείλονται σε παροδικές νεφώσεις. Όμως, η αδυναμία αυτή είναι απολύτως δικαιολογημένη, καθώς όταν η παράμετρος της διάρκειας ηλιοφάνειας δίνεται σε ημερήσιες τιμές, η πρόβλεψη τυχόν ενδοημερήσιων διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας καθίσταται ανέφικτη.



***Σχήμα** 3.8: **Σύγκριση υπολογιζόμενων από το μοντέλο** MRM **ενδοημερήσιων μεταβολών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με αντίστοιχες μετρήσεις από το σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για τρεις ημέρες του μήνα Νοεμβρίου** 2005*

Τέλος, έχοντας πάντα υπόψη ότι οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας πρόκειται να αξιοποιηθούν σε ενεργειακούς υπολογισμούς, στο Σχήμα 3.12 συγκρίνονται οι μηνιαίες τιμές της που προκύπτουν από τις υπολογιζόμενες ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας του μοντέλου MRM, με τις αντίστοιχες τιμές των μετρήσεων από το σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ. Είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται το χρονικό βήμα σύγκρισης (ωριαίων, μηνιαίων, ετήσιων τιμών) των υπολογιζόμενων τιμών με τις πραγματικές μετρήσεις, τόσο μειώνονται οι μεταξύ τους αποκλίσεις, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την τιμή του R^2 = 0,99. Συμπερασματικά, οι υπολογιζόμενες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα κατά την αξιολόγηση ηλιακών ενεργειακών συστημάτων. Ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται όταν αυτά εξετάζονται σε ετήσια βάση, οπότε οι υπολογιζόμενες τιμές σχεδόν συμπίπτουν με τις αντίστοιχες πραγματικές.



Σχήμα** 3.9: **Σύγκριση της υπολογιζόμενης από το μοντέλο** MRM **ενδοετήσιας μεταβολής της ηλιακής ενέργειας με τις αντίστοιχες τιμές, όπως προκύπτουν από τις μετρήσεις στο σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος** 2005. **Οι καμπύλες αποτελούν τις συναρτήσεις** 4**ου βαθμού που περιγράφουν τις αντίστοιχες ενδοετήσιες μεταβολές

3.5 Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου MRM

Το μοντέλο MRM, εκτός από τις μετεωρολογικές μετρήσεις του τόπου, χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου ωριαίες τιμές της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού όζοντος, καθώς επίσης και τη μέση ετήσια συγκέντρωση CO_2 και το συντελεστή λευκαύγειας του εδάφους, στα οποία οι τιμές ορίζονται είτε από το χρήστη του μοντέλου, είτε χρησιμοποιούνται οι προεπιλεγμένες τιμές του. Όταν δεν είναι διαθέσιμες οι τιμές συγκέντρωσης του όζοντος, τότε το μοντέλο MRM υπολογίζει τις τιμές της ημερήσιας στήλης του όζοντος από τις σχέσεις που προτείνει ο Van Heuklon (1979), ενώ για την τιμή συγκέντρωσης CO_2 η προεπιλεγμένη τιμή είναι 350 ppm και για το συντελεστή λευκαύγειας του εδάφους 0,2. Το MRM μπορεί να υπολογίσει ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας είτε από δεδομένα ημερήσιας είτε ωριαίας διάρκειας ηλιοφάνειας. Επίσης, το μοντέλο έχει δυνατότητα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας ακόμη και όταν δεν είναι διαθέσιμες οι ωριαίες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης. Σε αυτή την περίπτωση η ατμοσφαιρική πίεση λαμβάνει τιμή ίση με την ατμοσφαιρική πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας (1013,25 hPa). Λαμβάνοντας υπόψη ότι, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, το μοντέλο MRM πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό τιμών ηλιακής ακτινοβολίας σε 39 διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας, κρίθηκε σκόπιμος ο έλεγχος της ευαισθησίας του μοντέλου στην έλλειψη μετρήσεων των παραπάνω παραμέτρων.

Ειδικότερα, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του μοντέλου, συγκρίνοντας τις υπολογιζόμενες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας με τις αντίστοιχες μετρήσεις από το σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ για το έτος 2005 στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Διάρκεια ηλιοφάνειας
  - Ωριαίες τιμές

- Ημερήσιες τιμές
- Ατμοσφαιρική πίεση
  - Ωριαίες μετρήσεις
  - Σταθερή τιμή ίση με 1013,25 hPa
- Ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικού O_3
  - Τιμές από δορυφόρο
  - Εκτιμήσεις του μοντέλου Van Heuklon
- Μέση ετήσια συγκέντρωση CO_2
  - Προεπιλεγμένη τιμή (350 ppm)
  - Μέση τιμή από μετρήσεις δορυφόρου
- Συντελεστής λευκαύγειας της ατμόσφαιρας
  - Προεπιλεγμένη τιμή (0,2)
  - Διαφορετικές τιμές (0,13 έως 0,20 με βήμα 0,01)

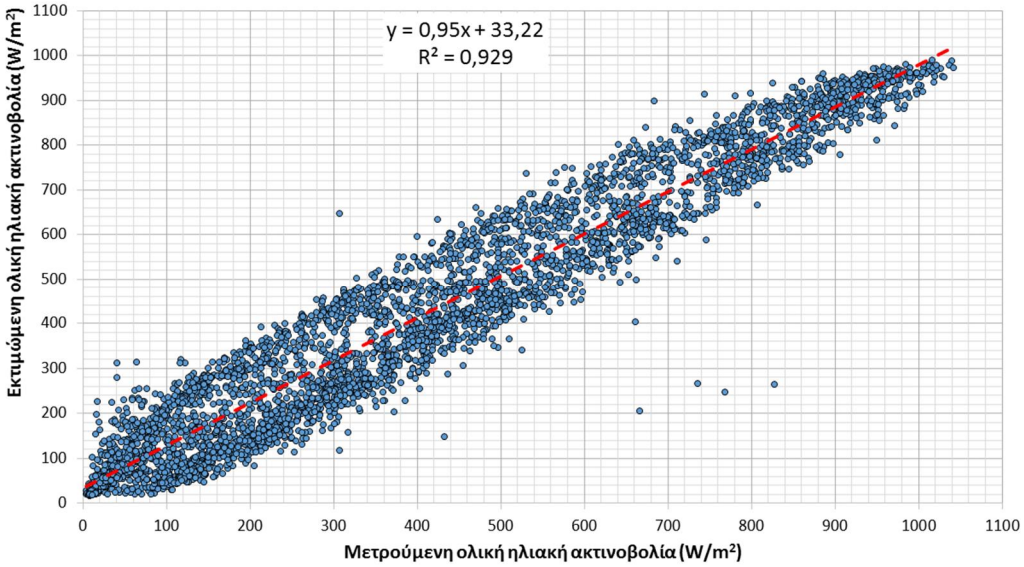
Για τον έλεγχο της επίδρασης της χρονικής διάρκειας των τιμών της ηλιοφάνειας, εφαρμόστηκε το μοντέλο MRM για τον υπολογισμό τιμών ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της Αθήνας κατά το έτος 2005, χρησιμοποιώντας τις τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων του σταθμού ΙΕ-ΠΒΑ-ΕΑΑ με τις ωριαίες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας, καθώς και τις τιμές των πρόσθετων παραμέτρων του Πίνακα 3.IV.

Στο Σχήμα 3.13 και στον Πίνακα 3.V παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των υπολογιζόμενων τιμών με τις πραγματικές μετρήσεις για διαφορετικής διάρκειας τιμών ηλιοφάνειας.

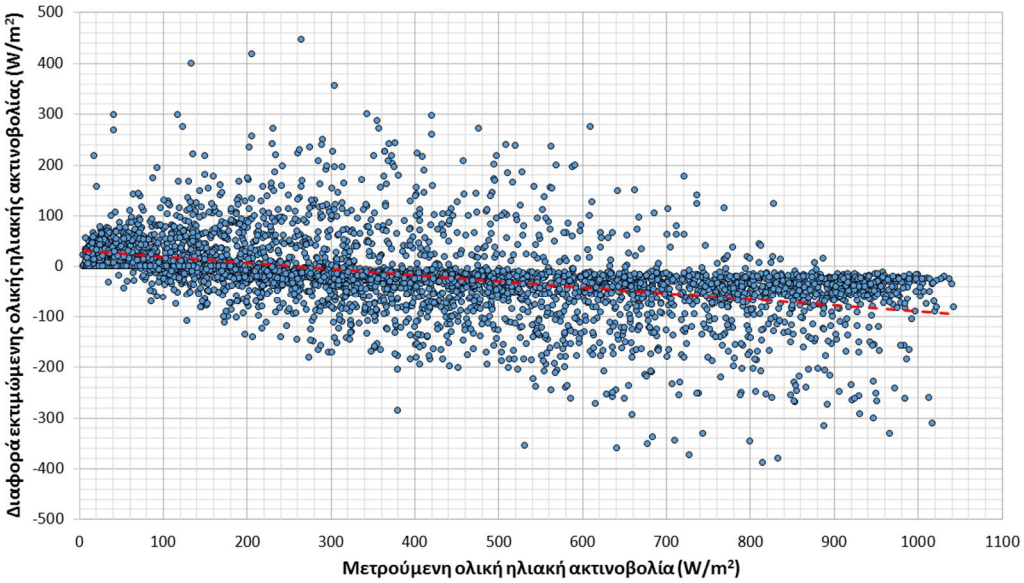
Πίνακας** 3.V: **Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης από το μοντέλο** MRM **τιμών ηλιακής ακτινοβολίας για διαφορετικής διάρκειας δεδομένα ηλιοφάνειας

Διάρκεια ηλιοφάνειας	R^2	MBE (%)	RMSE (%)
Ημερήσιες τιμές	0,88	1,74	24,57
Ωριαίες τιμές	0,93	-2,67	18,45

Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των υπολογιζόμενων από το μοντέλο MRM τιμών ηλιακής ακτινοβολίας, με χρήση δεδομένων ηλιοφάνειας διαφορετικής διάρκειας, ως προς τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές. Στον κατακόρυφο άξονα η διαφορά ισούται με την υπολογιζόμενη ηλιακή ακτινοβολία με δεδομένα ημερήσιας ηλιοφάνειας μείον την αντίστοιχη με δεδομένα ωριαίας ηλιοφάνειας. Διερευνώντας τις διαφορές αυτές, προκύπτει ότι το μοντέλο MRM όταν χρησιμοποιεί δεδομένα ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας τείνει να υπολογίζει υψηλότερες τιμές στις περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, σε περιόδους υψηλών τιμών ηλιακής ακτινοβολίας, η χρήση δεδομένων ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας παράγει χαμηλότερες τιμές. Ως προς το εύρος μεταβολής των διαφορών μεταξύ των δύο περιπτώσεων υπολογισμού, δεν ξεπερνάει σε απόλυτη τιμή τα 450 W/m^2, ενώ στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι τιμές κυμαίνονται $\pm 200\ W/m^2$. Ως εκ τούτου, η χρήση του μοντέλου MRM με δεδομένα ημερήσιας διάρκειας ηλιοφάνειας (τιμές οι οποίες περιέχονται στη βάση δεδομένων των 39 σταθμών της παρούσας διατριβής) παράγει τιμές ηλιακής ακτινοβολίας με μεγάλη αξιοπιστία, ενώ η χρήση ωριαίων τιμών διάρκειας ηλιοφάνειας θα προσέδιδε μικρή βελτίωση.



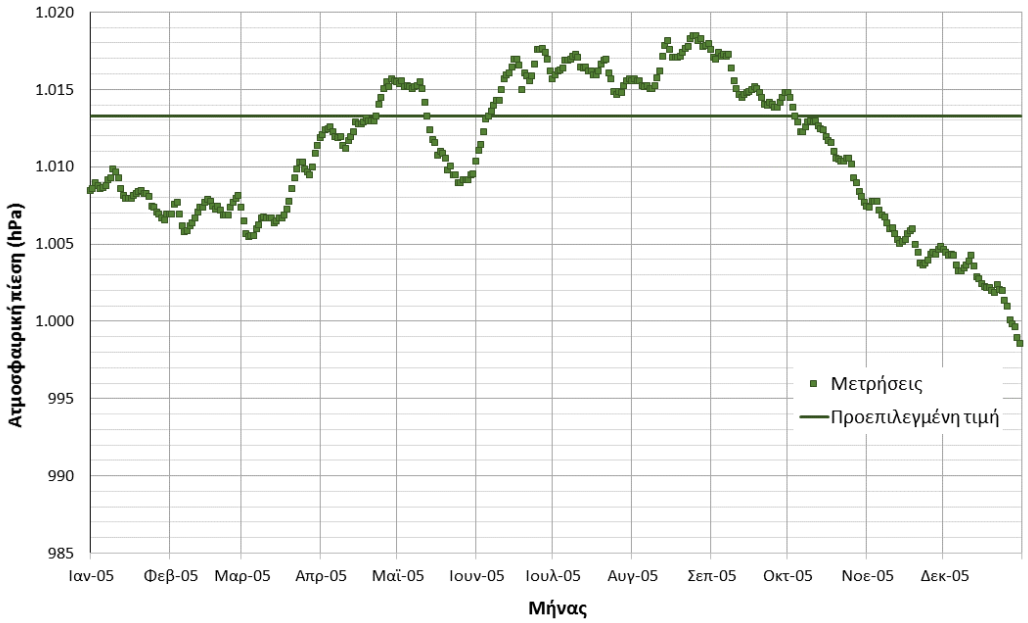
***Σχήμα** 3.10: **Σύγκριση υπολογιζόμενων από το μοντέλο** MRM **τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με τις αντίστοιχες τιμές από τον σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος** 2005, **με χρήση ωριαίων τιμών διάρκειας ηλιοφάνειας. Η εστιγμένη ερυθρή ευθεία αντιπροσωπεύει την καλλίτερη προσαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης στο σμήνος των δεδομένων**.*



***Σχήμα** 3.11: **Μεταβολή των διαφορών μεταξύ των υπολογιζόμενων τιμών από το μοντέλο** MRM **ηλιακής ακτινοβολίας με δεδομένα ημερήσιας ηλιοφάνειας μείον τις αντίστοιχες με δεδομένα ωριαίας ηλιοφάνειας και οι δύο περιπτώσεις αναφέρονται σε μετρήσεις του σταθμού ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος** 2005. **Η ερυθρά εστιγμένη ευθεία αντιπροσωπεύει την καλλίτερη προσαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης στο σμήνος των δεδομένων**.*

Ο επόμενος έλεγχος, αφορά στην επίδραση της ακρίβειας του μοντέλου MRM στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις ατμοσφαιρικής πίεσης. Ο έλεγχος αυτός κρίθηκε απαραίτητος, καθώς στους σταθμούς της Αλιάρτου, του Πύργου, της

Πυργέλας (Άργος) και της Ιεράπετρας, που περιέχονται στην τελική βάση δεδομένων των 39 επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ, δεν καταγράφηκε για τη χρονική περίοδο μελέτης (1985-1999) η ατμοσφαιρική πίεση. Αξιοποιώντας τις μετρήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων του σταθμού ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ για το έτος 2005 (Σχήμα 3.15), χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο MRM στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς να χρησιμοποιηθούν τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης και διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους, όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν κατά την αρχική αξιολόγηση του μοντέλου (Πίνακας 3.IV).



***Σχήμα** 3.12: **Ωριαίες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης του σταθμού ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ στο Θησείο για το έτος** 2005*

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.VI, όπου προκειμένου να γίνουν αντιληπτές οι διαφορές των τιμών R^2 και RMSE, διατηρήθηκε μεγαλύτερος αριθμός δεκαδικών ψηφίων, σε σχέση με το MBE. Συγκρίνοντας τους στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, είναι προφανές ότι η χρήση αναλυτικών μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης προκαλεί ελάχιστη βελτίωση στην ακρίβεια του μοντέλου MRM καθώς το μέσο σχετικό σφάλμα προκατάληψης βελτιώνεται μόλις κατά 0,07%. Να σημειωθεί ότι το μοντέλο MRM χρησιμοποιεί τις τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης για τη διόρθωση της οπτικής αέριας μάζας (σχέση 3.23) κατά τον υπολογισμό της σκέδασης Rayleigh, γεγονός που αιτιολογεί τη μικρή επίδραση στην αποτελεσματικότητα του μοντέλου.

Πίνακας** 3.VI: **Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης από το μοντέλο** MRM **τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με την ύπαρξη ή μη μετρήσεων ατμοσφαιρικής πίεσης

Ατμοσφαιρική πίεση	R^2	MBE (%)	RMSE (%)
Μετρήσεις	0,8742	1,67	24,573
Σταθερή τιμή ίση με $1013,25$ hPa	0,8743	1,74	24,575

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος του μοντέλου MRM ως προς τη μεταβολή της ακρίβειας υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν ο υπολογισμός γίνεται με δεδομένα συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού όζοντος, έναντι εφαρμογής της σχέσης του Van Heuklon (1979). Σύμφωνα με τον Van Heuklon, ο υπολογισμός της εκτιμώμενης συγκέντρωσης σε έναν τόπο σε συγκεκριμένη ώρα, υπολογίζεται ως:

$$l'_{O_3} = J + L_{O_3} + S_{O_3} + M_{O_3} \quad (3.27)$$

όπου: J, η μέση τιμή του O_3 στον ισημερινό (235 DU),
L_{O_3}, η τιμή της στήλης του O_3 ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, που υπολογίζεται ως:

$$L_{O_3} = A \cdot \sin^2(\beta \cdot \varphi) \quad (3.28)$$

όπου: A, σταθερά που λαμβάνεται υπόψη στην αύξηση της τιμής του όζοντος που οφείλεται στο γεωγραφικό πλάτος (η τιμή της είναι 150 για το βόρειο ημισφαίριο και 100 για το νότιο),
φ, το γεωγραφικό πλάτος, θετικό για το βόρειο ημισφαίριο, αρνητικό για το νότιο,
β, συντελεστής με τιμή 1,28 για το βόρειο ημισφαίριο και 1,50 για το νότιο,
S_{O_3}, η τιμή της στήλης του O_3 συναρτήσει της εποχής, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

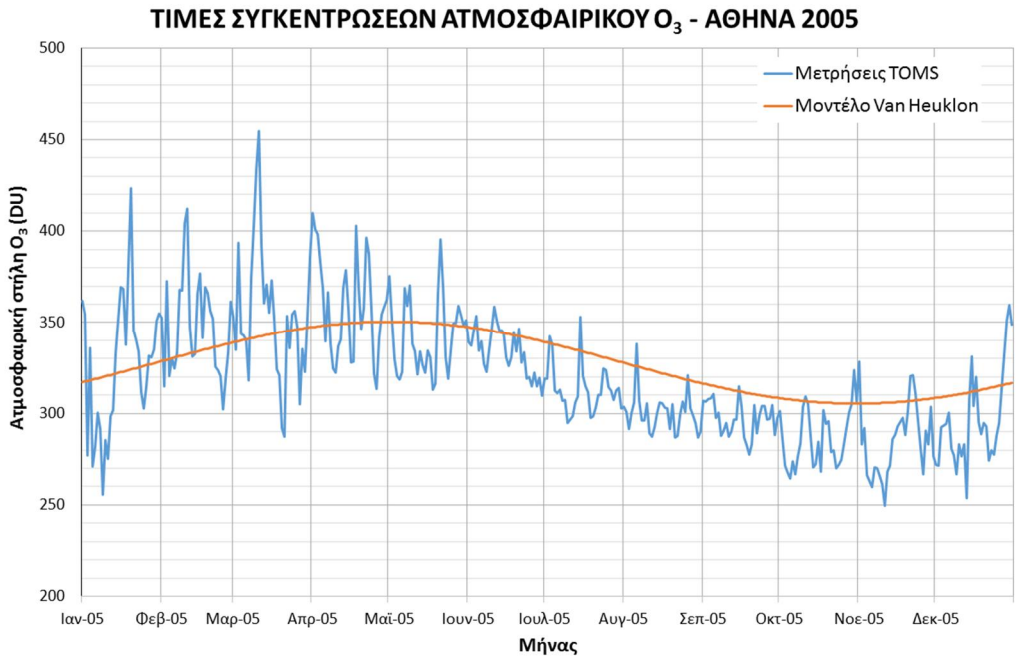
$$S_{O_3} = C \cdot \sin[D \cdot (DN + F)] \cdot sin^2(\beta \cdot \varphi) \quad (3.29)$$

όπου: C, το μισό πλάτος της διακύμανσης του S_{O_3} λόγω εποχικής μεταβολής,
DN, ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους,
F, διορθωτική παράμετρος του αύξοντα αριθμού της ημέρας, που λαμβάνει τιμές -30 για το βόρειο ημισφαίριο και 152,625 για το νότιο ημισφαίριο,
D, συντελεστής μετατροπής του αύξοντα αριθμού της ημέρας του έτους σε κλασματικό μέρος του 360 (ίσος με 0,9865),
M_{O_3}, τιμή της στήλης του O_3 ανάλογα με το γεωγραφικό μήκος, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_{O_3} = G \cdot sin\,[H \cdot (\lambda + I)] \cdot [sin^2(\beta \cdot \varphi)\,] \quad (3.30)$$

όπου: G, το μισό πλάτος της μέγιστης διακύμανσης κατά γεωγραφικό μήκος (ίσο με 20),
H, σταθερά που προκαλεί το ημιτονοειδές κύμα να επαναλαμβάνεται (τιμή 3 για το βόρειο ημισφαίριο προκαλεί επανάληψη κατά 120^0, τιμή 2 για το νότιο ημισφαίριο),
λ, το γεωγραφικό μήκος (θετικό για ανατολικά γεωγραφικά μήκη και αρνητικό για δυτικά),
I, συντελεστής μεταβολής του γεωγραφικού μήκους. Όσον αφορά το βόρειο ημισφαίριο, για περιοχές από την Δυτική Ευρώπη ως και την Ανατολική Ασία, η τιμή είναι 20^0, ενώ για το δυτικό ημισφαίριο είναι 0^0.

Οι μετρήσεις συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικού όζοντος, ελήφθησαν από τον φασματικό δέκτη TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) του δορυφόρου Earth Probe (McPeters et al. 1998), για το έτος 2005, για τη περιοχή της Αθήνας (κωδικός σταθμού 293). Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η ημερήσια μεταβολή της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού O_3 καθώς και οι αντίστοιχες υπολογιζόμενες τιμές από το μοντέλο του Van Heuklon.



***Σχήμα** 3.13: **Τιμές συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικού** O_3 **από τον αισθητήρα** TOMS **του δορυφόρου** Earth Probe **και υπολογιζόμενες τιμές από το μοντέλο** Van Heuklon, **για την περιοχή της Αθήνας το έτος** 2005*

Οι δείκτες στατιστικής αξιολόγησης των δύο περιπτώσεων (Πίνακας 3.VII), σχεδόν ταυτίζονται καθώς απαιτείται μεγάλος αριθμός δεκαδικών ψηφίων προκειμένου να φανεί η μεταξύ τους διαφορά. Καθίσταται σαφές ότι η ακρίβεια του μοντέλου MRM στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας δεν μεταβάλλεται σημαντικά, είτε χρησιμοποιηθούν αναλυτικές μετρήσεις στήλης ατμοσφαιρικού O_3, είτε ληφθούν τιμές από το μοντέλο του Van Heuklon.

***Πίνακας** 3.VII: **Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης από το μοντέλο** MRM **τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με χρήση δεδομένων ή υπολογισμό των τιμών της στήλης ατμοσφαιρικού** O_3*

Συγκέντρωση O_3	R^2	MBE (%)	RMSE (%)
Μετρήσεις	0,874	1,74	24,57
Μοντέλο Van Heuklon	0,874	1,74	24,59

Αντίστοιχος έλεγχος πραγματοποιήθηκε και για τη μέση ετήσια τιμή συγκέντρωσης του CO_2 που χρησιμοποιεί το μοντέλο MRM κατά τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας. Η προεπιλεγμένη μέση ετήσια τιμή είναι 350 ppm, τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίθηκαν με την τιμή 375 ppm, η οποία προέκυψε ως μέσος όρος από την επεξεργασία μετρήσεων χρονικής διάρκειας τριών ετών (2003-2005) του τηλεπισκοπικού δέκτη SCIAMACHY του δορυφόρου Envisat για την περιοχή της Αττικής (Schneising et al. 2008). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στον Πίνακας 3.VIII. Η στήλη διοξειδίου του άνθρακα, l_{CO_2}, στην ατμόσφαιρα, χρησιμοποιείται από το μοντέλο MRM για τον υπολογισμό τού συντελεστή διαπερατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στο CO_2 (σχέση 3.17), ο οποίος με τη σειρά του, συμμετέχει στον υπολογισμό της συνολικής διαπερατότητας των ομοιόμορφα κατανεμημένων αερίων, T_{mg}, σύμφωνα με τη σχέση 3.21. Είναι φανερό, ότι οι τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, που υπολογίζονται από το μοντέλο MRM, έχουν ελάχιστη ευαισθησία στη μεταβολή της τιμής της στήλης CO_2 στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, η προεπιλεγείσα τιμή

από το μοντέλο MRM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας και στους 39 σταθμούς της ΕΜΥ αλλά και καθ' όλα τα έτη της περιόδου μελέτης (1985-1999).

Πίνακας** 3.VIII: **Σύγκριση της ακρίβειας πρόβλεψης από το μοντέλο** MRM **τιμών ηλιακής ακτινοβολίας με χρήση διαφορετικών τιμών στήλης** CO_2 **στην ατμόσφαιρα

Συγκέντρωση CO_2	R^2	MBE (%)	RMSE (%)
Σταθερή τιμή ίση με 350 ppm	0,874	1,741	24,575
Μετρήσεις	0,874	1,737	24,575

Τέλος, στην εργασία των Psiloglou & Kambezidis (2009) όσον αφορά στις τιμές του συντελεστή λευκαύγειας του εδάφους, αναφέρεται ότι η τιμή 0,2, που λαμβάνεται συνήθως ως τυπική (Liu & Jordan 1960), θεωρείται μη ρεαλιστική για την περιοχή της Αθήνας. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η τιμή αυτή είναι υψηλότερη από την πραγματική, η οποία στο σταθμό του ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ εκτιμήθηκε ίση με 0,15. Για να διερευνηθεί η επίδραση της τιμής της λευκαύγειας του εδάφους στην ακρίβεια υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές από 0,13 έως και 0,20 με βήμα 0,01. Τα αποτελέσματα έδειξαν (Πίνακας 3.IX), ότι η σταδιακή μείωση του συντελεστή λευκαύγειας του εδάφους, μειώνει την ακρίβεια υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο MRM, καθόσον αυξάνονται οι τιμές του MBE και του RMSE. Ως εκ τούτου, δεν προκύπτει ανάγκη τροποποίησης του συντελεστή λευκαύγειας του εδάφους από την προεπιλεγμένη τιμή κατά τη χρήση του μοντέλου MRM.

Ολοκληρώνοντας τον έλεγχο της ευαισθησίας του μοντέλου MRM, στις διάφορες παραμέτρους εκτός των μετεωρολογικών δεδομένων, οι οποίες είτε λαμβάνουν προεπιλεγμένες τιμές, είτε εισάγονται από το χρήστη, συμπεραίνεται ότι, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων δεν βελτιώνεται τόσο, ώστε να δικαιολογεί την τροποποίησή τους. Θα πρέπει να τονιστεί, ότι κατά τον έλεγχο αξιοπιστίας του μοντέλου MRM στη βιβλιογραφία, έχουν χρησιμοποιηθεί οι προεπιλεγμένες τιμές στις συγκεκριμένες παραμέτρους.

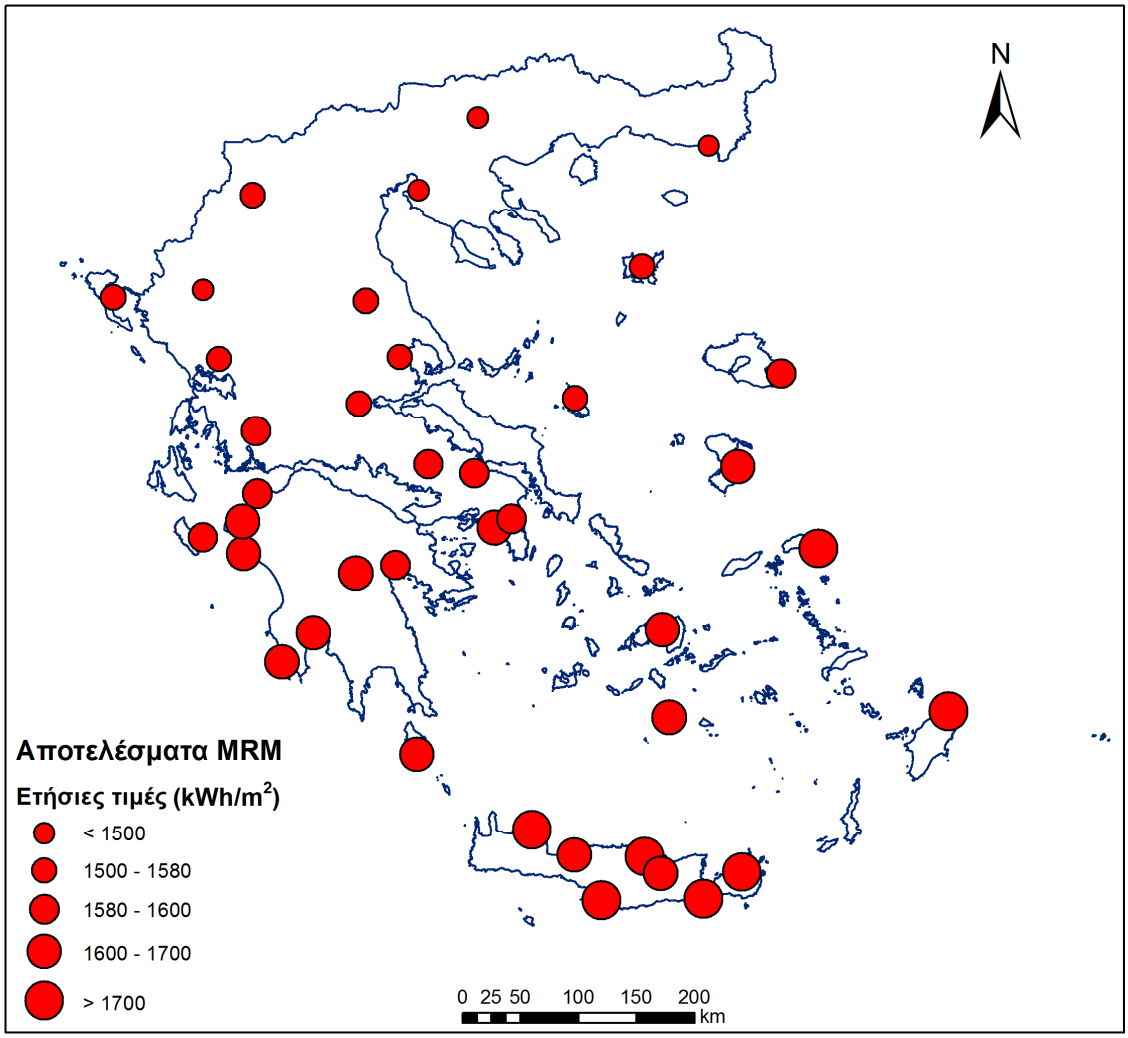
Πίνακας** 3.IX: **Αποτελέσματα αξιολόγησης της ακρίβειας του μοντέλου** MRM, **στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο σταθμό ΙΕΠΒΑ-ΕΑΑ για το έτος** 2005, **για διαφορετικές τιμές του συντελεστή λευκαύγειας του εδάφους

Συντελεστής λευκαύγειας του εδάφους	MBE (%)	RMSE (%)
0,20	1,74	24,575
0,19	1,92	24,603
0,18	2,12	24,636
0,17	2,31	24,671
0,16	2,50	24,707
0,15	2,70	24,746
0,14	2,71	24,748
0,13	3,08	24,827

3.6 Εφαρμογή του μοντέλου MRM στους επιλεγέντες σταθμούς

Για τη συμπλήρωση της βάσης των μετεωρολογικών δεδομένων, ληφθέντων από τους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ, με τιμές ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, εφαρμόστηκε το

μοντέλο MRM, με δεδομένα εισόδου τις ωριαίες τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης, καθώς και τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας. Σε 4 από τους 39 σταθμούς της βάσης (σταθμοί της Αλιάρτου, του Πύργου, της Πυργέλας και της Ιεράπετρας), ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε χωρίς τη χρήση δεδομένων ατμοσφαιρικής πίεσης, καθώς στους συγκεκριμένους σταθμούς δεν καταγραφόταν η ατμοσφαιρική πίεση για την περίοδο μελέτης (1985-1999). Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται η μέση ετήσια τιμή της ηλιακής ενέργειας σε κάθε σταθμό, η οποία έχει προκύψει ως μέσος όρος των επιμέρους ετήσιων τιμών της περιόδου 1985-1999. Από το Σχήμα 3.17 διαπιστώνεται ότι η ετήσια ηλιακή ενέργεια κατά την υπό μελέτη περίοδο κυμαίνεται από 1400 kWh/m^2 στους σταθμούς της Βορείου Ελλάδος, έως και 1800 kWh/m^2 στην Νότια Ελλάδα.



***Σχήμα** 3.14: **Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ, την περίοδο** 1985-1999, **σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο** MRM*

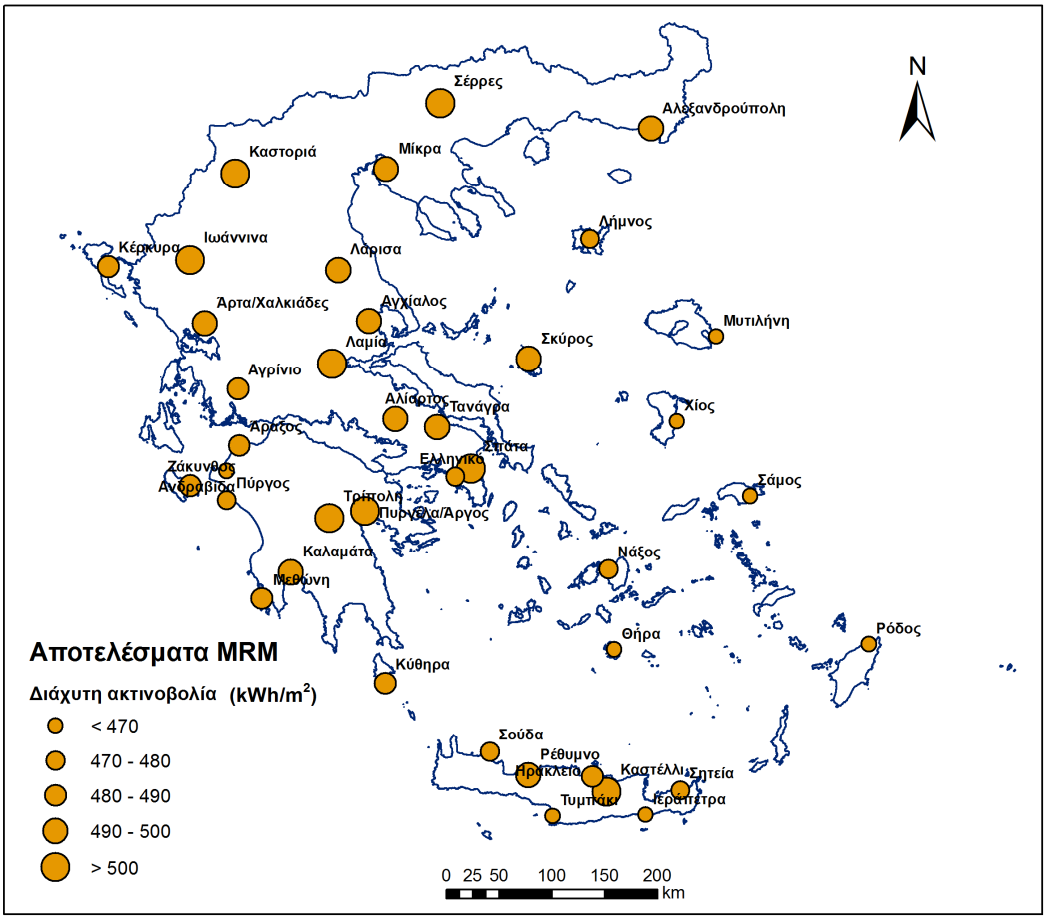
***Πίνακας** 3.X: **Χαρακτηριστικά της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα, την περίοδο** 1985-1999, **σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο** MRM*

Γεωγραφικά πλάτη	**Εύρος μεταβολής** (kWh/m^2)	**Μέση τιμή** (kWh/m^2)
$\geq 40^o$	1445 έως 1500	1480
39^o **έως** 40^o	1460 έως 1630	1550
38^o **έως** 39^o	1540 έως 1650	1590

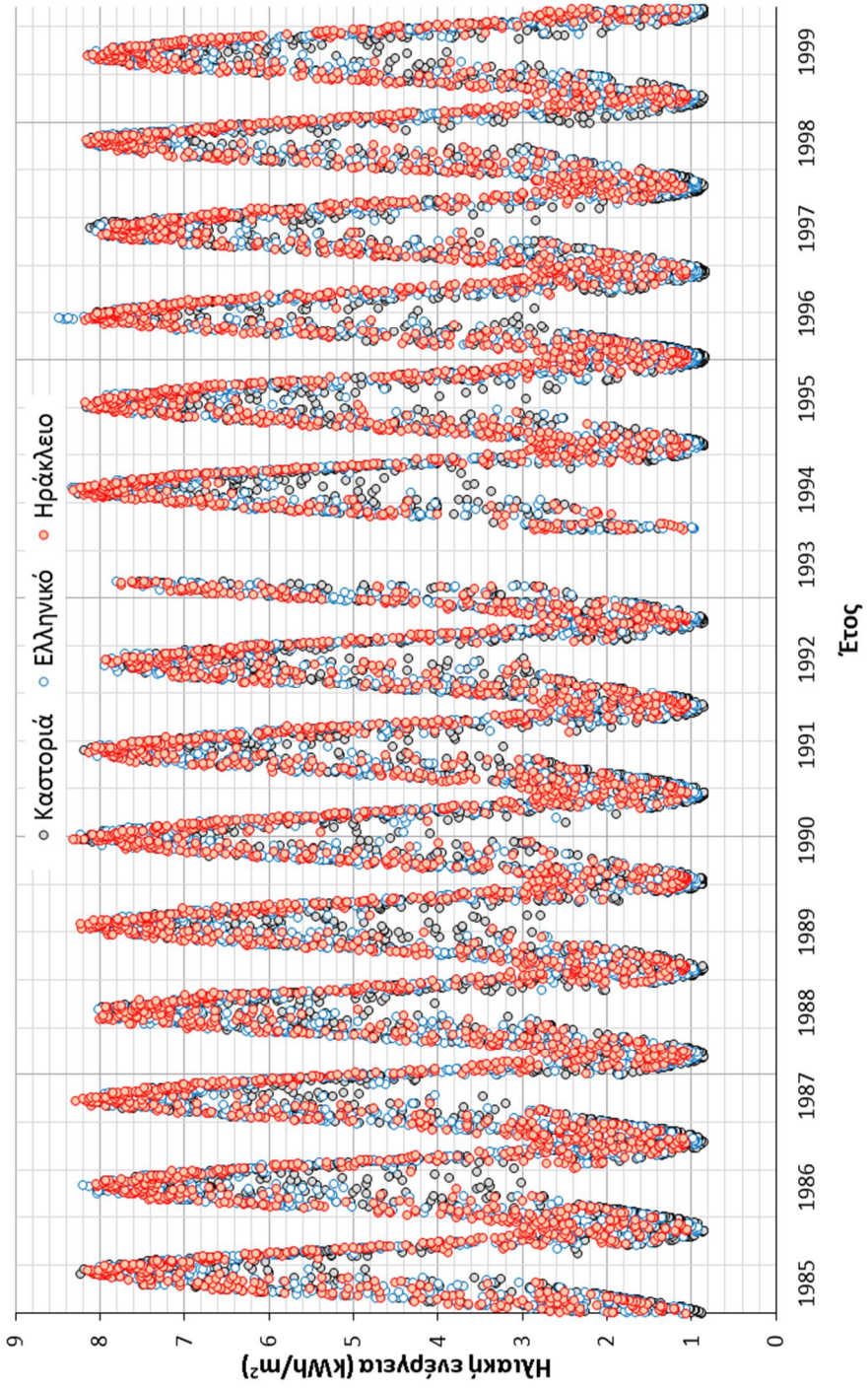
Γεωγραφικά πλάτη	**Εύρος μεταβολής** (kWh/m^2)	**Μέση τιμή** (kWh/m^2)
37^o *έως* 38^o	1590 έως 1750	1650
36^o *έως* 37^o	1650 έως 1750	1700
$\leq 35^o$	1660 έως 1820	1730

Η μεταβολή αυτή παρουσιάζεται και στον Πίνακα 3.X, όπου ανά μοίρα γεωγραφικού πλάτους στη χώρα μας, παρουσιάζεται το εύρος μεταβολής καθώς επίσης και η μέση τιμή της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας για την περίοδο 1985-1999, σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας με το μοντέλο MRM.

Όσον αφορά στη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία επίσης υπολογίζεται από το μοντέλο MRM για τους επιλεγέντες σταθμούς, δεν παρουσιάζονται σημαντικές διακυμάνσεις από σταθμό σε σταθμό (Σχήμα 3.18). Οι τιμές της ετήσιας διάχυτης ηλιακής ενέργειας κυμαίνονται από 440 kWh/m^2 έως 540 kWh/m^2, ενώ η μέση τιμή, στο σύνολο των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ, είναι περίπου 500 kWh/m^2. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της μέσης ετήσιας ολικής με τη μέση ετήσια διάχυτη ηλιακή ενέργεια, η συμμετοχή της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στη διαμόρφωση της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας, κυμαίνεται μεταξύ 25% και 30%. Αυξημένες τιμές ετήσιας διάχυτης ηλιακής ενέργειας παρουσιάζει ο σταθμός των Ιωαννίνων, με εύρος μεταβολής από 509 έως 543 kWh/m^2 και μέση τιμή 15-ετίας 527 kWh/m^2. Αντίστοιχα, η μικρότερη τιμή μέσης ετήσιας διάχυτης ηλιακής ενέργειας, παρουσιάζεται στο σταθμό της Σάμου, με εύρος μεταβολής από 435 έως 475 kWh/m^2 και μέση τιμή 15-ετίας 449 kWh/m^2.



***Σχήμα** 3.15: **Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που προέρχεται από υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας μέσω του** MRM **στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ την περίοδο** 1985-1999*

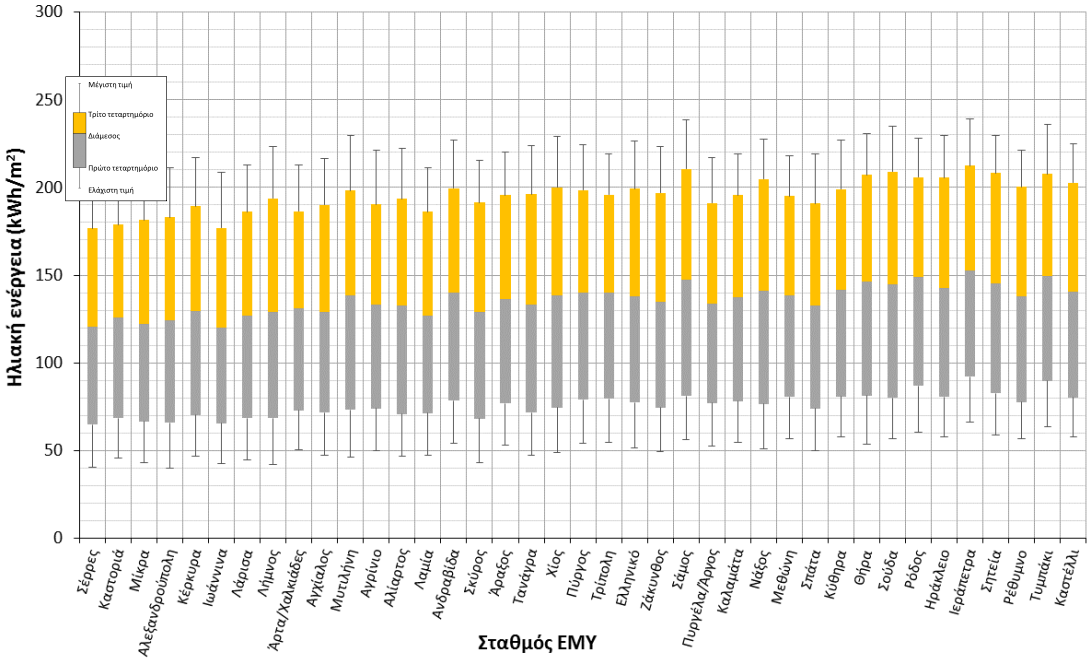


***Σχήμα** 3.16: **Ενδοετήσια μεταβολή της ημερήσιας ηλιακής ενέργειας σε επιλεγμένους σταθμούς της ΕΜΥ, την περίοδο** 1985-1999, **σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο** MRM*

Το Σχήμα 3.19 παρουσιάζει την ενδοετήσια μεταβολή των ημερήσιων τιμών ηλιακής ενέργειας, για την περίοδο 1985-1999 σε επιλεγμένους σταθμούς, έναν στη Βόρεια, έναν στην Κεντρική και έναν στη Νότια Ελλάδα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας

από το μοντέλο MRM. Οι ημερήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας παρουσιάζουν αναμενόμενη ενδοετήσια μεταβολή, με αυξημένες τιμές κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών και μικρότερες κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Οι τιμές της ημερήσιας ηλιακής ενέργειας, τις αίθριες ημέρες του καλοκαιριού, φτάνουν τις 8 kWh/m^2, ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα μειώνονται κάτω της 1 kWh/m^2. Στο ίδιο Σχήμα, είναι εμφανές το κενό στις τιμές ηλιακής ακτινοβολίας για την περίοδο από 1/6/1993 έως 31/12/1993, λόγω της έλλειψης πρωτογενών μετρήσεων διάρκειας ηλιοφάνειας στην αρχική βάση δεδομένων. Εξετάζοντας, συγκριτικά, τις τιμές ημερήσιας ηλιακής ενέργειας στους τρεις σταθμούς του Σχήματος 3.19, οι τιμές της Καστοριάς υπολείπονται σημαντικά εκείνων των σταθμών του Ελληνικού και του Ηρακλείου, των οποίων οι μεταξύ τους διαφορές είναι μικρότερες.

Οι διακυμάνσεις των τιμών της μηνιαίας ηλιακής ενέργειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ, για την περίοδο 1985-1999, με τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που προέκυψαν από το μοντέλο MRM, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.20. Από τα θηκογράμματα των σταθμών, φαίνεται χαρακτηριστικά ότι η διακύμανση των ελάχιστων τιμών της μηνιαίας ηλιακής ενέργειας μεταξύ των σταθμών, είναι, σε απόλυτες τιμές, σημαντικά μικρότερη από τη διακύμανση των μέγιστων τιμών. Ειδικότερα, ενώ το εύρος μεταβολής της ελάχιστης μηνιαίας ηλιακής ενέργειας είναι περίπου 20 kWh/m^2, το εύρος μεταβολής των αντίστοιχων μέγιστων τιμών μεταξύ των σταθμών είναι διπλάσιο (40 kWh/m^2).

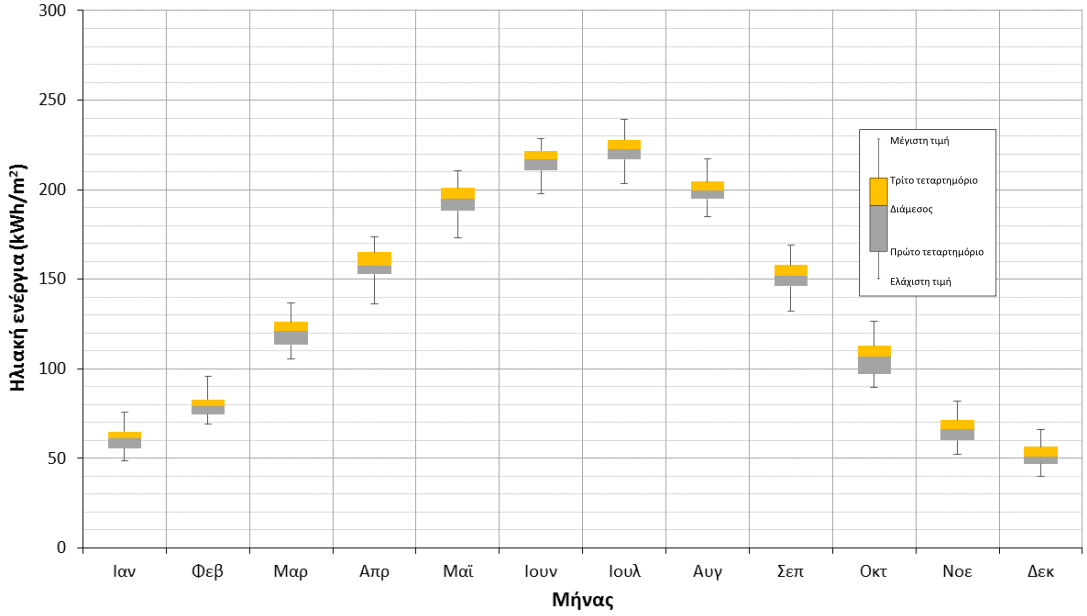


Σχήμα** 3.17: **Θηκογράμματα διακύμανσης της μηνιαίας ηλιακής ενέργειας στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ**, **την περίοδο** 1985-1999, **σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο** MRM. **Οι σταθμοί παρουσιάζονται κατά φθίνουσα σειρά ως προς το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο βρίσκονται

Τέλος, στο Σχήμα 3.21 καταγράφεται συνολικά η ενδοετήσια διακύμανση των τιμών της μηνιαίας ηλιακής ενέργειας στο σύνολο των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ, για την περίοδο 1985-1999, σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του μοντέλου MRM. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, ο θερμότερος μήνας του έτους είναι ο Ιούλιος με τις τιμές μηνιαίας ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα να κυμαίνονται μεταξύ 200 και 240 kWh/m^2. Κατ' αντιστοιχία, ο μήνας με τις μικρότερες τιμές ηλιακής ενέργειας είναι ο μήνας Δεκέμβριος με τιμές

που κυμαίνονται μεταξύ 40 και 70 kWh/m^2. Γενικότερα, το εύρος διακύμανσης των τιμών της μηνιαίας ηλιακής ενέργειας δεν μεταβάλλεται σημαντικά από μήνα σε μήνα και κυμαίνεται μεταξύ 30 και 40 kWh/m^2. Οι μήνες των ενδιάμεσων εποχών (άνοιξης και φθινόπωρου) παρουσιάζουν μικρότερη συγκέντρωση τιμών σε σχέση με τους υπόλοιπους, καθώς εμφανίζουν μεγαλύτερο ενδοτεταρτημοριακό εύρος.

Συνοψίζοντας, με την εφαρμογή του μοντέλου MRM στους επιλεγέντες σταθμούς της ΕΜΥ, συμπληρώθηκαν οι χρονοσειρές 15-ετίας ωριαίων μετεωρολογικών παραμέτρων κάθε σταθμού, με ωριαίες τιμές διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου στη δημιουργία ΤΜΕ σε κάθε έναν από τους 39 σταθμούς.



***Σχήμα** 3.18: **Θηκογράμματα της ενδοετήσιας διακύμανσης της ηλιακής ενέργειας στο σύνολο των επιλεγέντων σταθμών της ΕΜΥ**, **για την περίοδο** 1985-1999, **σύμφωνα με τα αποτελέσματα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο** MRM*

Βιβλιογραφία

Ångström, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, pp.121–126.

ASHRAE, 1981. *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.

Atwater, M.A. & Ball, J.T., 1978. A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. *Solar Energy*, 21.3, pp.163–170.

Atwater, M.A. & Brown, P.S.J., 1974. Numerical computations of latitudinal variation of solar-radiation for an atmosphere of varying opacity. *Journal of Applied Meteorology*, 13, pp.289–297.

Barbaro, S., Coppolino, S., Leone, C. & Sinagra, E., 1979. An atmospheric model for computing direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy*, 22(3), pp.225–228.

Barra, O.A., 1983. Estimation of the total solar radiation from meteorological data in the Italian climatic area. *Solar Energy*, 31.4, pp.427–428.

Berland, T.G. & Danilchenko, V.Y., 1961. The continental distribution of solar radiation. In *Gidrometeoizdat*. Leningrad.

Bird, R.E. & Hulstrom, R.L., 1981. *A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*, Golden, CO (USA).

Bird, R.E. & Hulstrom, R.L., 1980. *Direct Insolation Models*, Golden, CO (USA).

Calafell, D.O. & Hunnt, B.D., 1977. Determination of average ground reflecttvity for solar coflectors. *Solar Energy*, 19(1), pp.87–89.

Davies John A. & Hay John E., 1978. Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop. In Canadian Atmospheric Environment Service.

Duffie, J.A. & Beckman, W.A., 1980. *Solar engineering of thermal processes*, Wiley.

Goh, T.N. & Tan, K.J., 1977. Stochastic modeling and forecasting of solar radiation data. *Solar Energy*, 19(6), pp.755–757.

Gueymard, C.A., 1989. A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface. *Solar Energy*, 43(5), pp.253–265.

Gueymard, C.A., 2012. Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy*, 86(8), pp.2145–2169.

Gueymard, C.A., 1993. Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. *Solar Energy*, 51(2), pp.121–138.

Gueymard, C.A., 2004. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, 76(4), pp.423–453.

Gul, M.S., Muneer, T. & Kambezidis, H.D., 1998. Models for obtaining solar radiation from other meteorological data. *Solar Energy*, 64(1-3), pp.99–108.

Harman, H.H., 1960. *Factor Analysis in Mathematical Methods for Digital Computers* Edited by A Ralstron and HS Wilf, ed., New York: Wiley.

Van Heuklon, T.K., 1979. Estimating atmospheric ozone for solar radiation models. *Solar Energy*, 22(1), pp.63–68.

Hottel, H.C., 1976. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Enerey*, 18(2), pp.129–134.

Hoyt, D. V., 1978. A model for the calculation of solar global insolation. *Solar Energy*, 21, pp.27–35.

Iqbal, M., 1983. *An introduction to solar radiation*, New York: Academic Press.

Kambezidis, H.D., Adamopoulos, A.D., Sakellariou, N.K., Pavlopoulos, H.G., Aguiar, R., Bilbao, J., de Miguel, A. & Negro, E., 1998. The "Meteorological Radiation Model." *Bull. Hell. Assoc. Chart. Mech.-Electr. Engineers*, 3(2), pp.38–42.

Kambezidis, H.D. & Papanikolaou, N.S., 1990. Solar position and atmospheric refraction. *Solar Energy*, 44(3), pp.143–144.

Kambezidis, H.D. & Papanikolaou, N.S., 1989. Total solar irradiance flux through inclined surfaces with arbitrary orientation in Greece: comparison between measurements and models. In *XIV Assembly of EGS*. Barcelona, Spain, pp. 13–17.

Kambezidis, H.D., Psiloglou, B.E. & Synodinou, B.M., 1997. Comparison between measurements and models for daily solar irradiation on tilted surfaces in Athens, Greece. *Renewable Energy*, 10(4), pp.505–518.

Kambezidis, H.D. & Tsangrassoulis, A.E., 1993. Solar position and right ascension. *Solar energy*, 50(5), pp.415–416.

Kasten F. & Young A. T., 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl. Opt.*, 28(22), pp.4735–4738.

Kondratyev, K.Y. & Fedorova, M.P., 1977. Radiation regime of inclined surfaces. In *UNESCO-WMO Symposium on Solar Energy, WMO No 477*. Geneva.

Lacis, A.A. & Hansen, J., 1974. A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(1), pp.118–133.

Leckner, B., 1978. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface - elements of a model. *Solar Energy*, 20(2), pp.143–150.

Littlefair, P., Ashton, S. & Porter, H., 1993. *Luminous efficacy algorithms, Joule 1 Program, Dynamic characteristics of daylight data and daylighting design in buildings, Final Report*, Brussels, Belgium.

Liu, B.Y.H. & Jordan, R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, pp.1–19.

Lyons, T.J. & Edwards, P.R., 1982. Estimating global solar irradiance for Western Australia, part I. *Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B*, 30(4), pp.357–369 .

McPeters, R.D. et al., 1998. *Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Product User's Guide*, Maryland, USA.

Muir, L.R., 1983. Comments on "The effect of the atmospheric refraction in the solar azimuth". *Solar Energy*, 30(3), p.295.

Muneer, T. & Gul, M.S., 2000. Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data. *Energy Conversion and Management*, 41, pp.461–482.

Muneer, T., Gul, M.S. & Kambezidis, H.D., 1998. Evaluation of an all-sky meteorological radiation model against long-term measured hourly data. *Energy Conversion and Management*, 39(3-4), pp.303–317.

Muneer, T. & Younes, S., 2006. The all-sky meteorological radiation model: Proposed improvements. *Applied Energy*, 83, pp.436–450.

NOA, 2002. *Climatological bulletin (Thission) National Observatory of Athens- Year 2001*, Athens, Greece.

Page, J., 1997. *Proposed quality control procedures for the Meteorological Office data tapes relating to global solar radiation, diffuse solar radiation, sunshine and cloud in UK.*,

Page, J.K., 1964. Proc. of U.N. Conference on New Sources of Energy . In p. 378.

Pierluissi, J.H. & Tsai, C.-M., 1987. New LOWTRAN models for the uniformly mixed gases. *Applied Optics*, 26(4), pp.616–618 .

Psiloglou, B.E. & Kambezidis, H.D., 2009. Estimation of the ground albedo for the Athens area, Greece. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(8-9), pp.943–954.

Psiloglou, B.E. & Kambezidis, H.D., 2007. Performance of the meteorological radiation model during the solar eclipse of 29 March 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7(4), pp.12807–12843.

Psiloglou, B.E., Santamouris, M. & Asimakopoulos, D.N., 2000. Atmospheric Broadband Model for Computation of Solar Radiation at the Earth's Surface. Application to Mediterranean Climate. *Pure and Applied Geophysics*, 157(5), pp.829–860.

Psiloglou, B.E., Santamouris, M. & Asimakopoulos, D.N., 1995. Predicting the broadband transmittance of the uniformly mixed gases (CO_2, CO, N_2O, CH_4 and O_2) in the atmosphere, for solar radiation models. *Renewable Energy*, 6(I), pp.63–70.

Reddy, S.J., 1971. An Empirical Method for the Estimation of Total Solar Radiation. *Solar Energy*, 13(2), pp.289–290.

Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J.P., Bovensmann, H., Reuter, M., Notholt, J., Macatangay, R. & Warneke, T., 2008. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions

retrieved from satellite - Part 1: Carbon dioxide. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8, pp.3827–3853.

Sen, Z., 2008. *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy* 1st Editio., Springer.

Spencer, J.W., 1971. Fourier Series Representation of the Position of the Sun. *Search*, 2, p.172.

Walraven, R., 1978. Calculating the position of the sun. *Solar Energy*, 20(5), pp.393–397.

Watt, A.D., 1978. *On the nature and distribution of solar radiation*, Washington DC.

Wilkinson, B.J., 1981. An improved FORTRAN program for the rapid calculation of the solar position. *Solar Energy*, 27(1), pp.67–68.

Yang, K., Huang, G.W. & Tamai, N., 2001. A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy*, 70(1), pp.13–22.

Σανταμούρης, Μ., 1985. *Συμβολή στις μεθόδους υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος για ενεργειακές εφαρμογές*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.

4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Συγκρότηση Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους

4.1 Εισαγωγή

Τα κλιματικά δεδομένα έχουν καταστεί ιδιαίτερα σημαντικά στους κλάδους των μηχανικών, κυρίως για την εκπόνηση αξιόπιστων μελετών ενεργειακής απόδοσης των διαφόρων συστημάτων. Για παράδειγμα, κατά το σχεδιασμό κτηρίων σημαντικό ρόλο αποτελεί η διατήρηση ικανοποιητικών εσωτερικών συνθηκών θερμικής άνεσης με όσο το δυνατόν μικρότερο λειτουργικό κόστος. Επίσης, με τη ραγδαία ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) η πρόβλεψη των μέσων κλιματικών συνθηκών στις περιοχές ενδιαφέροντος, αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της ενεργειακής και οικονομικής μελέτης τους.

Τα προγράμματα προσομοίωσης κτηρίων και ενεργειακών εγκαταστάσεων ΑΠΕ χρειάζονται απαραίτητα πληροφορίες σχετικές με το κλίμα της περιοχής εγκατάστασης, είτε για τον υπολογισμό θερμικών και ψυκτικών φορτίων στην περίπτωση των κτηρίων, είτε στην εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην περίπτωση των ΑΠΕ, υπό τη μορφή ωριαίων τιμών για ένα υποθετικά τυπικό έτος, που περιλαμβάνει διάφορες κλιματικές παραμέτρους. Η χρήση μιας οποιασδήποτε ετήσιας χρονοσειράς δεδομένων για την ενεργειακή αξιολόγηση ενός συστήματος, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα λόγω της πιθανότητας να περιλαμβάνει ακραίες καιρικές συνθήκες με μικρή συχνότητα εμφάνισης διάσπαρτες σε μια μακρά χρονική περίοδο. Για το λόγο αυτό είναι σκόπιμη η χρήση ετήσιων χρονοσειρών, οι οποίες απεικονίζουν τη μετεωρολογική ταυτότητα της περιοχής εγκατάστασης ενός συστήματος. Οι σημαντικότερες παράμετροι, που λαμβάνονται υπόψη, είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία και ανάλογα με το σκοπό αξιοποίησης, η ταχύτητα ή/και η διεύθυνση του ανέμου.

4.2 Περιγραφή του ΤΜΕ

Το ΤΜΕ μιας περιοχής αφορά μια ετήσια χρονοσειρά ωριαίων μετεωρολογικών παραμέτρων, η οποία έχει προκύψει από ένα σύνολο μακροχρόνιων ιστορικών δεδομένων της περιοχής ενδιαφέροντος και εμφανίζει τις ίδιες στατιστικές ιδιότητες με τις αντίστοιχες των ιστορικών δεδομένων από τις οποίες προέκυψε. Η ωριαία χρονοσειρά του ΤΜΕ, διαμορφώνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε

να αντιπροσωπεύει τις κλιματολογικές συνθήκες που θεωρούνται χαρακτηριστικές κατά τη διάρκεια μιας μακρόχρονης περιόδου. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα που συνιστούν το ΤΜΕ δεν αποτελούν δείκτη των καιρικών συνθηκών, που θα επικρατήσουν κατά τη διάρκεια του επόμενου έτους ή των επόμενων πέντε ετών, αλλά αντιπροσωπεύουν συνθήκες που εκτιμώνται να είναι "ρεαλιστικές" κατά τη διάρκεια μιας μακράς χρονικής περιόδου 15, 20 ή 30 ετών. Το γεγονός ότι το ΤΜΕ αφορά «τυπικές» και όχι «ακραίες» συνθήκες, το καθιστά ακατάλληλο για τη μελέτη συστημάτων τα οποία σχεδιάζονται για να αντέχουν σε ακραίες συνθήκες στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στη βιβλιογραφία, η αντιπροσωπευτική ωριαία χρονοσειρά είναι γνωστή και ως Δοκιμαστικό Έτος Αναφοράς (Test Reference Year, TRY), Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος (Typical Meteorological Year, TMY), Πρότυπο Έτος Αναφοράς (Design Reference Year, DRY), ή Έτος Καιρού για Ενεργειακούς Υπολογισμούς (Weather Year for Energy Calculations, WYEC). Οι παραπάνω διαφορετικοί όροι δεν συνιστούν μόνο διαφορετικό τρόπο απόδοσης της ονομασίας του τυπικού έτους, αλλά και διαφορετική μεθοδολογία, σύμφωνα με την οποία προκύπτει. Ειδικότερα, οι χρονοσειρές των τυπικών ετών μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τη μέθοδο με την οποία δημιουργούνται από ιστορικά δεδομένα, σε ιστορικά έτη (π.χ. TRY), σε τυπικά έτη (π.χ. TMY) και σε συνθετικά έτη.

Τα ιστορικά έτη είναι πραγματικά δεδομένα που μετρήθηκαν σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η επιλογή της ετήσιας χρονοσειράς, που αντιπροσωπεύει το μέσο κλίμα της περιοχής, προέρχεται από ένα πραγματικό ιστορικό έτος καιρού, που επιλέγεται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία κατά την οποία τα έτη, στην καταγεγραμμένη περίοδο, που είχαν μήνες με εξαιρετικά υψηλές ή χαμηλές μέσες θερμοκρασίες, αφαιρέθηκαν σταδιακά έως ότου παρέμεινε μόνο ένα έτος. Το TRY συνήθως περιέχει θερμοκρασία ξηρού και υγρού θερμομέτρου, θερμοκρασία σημείου δρόσου, διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, βαρομετρική πίεση, σχετική υγρασία, κάλυψη και τύπο νεφών, και ηλιακή ακτινοβολία, αλλά καθόλου μετρημένα ηλιακά δεδομένα. Όταν χρησιμοποιείται στις ενεργειακές προσομοιώσεις κτιρίων, το πρόγραμμα προσομοίωσης εκτιμά την τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας βασισμένο στις πληροφορίες κάλυψης και τύπου νεφών που είναι διαθέσιμες στην τοποθεσία. Για την αξιοποίηση των δεδομένων ενός TRY απαιτείται ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας από τα δεδομένα κάλυψης και τύπου νεφών.

Τα τυπικά έτη δημιουργούνται επιλέγοντας τους αντιπροσωπευτικότερους μήνες από ιστορικά στοιχεία που προέκυψαν από μεγάλες περιόδους καταγραφής δεδομένων μέσω στατιστικών μεθόδων. Για τη δημιουργία των ΤΜΕ χρησιμοποιείται στατιστική στάθμιση για να επιλεγούν οι μήνες που πρόκειται να συμπεριληφθούν. Αυτή η στάθμιση είναι απαραίτητη προκειμένου να επιλεγούν οι αντιπροσωπευτικότεροι μήνες, όσον αφορά τις κλιματικές μεταβλητές που είναι σημαντικές σε ενεργειακούς υπολογισμούς. Έτσι, οι μήνες που επιλέγονται, είναι "μέσοι" του μακροχρόνιου κλίματος μόνο σχετικά με αυτές τις μεταβλητές. Αυτή η στάθμιση ευνοεί, συνήθως, τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία έναντι των υπόλοιπων παραμέτρων. Κάθε αρχείο δεδομένων ΤΜΕ περιέχει μήνες από διαφορετικά έτη. Για να εξαλειφθούν οι ασυνέχειες, που εμφανίζονται στην ένωση μηνών διαφορετικών ετών, απαιτείται η εφαρμογή μιας μεθόδου εξομάλυνσης στο τέλος του προηγούμενου και στην αρχή του επόμενου μήνα.

Τα συνθετικά έτη δημιουργούνται με τη χρησιμοποίηση διαφόρων στοχαστικών μεθοδολογιών από μακροχρόνιους (μηνιαίους) μέσους όρους και άλλες στατιστικές των σημαντικότερων μετεωρολογικών παραμέτρων (συνήθως θερμοκρασίας ξηρού θερμομέτρου, υγρασίας, ολικής ακτινοβολίας) για να παραχθούν χρονοσειρές ωριαίων δεδομένων. Αυτά τα συνθετικά έτη χρησιμοποιούνται σε τοποθεσίες, όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα ωριαία δεδομένα. Οι διαδικασίες, που ακολουθούνται για να παραχθούν τα συνθετικά έτη, είναι βασισμένες σε απλουστευμένα μοντέλα που περιγράφουν τις χρονοσειρές που εμφανίζονται στη φύση. Παράγουν κάθε κλιματική μετα-

βλητή από τυχαία επιλογή χρησιμοποιώντας τη στοχαστική κατανομή της (ημερήσιας και ωριαίας), το συντελεστή αυτοσυσχέτισής της και συχνά, τις αλληλεπιδράσεις της με άλλες μεταβλητές.

Στο παρελθόν, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τη δημιουργία τυπικών ετήσιων χρονοσειρών, χρησιμοποιώντας βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ., για διάφορες περιοχές στον κόσμο. Μια από τις παλαιότερες προσπάθειες αποτελεί η δημιουργία TRY το 1976 από το Εθνικό Κέντρο Κλιματικών Δεδομένων των ΗΠΑ (US National Climatic Data Center, NCDC) για 60 τοποθεσίες των ΗΠΑ (NCDC 1976). Δημιουργήθηκαν χρονοσειρές δεδομένων που συνδυάζουν μετεωρολογικές παραμέτρους και δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας όπως αυτά προέκυψαν από επεξεργασία ιστορικών στοιχείων της περιόδου 1948-1975. Το 1981, το NCDC συνεργάστηκε με το Εργαστήριο Sandia (Sandia National Laboratories) για τη δημιουργία ΤΜΕ 234 περιοχών των ΗΠΑ (NCDC 1981). Τα ΤΜΕ που δημιουργήθηκαν συμπεριλαμβάνουν δεδομένα ολικής και άμεσης ακτινοβολίας (normal direct radiation) τα οποία προέκυψαν από μετρήσεις (1952-1975) σε 26 περιοχές, ενώ για τις υπόλοιπες περιοχές προέκυψαν αξιοποιώντας τα δεδομένα κάλυψης και τύπου νεφών των TRY. Από το 1970 έως το 1973, η Αμερικάνικη Ένωση Μηχανικών Θέρμανσης-Ψύξης & Κλιματισμού (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE) χρηματοδότησε σειρά προγραμμάτων για τη δημιουργία WYEC σε 46 τοποθεσίες των ΗΠΑ και 5 του Καναδά. Οι τυπικές χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν αφορούσαν σύνολα μετεωρολογικών δεδομένων, τα οποία αντιπροσωπεύουν περισσότερο τυπικές καιρικές συνθήκες, είτε αυτά προέρχονται από ένα ενιαίο αντιπροσωπευτικό έτος είτε από ένα σύνολο επιλεγμένων μηνών (Crawley 1998).

Το 1980 δημιουργήθηκαν χρονοσειρές TRY για περιοχές της Ιταλίας, Ηνωμένου Βασιλείου, Ιρλανδίας, Βελγίου, Ολλανδίας μέσω χρηματοδοτούμενου προγράμματος από την Ευρωπαϊκή Ένωση καθώς και για περιοχές της Τουρκίας, Σλοβακίας, Τσεχίας, Ρωσίας και Ουγγαρίας (Lund & Eidorff 1981, Lund 1984). Το 1995 δημιουργήθηκαν DRY για περιοχές της Ελβετίας, Σουηδίας, Νορβηγίας, Δανίας υπό το πρόγραμμα Ηλιακή Θέρμανση και Ψύξη (Solar Heating and Cooling Programme) του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) με τίτλο Μελέτες Ηλιακής Ακτινοβολίας και Πυρανομετρίας (Solar Radiation and Pyranometry Studies, Lund 1995). Στα πλαίσια του προγράμματος EC PASCOOL δημιουργήθηκαν ΤΜΕ για τις πόλεις Αθήνα, Βουδαπέστη και Λιουμπλιάνα. Αντίστοιχα έτη δημιουργήθηκαν για πόλεις της Γαλλίας (Perpignan και La Rochelle), της Ισπανίας (Μάλαγα, Μαδρίτη και Σεβίλλη) και τη Γενεύη της Ελβετίας.

Εκτός των χρηματοδοτούμενων προγραμμάτων, έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία αντίστοιχες προσπάθειες δημιουργίας ΤΜΕ μεμονωμένων κυρίως περιοχών. Για την Αθήνα έχουν δημιουργηθεί ΤΜΕ από τους Pissimanis et al. (1988) και Argiriou et al. (1999). Παρόμοιες εργασίες έχουν δημοσιευτεί για τη Λευκωσία (Petrakis et al. 1998, Kalogirou 2003), για την Αίγυπτο (Shaltout & Tadros 1994), για την Άγκυρα (Ecevit et al. 2002), για τη Δαμασκό (Skeiker 2004), για την Κίνα (Jiang 2010), για το Hong Kong (Chan et al. 2006, Lam et al. 1996), για το Ομάν (Sawaqed et al. 2005), για τη Μαλαισία (Muzathik et al. 2010) κ.λπ. Η δημιουργία των ΤΜΕ έχει αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη συμπεριφοράς ηλιακών συστημάτων (Klein et al. 1976, Petrie & McClintock 1978, Argiriou et al. 1999, Florides et al. 2002) και την εκτίμηση της μακροχρόνιας ενεργειακής απόδοσης κτηρίων (Argiriou et al. 1999, Florides et al. 2000, Florides et al. 2003). Στον Πίνακα 4.Ι παρουσιάζονται μερικές από τις σημαντικότερες μελέτες συγκρότησης ΤΜΕ που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας** 4.1: **Βιβλιογραφικές αναφορές δημιουργίας ΤΜΕ

ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΜΕ	ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΕΤΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ
60 περιοχές στις ΗΠΑ, NCDC (1976)	1948-75	28	TRY
264 περιοχές στις ΗΠΑ, NCDC (1981)	1952-75	15-24	Sandia
46 περιοχές στις ΗΠΑ και 5 περιοχές στον Καναδά, Crow (1981)	1941-80	30-40	WYEC
3 χώρες στην Ευρώπη, Lund & Eidorff (1981)	1958-75	15	TRY
3 περιοχές στη Φιλανδία, Gabrielsson & Wiljanen (1994)	1968-87	20	TRY
19 περιοχές σε 6 χώρες της ΕΕ, Lund (1984)	1958-75	13-18	TRY
Αθήνα, Pissimanis et al. (1988)	1966-82	17	TMY
Ιμπαντάν, Νιγηρία, Fagbenle (1995)	1979-88	10	TRY
6 περιοχές στη Σαουδική Αραβία, Said & Kadry (1994)	1970-91	22	TWY
Χονγκ Κονγκ, Wong & Ngan (1993)	1967-91	25	EWY
Χονγκ Κονγκ, Hui & Lam (1992)	1948-90	43	TRY
Αθήνα, Argiriou et al. (1999)	1977-96	20	TMY
Λευκωσία, Κύπρος, Petrakis et al. (1998)	1986-92	7	TMY
Λευκωσία, Κύπρος, Kalogirou (2003)	1986-92	7	TMY-2
10 περιοχές στην Αίγυπτο, Shaltout & Tadros (1994)	1964-89	4-20	TSRY
Άγκυρα, Τουρκία, Ecevit et al. (2002)	1979-99	21	TMY-2
Δαμασκός, Skeiker (2004)	1981-90	10	TMY
Ομάν, Sawaqed et al. (2005)	1985-01	7-17	TMY
Μαλαισία, Muzathik et al. (2010)	2004-08	5	SRY

4.3 Μέθοδοι συγκρότησης ΤΜΕ

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί κατά καιρούς αρκετές μέθοδοι δημιουργίας ΤΜΕ. Η παρουσίαση όλων των διαθέσιμων μεθόδων συγκρότησης ΤΜΕ καθώς και των τροποποιήσεών τους θα ξέφευγε από τους σκοπούς της παρούσας διατριβής. Ως εκ τούτου, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν οι δύο σημαντικότερες και ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, έχουν αξιολογηθεί από ανεξάρτητους ερευνητές, δίνουν αξιόλογα αποτελέσματα όσον αφορά στην αξιολόγηση των ηλιακών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, έχει ελεγχθεί η καταλληλόλητά τους στο ελληνικό κλίμα και τα δεδομένα που χρησιμοποιούν είναι διαθέσιμα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή. Οι μέθοδοι αυτές είναι η μέθοδος Danish και η τροποποίησή της από τους Festa-Ratto και η μέθοδος Sandia και οι τροποποιήσεις της από τους Pissimanis et al. (1988) και Argiriou et al. (1999).

Η στατιστική επεξεργασία, που απαιτείται για τη δημιουργία ενός ΤΜΕ, πραγματοποιείται στις χρονοσειρές ωριαίων τιμών των παραμέτρων αλλά στους ημερήσιους δείκτες τους (π.χ. μέση ημερήσια, μέγιστη ημερήσια κλπ.). Ως εκ τούτου, κάθε παράμετρος συμμετέχει στη διαδικασία συγκρότησης ενός ΤΜΕ με τους ημερήσιους δείκτες που προκύπτουν από την επεξεργασία των ωριαίων χρονοσειρών. Το ΤΜΕ αποτελείται από τις ωριαίες χρονοσειρές των ιστορικών δεδομένων για τους μήνες που επιλέγησαν από τη διαδικασία.

4.3.1 Μέθοδος Danish

Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιεί μια διαδικασία τριών βημάτων με σκοπό να επιλεγούν οι μήνες που θα περιέχονται στο ΤΜΕ (Lund 2001, Lund & Eidorff 1981).

Το πρώτο βήμα είναι μία κλιματολογική πιστοποίηση του κάθε υποψήφιου μήνα συγκρινόμενου με όλα τα διαθέσιμα δεδομένα. Αν η μέση τιμή του κάθε ημερήσιου δείκτη του κάθε υποψήφιου μήνα διαφέρει κατά απόλυτη τιμή περισσότερο από μία τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή του συγκεκριμένου μήνα από όλα τα έτη, τότε ο μήνας βαθμολογείται με μηδέν, διαφορετικά βαθμολογείται με ένα. Η τελική βαθμολογία του κάθε μήνα είναι το άθροισμα όλων των βαθμολογιών που παίρνει ο κάθε μήνας από κάθε ημερήσιο δείκτη.

Στο δεύτερο βήμα, υποθέτοντας ότι οι παρατηρήσεις ενός ημερήσιου δείκτη είναι αποτέλεσμα μιας στοχαστικής διαδικασίας, οι αντίστοιχες εποχικές μεταβολές θα πρέπει να αφαιρεθούν. Ως εκ τούτου, οι ημερήσιες τιμές μετατρέπονται σε ημερήσια υπόλοιπα ως προς τις εξομαλυμένες ημερήσιες τιμές χρονοσειράς (τάσης), που επιτυγχάνεται με ανάλυση κατά Fourier:

$$Y(y,m,d) = x(y,m,d) - \mu_x(m,d) \tag{4.1}$$

όπου: τα $Y(y,m,d)$, είναι τα υπόλοιπα του ημερήσιου δείκτη $x(y,m,d)$, για το έτος y, το μήνα m και την ημέρα d
το $\mu_x(m,d)$, η εξομαλυμένη ημερήσια μέση τιμή, όπως εκείνη υπολογίζεται από όλα τα διαθέσιμα έτη.

Για κάθε ξεχωριστό μήνα οι απόλυτες τιμές τής κανονικοποιημένης μέσης τιμής, $f_\mu(y,m)$ και η κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση, $f_\sigma(y,m)$ των υπολοίπων που επιτυγχάνονται από τη σχέση 4.1, υπολογίζονται ως εξής:

$$f_\mu(y,m) = \left| \frac{\mu_Y(y,m) - \mu_{\mu_Y}(y)}{\sigma_{\mu_Y}(y)} \right| \tag{4.2}$$

$$f_\sigma(y,m) = \left| \frac{\sigma_Y(y,m) - \mu_{\sigma_Y}(y)}{\sigma_{\sigma_Y}(y)} \right| \tag{4.3}$$

όπου: τα $\mu_Y(y,m)$ και $\sigma_Y(y,m)$, είναι η μέση μηνιαία τιμή και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση των υπολοίπων $Y(y,m,d)$, για το έτος y, το μήνα m,
τα $\mu_{\mu Y}(y)$ και $\sigma_{\mu Y}(y)$, είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της παραμέτρου $\mu_Y(y,m)$ για το έτος y,
τα $\mu_{\sigma Y}(y)$ και $\sigma_{\sigma Y}(y)$, είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της παραμέτρου $\sigma_Y(y,m)$ για το έτος y.

Με τον τρόπο αυτό, κάθε χωριστός μήνας χαρακτηρίζεται από δύο τιμές για κάθε ημερήσιο δείκτη.

Στο τρίτο βήμα της διαδικασίας προσδιορίζονται τα τρία πρώτα μέγιστα από τις κανονικοποιημένες μέσες τιμές και κανονικοποιημένες τυπικές αποκλίσεις, $f_{max}(y,m)$ του κάθε υποψήφιου μήνα:

$$f_{max}(y,m) = max\{f_\mu(y,m,j), f_\sigma(y,m,j) \cdot |1 \le j \le 3|\} \tag{4.4}$$

όπου: το (y,m,j) δηλώνει την αντίστοιχη κανονικοποιημένη μέση τιμή ή τυπική απόκλιση για το έτος y, το μήνα m και τον ημερήσιο δείκτη j.

Οι υποψήφιοι μήνες τοποθετούνται σε αύξουσα σειρά ως προς τις τιμές $f_{max}(y,m)$ και οι τρεις πρώτοι επιλέγονται ως οι υποψήφιοι μήνες προτεραιότητας.

Από τους προκύπτοντες τρεις υποψήφιους μήνες προτεραιότητας, ο μήνας με την υψηλότερη βαθμολογία στο πρώτο βήμα επιλέγεται ως Τυπικός Μετεωρολογικός Μήνας (ΤΜΜ).

Τροποποίηση της μεθόδου Danish

Η τροποποίηση της μεθόδου Danish από τους Festa & Ratto (1993) έδωσε μια διαδικασία με πολυπλοκότερους στατιστικούς χειρισμούς των δεδομένων.

Οι ημερήσιοι δείκτες μετασχηματίζονται σε κανονικοποιημένα υπόλοιπα ως προς την εξομαλυμένη τάση της χρονοσειράς (smoothed long-term trend):

$$X(y,m,d) = \frac{x(y,m,d) - \mu_x(m,d)}{\sigma_x(m,d)} \tag{4.5}$$

όπου: τα $X(y,m,d)$, είναι τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα του ημερήσιου δείκτη $x(y,m,d)$, για το έτος y, το μήνα m και τη μέρα d,
τα $\mu_x(m,d)$ και $\sigma_x(m,d)$, είναι η εξομαλυμένη μέση τιμή και τυπική απόκλιση, αντίστοιχα, όπως υπολογίζονται από όλα τα διαθέσιμα έτη.

Τα παράγωγα πρώτης τάξης των κανονικοποιημένων υπολοίπων υπολογίζονται και μετατρέπονται πρώτα σε παράγωγα πρώτης τάξης των κανονικοποιημένων υπολοίπων ως προς την εξομαλυμένη τάση της χρονοσειράς, πάλι σε ημερήσια βάση (παράμετροι Z):

$$z(y,m,d) = X(y,m,d) \cdot X(y,m,d+1) \tag{4.6}$$

$$Z(y,m,d) = \frac{z(y,m,d) - \mu_z(m,d)}{\sigma_z(m,d)} \tag{4.7}$$

όπου: τα $Z(y,m,d)$, είναι τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα των παραγώγων πρώτης τάξης της παραμέτρου $z(y,m,d)$, για το έτος y, μήνα m και μέρα d,
τα $\mu_z(m,d)$ και $\sigma_z(m,d)$, η εξομαλυμένη μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα, όπως υπολογίζονται από όλα τα διαθέσιμα έτη.

Για κάθε παράμετρο X και Z υπολογίζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές, οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις και οι αθροιστικές κατανομές κάθε μήνα και κάθε έτους (βραχυπρόθεσμες παράμετροι). Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι αντίστοιχες παράμετροι για κάθε μήνα αλλά για ολόκληρη τη διαθέσιμη περίοδο (μακροπρόθεσμες παράμετροι). Για κάθε παράμετρο X και Z και για κάθε μήνα υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων μέσων τιμών d_{av}, και τυπικών αποκλίσεων d_{sd}, όπως επίσης και η παράμετρος Kolmogorov-Smirnov d_{KS}:

$$d_{av,X}(y,m) = |M_X(y,m) - M_{MX}(m)| \tag{4.8}$$

$$d_{sd,X}(y,m) = |S_X(y,m) - S_{MX}(m)| \tag{4.9}$$

$$d_{ks,X}(y,m) = max|CFD_X(y,m) - CFD_{MX}(m)| \tag{4.10}$$

όπου: τα $M_X(y,m)$, οι μέσες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής X του μήνα m, του έτους y,
τα $M_{MX}(m)$, οι μέσες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής X του μήνα m για όλη τη διαθέσιμη χρονική περίοδο,
τα $S_X(y,m)$, οι τυπικές αποκλίσεις της μεταβλητής X του μήνα m, του έτους y,

τα $S_{MX}(m)$, οι τυπικές αποκλίσεις της μεταβλητής *X* του μήνα *m* για όλη τη διαθέσιμη χρονική περίοδο,
τα $CFD_X(y,m)$, οι αθροιστικές συχνότητες της μεταβλητής *X* του μήνα *m*, του έτους *y* και
τα $CFD_{MX}(m)$, οι αθροιστικές συχνότητες της μεταβλητής *X* του μήνα *m* για όλη τη διαθέσιμη χρονική περίοδο.

Αντίστοιχα, για τη μεταβλητή *Z*:

$$d_{av,Z}(y,m) = |M_Z(y,m) - M_{MZ}(m)| \quad (4.11)$$

$$d_{sd,X}(y,m) = |S_Z(y,m) - S_{MZ}(m)| \quad (4.12)$$

$$d_{ks,Z}(y,m) = max|CFD_Z(y,m) - CFD_{MZ}(m)| \quad (4.13)$$

όπου: τα $M_Z(y,m)$, οι μέσες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής *Z* του μήνα *m*, του έτους *y*,
τα $M_{MZ}(m)$, οι μέσες μηνιαίες τιμές της μεταβλητής *Z* του μήνα *m* για όλη τη διαθέσιμη χρονική περίοδο,
τα $S_Z(y,m)$, οι τυπικές αποκλίσεις της μεταβλητής Z του μήνα *m*, του έτους *y*,
τα $S_{MZ}(m)$, οι τυπικές αποκλίσεις της μεταβλητής Z του μήνα *m* για όλη τη διαθέσιμη χρονική περίοδο,
τα $CFD_Z(y,m)$, οι αθροιστικές συχνότητες της μεταβλητής Z του μήνα *m*, του έτους *y* και
τα $CFD_{MZ}(m)$, οι αθροιστικές συχνότητες της μεταβλητής Z του μήνα *m* για όλη τη διαθέσιμη χρονική περίοδο.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το σταθμικό άθροισμα όλων των αποστάσεων ως:

$$d_X(y,m,j) = (1-a-b)\cdot d_{KS,X}(y,m,j) + a\cdot d_{av,X}(y,m,j) + b\cdot d_{sd,X}(y,m,j) \quad (4.14)$$

και

$$d_Z(y,m,j) = (1-a-b)\cdot d_{KS,Z}(y,m,j) + a\cdot d_{av,Z}(y,m,j) + b\cdot d_{sd,Z}(y,m,j) \quad (4.15)$$

όπου $a \cong b \cong 0.1$ και *(y,m,j)*, η αντίστοιχη απόσταση για το έτος y, το μήνα m και ημερήσιο δείκτη *j (X ή Z)*.

Σε κάθε έναν από τους ημερήσιους δείκτες αντιστοιχούν δύο αποστάσεις-διαφορές d(y,m,j), μία για τη μεταβλητή X και μία για τη Z. Για κάθε μήνα m ταξινομούνται οι αποστάσεις κατά αύξουσα σειρά και στη συνέχεια επιλέγεται η απόσταση d(y,m,j) του έτους y που έχει τη μεγαλύτερη τιμή $d_{max}(y,m,j)$ για κάθε έναν από τους υπό εξέταση ημερήσιους δείκτες. Στη συνέχεια ως ΤΜΜ επιλέγεται ο μήνας που ανήκει στο έτος y και έχει τη μικρότερη απόσταση d_{max}.:

$$d_{minmax}(m,j) = \min\left\{d_{max}(y,m,j)\cdot\left|1\le j\le k\right.\right\} \quad (4.16)$$

όπου: k, ο αριθμός των ημερήσιων δεικτών των μετεωρολογικών παραμέτρων.

4.3.2 Μέθοδος Sandia

Η μέθοδος Sandia, αποτελεί μια εμπειρική προσέγγιση κατά την οποία δημιουργείται ένα ΤΜΕ από τη σύνθεση 12 διαφορετικών ΤΜΜ που προέρχονται από διαφορετικά έτη επί του συνόλου

των διαθέσιμων ετών (Hall et al. 1978). Είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους συγκρότησης ΤΜΕ και μια από τις ευρύτερα αποδεκτές. Η επιλογή των ΤΜΜ της τελικής χρονοσειράς βασίζεται στη σύγκριση της βραχυπρόθεσμης συνάρτησης αθροιστικής κατανομής (cumulative distribution function, CDF) κάθε μήνα και κάθε έτους με την αντίστοιχη μακροπρόθεσμη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής του ίδιου μήνα για όλα τα διαθέσιμα έτη. Η παραπάνω σύγκριση εφαρμόζεται σε κάθε χρονοσειρά των ημερήσιων τιμών των παραμέτρων (ημερήσιοι δείκτες). Οι ημερήσιες τιμές περιλαμβάνουν συνήθως την ημερήσια αθροιστική ηλιακή ακτινοβολία, τις μέσες, τις ελάχιστες και τις μέγιστες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου, για κάθε ημέρα του έτους στο σύνολο των διαθέσιμων ετών.

Στο πρώτο στάδιο, για κάθε έναν από τους ημερήσιους δείκτες, υπολογίζεται σε μηνιαία βάση ο στατιστικός συντελεστής FS_x με βάση τη σχέση Finkelstein-Schäfer (Finkelstein & Schafer 1971). Ο στατιστικός συντελεστής *FS* υπολογίζει τη μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ της βραχυπρόθεσμης και της μακροπρόθεσμης τιμής της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής. Οι μήνες που εμφανίζουν μικρές τιμές του συντελεστή FS_x χαρακτηρίζονται ως τυπικοί για την εν λόγω περίοδο και για το συγκεκριμένο ημερήσιο δείκτη *x*, καθώς η βραχυπρόθεσμη τιμή $CDF_{y,m}$ πλησιάζει την αντίστοιχη μακροχρόνια τιμή CDF_m. Η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής υπολογίζεται ως:

$$S_n(x) = \begin{cases} 0, & x < x_{(1)} \\ (k-0.5)/n, & x_{(k)} \le x \le x_{(k+1)} \\ 1, & x \ge x_{(n)} \end{cases} \quad (4.17)$$

όπου: $S_n(x)$, η τιμή της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής CDF του ημερήσιου δείκτη *x*,
n, ο συνολικός αριθμός των κλάσεων,
k, ο αύξων αριθμός της κλάσης (*k = 1, 2, 3, … , n-1*).

Ο στατιστικός συντελεστής FS_x υπολογίζεται από τη σχέση:

$$FS_x(y,m) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|CDF_m(x_i) - CDF_{y,m}(x_i)\right| \quad (4.18)$$

όπου: $FS_x(y,m)$, ο στατιστικός συντελεστής Finkelstein-Schäfer για τον ημερήσιο δείκτη *x*, το μήνα *m*, του έτους *y*,
N, ο αριθμός των ημερών του μήνα *m* του έτους *y*,
$CDF_m(x_i)$, η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής κάθε ημερήσιου δείκτη *x* για το μήνα *m* επί του συνόλου των μετρήσεων στη διαθέσιμη χρονική περίοδο και
$CDF_{y,m}(x_i)$, η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής κάθε ημερήσιου δείκτη *x* για το μήνα *m* του έτους *y*.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το σταθμικό άθροισμα (weighted sum) όλων των συντελεστών *FS* των υπό εξέταση μετεωρολογικών παραμέτρων, σε μηνιαία βάση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$WS(y,m) = \frac{1}{M}\sum_{x=1}^{M} WF_x \cdot FS_x(y,m) \quad (4.19)$$

όπου: WF_x, ο σταθμικός συντελεστής κάθε ημερήσιου δείκτη *x* $\left(\sum_{x=1}^{M} WF_x = 1\right)$,
M, ο αριθμός των ημερήσιων δεικτών και

$FS_x(y,m)$, ο στατιστικός συντελεστής Finkelstein-Schäfer για τον ημερήσιο δείκτη *x* σε μηνιαία βάση.

Οι υποψήφιοι μήνες ταξινομούνται σε αύξουσα κατάταξη σύμφωνα με τις τιμές WS και επιλέγονται οι πέντε πρώτοι ως υποψήφιοι μήνες προτεραιότητας.

Στο δεύτερο στάδιο της μεθόδου προσδιορίζεται ο καταλληλότερος από τους πέντε υποψήφιους μήνες, εξετάζοντας:

- τις τιμές των $FS_x(y,m)$ για τους ημερήσιους δείκτες της ακτινοβολίας και μέσης θερμοκρασίας,
- τη διακύμανση των μέσων μηνιαίων τιμών των παραμέτρων του μήνα *m* του έτους *y*, από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου μήνα m επί του συνόλου της διαθέσιμης χρονικής περιόδου,
- τη διακύμανση των διαμέσων των μηνιαίων τιμών των παραμέτρων του μήνα *m* του έτους *y*, από τις αντίστοιχες τιμές του ίδιου μήνα m επί του συνόλου της διαθέσιμης χρονικής περιόδου, και
- τις εμμονές των τιμών των παραμέτρων του μήνα *m* του έτους *y*, από τις εμμονές των αντίστοιχων τιμών του ίδιου μήνα m επί του συνόλου της διαθέσιμης χρονικής περιόδου. Οι εμμονές των τιμών προσδιορίζονται βάσει της συχνότητας εμφάνισης και των μηκών των διαδρομών (run lengths), δηλαδή τον αριθμό των διαδοχικών ημερών πάνω από τις τιμές του 67ου εκατοστημορίου και κάτω από τις τιμές του 33ου εκατοστημορίου όπως αυτές προσδιορίζονται από τις μακροχρόνιες μετρήσεις για το μήνα *m*.

Τελικά, από το σύνολο των πέντε υποψήφιων μηνών, επιλέγεται ως τυπικός μήνας αυτός που συνδυάζει:

- ✓ μικρό στατιστικό συντελεστή $FS_x(y,m)$ για τους ημερήσιους δείκτες της ακτινοβολίας και μέσης θερμοκρασίας,
- ✓ μικρή διακύμανση των μέσων μηνιαίων τιμών και διαμέσων από τις αντίστοιχες τιμές των μακροχρόνιων μετρήσεων, και
- ✓ τυπική δομή των εμμονών (οι μήνες με τα μεγαλύτερα μήκη διαδρομών, τις μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης και με μηδενικά μήκη διαδρομών αποκλείονται, ώστε τελικά να προκύψει ο υποψήφιος μήνας).

Τροποποίηση της μεθόδου Sandia

Στόχος της τροποποίησης των Pissimanis et al. (1988) ήταν η ελάττωση των στατιστικών κριτηρίων της μεθόδου Sandia που καθιστούν έναν από τους πέντε υποψήφιους μήνες ως ΤΜΜ. Στη μέθοδο αυτή, η επιλογή του ΤΜΜ γίνεται υπολογίζοντας σε μηνιαία βάση τη ρίζα της μέσης τετραγωνικής διαφοράς (RMSD) της ωριαίας τιμής της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο καθενός από τους πέντε υποψήφιους μήνες, από την αντίστοιχη μέση τιμή των μακροχρόνιων μετρήσεων, δηλαδή του συνόλου της διαθέσιμης χρονικής περιόδου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$RMSD_m = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{h=1}^{k}\left(I_{h,m,y} - \overline{I_{h,m}}\right)^2} \qquad (4.20)$$

όπου: $I_{h,m,y}$, η ωριαία ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο την ώρα *h*, του μήνα *m*, του έτους *y*,

$\overline{I_{h,m}}$, η μέση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο την ώρα *h*, επί του συνόλου της διαθέσιμης χρονικής περιόδου για το μήνα *m*, και

k, ο αριθμός των ωρών του εκάστοτε μήνα *m*.

Ο μήνας που επιλέγεται ως ΤΜΜ από τους πέντε υποψήφιους μήνες, είναι ο μήνας που παρουσιάζει την μικρότερη $RMSD_m$ τιμή. Στην περίπτωση που οι τιμές $RMSD_m$ για κάποιους από τους πέντε υποψήφιους μήνες είναι πολύ κοντά και δεν μπορεί να διασφαλιστεί αξιόπιστη επιλογή, τότε δευτερεύοντα κριτήρια επιλογής μπορεί να είναι οι τιμές των στατιστικών συντελεστών $FS_x(y,m)$ της ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας του αέρα.

***Τροποποίηση της μεθόδου από τους** Argiriou et al. (1999)*

Η τροποποίηση που εισήγαγαν οι Argiriou et al. (1999) αποτελεί περεταίρω διαφοροποίηση της μεθόδου των Pissimanis et al. (1988) χρησιμοποιώντας για κάθε μήνα m και για κάθε παράμετρο *x*, μία βαθμολογία (score) S_x, η οποία υπολογίζεται για όλα τα διαθέσιμα έτη, ως:

$$S_x(y,m) = \frac{\min_{i=1,\ldots,20}(RMSD_x(i,m))}{RMSD_x(y,m)} \tag{4.21}$$

Η μέγιστη βαθμολογία, η οποία είναι ίση με τη μονάδα, αντιστοιχεί στο μήνα με το ελάχιστο RMSD. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η σύνθετη βαθμολογία ως το σταθμικό άθροισμα των βαθμολογιών και επιλέγεται ως ΤΜΜ, ο μήνας με την υψηλότερη σύνθετη βαθμολογία:

$$SS(y,m) = \frac{1}{M}\sum_{x=1}^{M} WF_x \cdot S_x(y,m) \tag{4.22}$$

4.3.3 Σταθμικοί συντελεστές

Οι σταθμικοί συντελεστές, που χρησιμοποιούνται σε κάθε ημερήσιο δείκτη, παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή του ΤΜΜ. Στην ιδανική περίπτωση, η επιλογή του μήνα, που θα συμμετέχει στο ΤΜΕ, θα ήταν ο μήνας που θα παρουσίαζε τις μικρότερες τιμές του στατιστικού συντελεστή Finkelstein-Schäfer για κάθε ημερήσιο δείκτη. Φυσικά στην πράξη είναι απίθανο να συμβεί, καθώς ένας μήνας μπορεί να είναι τυπικός για μια παράμετρο αλλά όχι για τις υπόλοιπες. Αποδίδοντας ένα σταθμικό συντελεστή σε κάθε ημερήσιο δείκτη, λαμβάνεται υπόψη η σχετική σημαντικότητα και η ευαισθησία των παραμέτρων. Οι σταθμικοί συντελεστές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη μέθοδο Sandia, αφορούν τη βαρύτητα που έχει κάθε ημερήσιος δείκτης που χρησιμοποιείται στην τελική σταθμική βαθμολογία WS του στατιστικού συντελεστή Finkelstein-Schäfer κάθε μήνα. Από την επιλογή των σταθμικών συντελεστών, που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς, δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στη μέση θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία, καταδεικνύοντας τη χρησιμότητα των ΤΜΕ σε ενεργειακούς υπολογισμούς ηλιακών συστημάτων και ενεργειακών καταναλώσεων κτηρίων. Στη συνέχεια, συνοψίζονται αντιπροσωπευτικές εργασίες σύμφωνα με τις οποίες η επιλογή των ημερήσιων δεικτών και σταθμικών συντελεστών από τους ερευνητές δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η μέθοδος Sandia, όπως αρχικά παρουσιάστηκε, χρησιμοποιεί 9 ημερήσιους δείκτες: μέγιστη, μέση και ελάχιστη ημερήσια τιμή θερμοκρασίας αέρα και θερμοκρασίας δρόσου, μέγιστη και μέση

ημερήσια ταχύτητα ανέμου και ημερήσια ηλιακή ενέργεια. Σύμφωνα με τους σταθμικούς συντελεστές (Πίνακας 4.ΙΙ), η ακτινοβολία συγκεντρώνει το 50%, και οι υπόλοιπες παράμετροι μοιράζονται το υπόλοιπο 50% (Σχήμα 4.1).

Οι Bahadori & Chamberlain (1986) δημιούργησαν ένα ΤΜΕ από μετεωρολογικά δεδομένα 10 ετών για την Οτάβα στο Οντάριο του Καναδά. Χρησιμοποίησαν τις ίδιες μετεωρολογικές παραμέτρους με τη μέθοδο Sandia με σημαντικές όμως τροποποιήσεις στους σταθμικούς συντελεστές. Στην ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία αέρα δόθηκε σταθμικός συντελεστής 40%, ενώ το υπόλοιπο 20% μοιράστηκε στη σχετική υγρασία και στην ταχύτητα του ανέμου (Πίνακας 4.ΙΙ, Σχήμα 4.2). Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι το ΤΜΕ που παράχθηκε ελέγχθηκε αποκλειστικά στην προσομοίωση των θερμικών αναγκών κτηρίου.

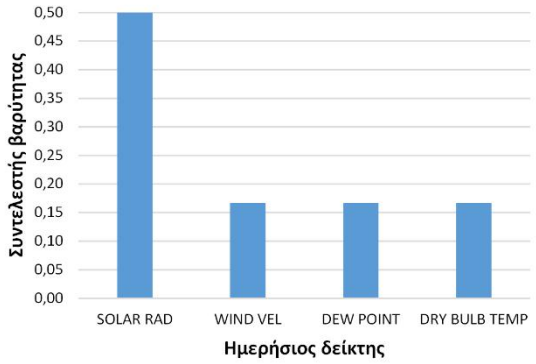
Πίνακας** 4.II: **Σταθμικοί συντελεστές για την επιλογή του ΤΜΕ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ	Sandia (Hall et al 1978)	Bahadori-Chamberlain 1986	Pissimanis et al 1988	NREL, (Marion, Urban 1995)	Petrakis et al 1996	Petrakis et al 1998
Θερμοκρασία αέρα	***Μέγιστη***	1	1.0	1	1	1	1
Θερμοκρασία αέρα	***Ελάχιστη***	1	1.0	1	1	1	1
Θερμοκρασία αέρα	***Μέση***	2	6.0	2	2	1	2
Θερμοκρασία αέρα	***Εύρος***					1	1
Υγρασία ή θερμοκρασία δρόσου	***Μέγιστη***	1	0.5	1	1	1	1
Υγρασία ή θερμοκρασία δρόσου	***Ελάχιστη***	1	0.5	1	1	1	1
Υγρασία ή θερμοκρασία δρόσου	***Μέση***	2	1.0	2	2	1	2
Υγρασία ή θερμοκρασία δρόσου	***Εύρος***					1	1
Ταχύτητα ανέμου	***Μέγιστη***	2	1.0	2	1	1	1
Ταχύτητα ανέμου	***Ελάχιστη***					1	1
Ταχύτητα ανέμου	***Μέση***	2	1.0	2	1	1	2
Ταχύτητα ανέμου	***Εύρος***					1	1
Διεύθυνση ανέμου	***Μέση***						1
Ολική ακτινοβολία	***Άθροισμα***	12		12	5	12	
Ολική ακτινοβολία	***Μέση***		8.0				8
Άμεση ακτινοβολία	***Άθροισμα***				5		
Άμεση ακτινοβολία	***Μέση***						8
ΑΘΡΟΙΣΜΑ		24	29	24	20	24	32

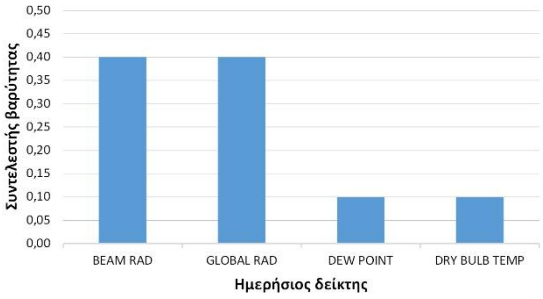
Ομοίως, οι Pissimanis et al. (1988) κατά την εφαρμογή της μεθόδου Sandia (με παρέμβαση στον τρόπο επιλογής του ΤΜΜ), χρησιμοποίησαν τους ίδιους ημερήσιους δείκτες και σταθμικούς συντελεστές. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποίησαν ήταν ωριαίες χρονοσειρές 23 ετών για την περιοχή της Αθήνας (Σχήμα 4.1).

Το 1995 το NREL, βασιζόμενο σε χρονοσειρές 29 ετών, δημιούργησε ΤΜΕ σε περιοχές των ΗΠΑ χρησιμοποιώντας δεδομένα 239 σταθμών (Marion & Urban 1995). Εκτός των ημερήσιων δεικτών που χρησιμοποιήθηκαν στη μέθοδο Sandia, το NREL πρόσθεσε το δείκτη της ημερήσιας άμεσης ακτινοβολίας. Η προσθήκη της άμεσης ακτινοβολίας βελτίωσε την απόδοση του ΤΜΕ ως προς τις ετήσιες τιμές της άμεσης ηλιακής ενέργειας. Ειδικότερα, σε έλεγχο του ΤΜΕ που προέκυψε κατά

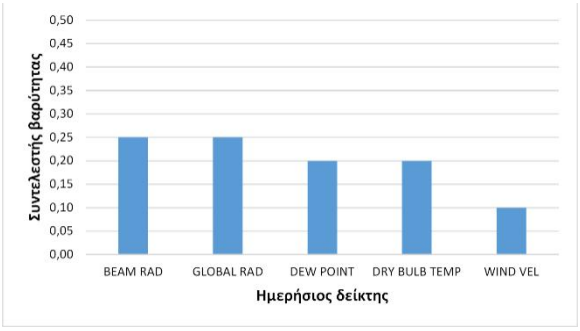
την εφαρμογή μόνο της ολικής ακτινοβολίας σε 20 σταθμούς, η διαφορά της ετήσιας άμεσης ηλιακής ενέργειας με τη μέση τιμή 30-ετίας κυμαινόταν στο 4% (επίπεδο εμπιστοσύνης 95%). Με την προσθήκη της άμεσης ακτινοβολίας, η διαφορά μειώθηκε στο 3% χωρίς να αλλοιωθεί η αντίστοιχη διαφορά της ετήσιας ολικής ακτινοβολίας. Η κατανομή των σταθμικών συντελεστών στις παραμέτρους παραμένει παρόμοια με τη μέθοδο Sandia αποδίδοντας το 50% της ολικής ακτινοβολίας εξίσου στην ολική και άμεση συνιστώσα της (Πίνακας 4.II, Σχήμα 4.4).



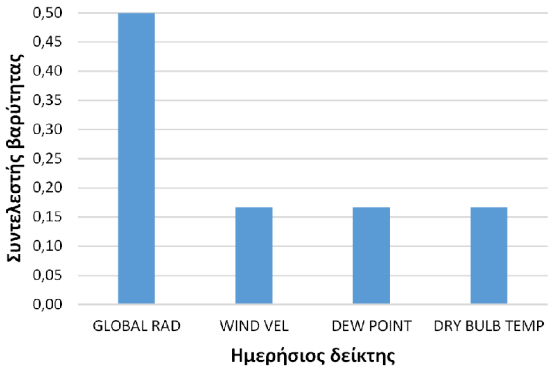
***Σχήμα** 4.1: **Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους της μεθόδου** Sandia*



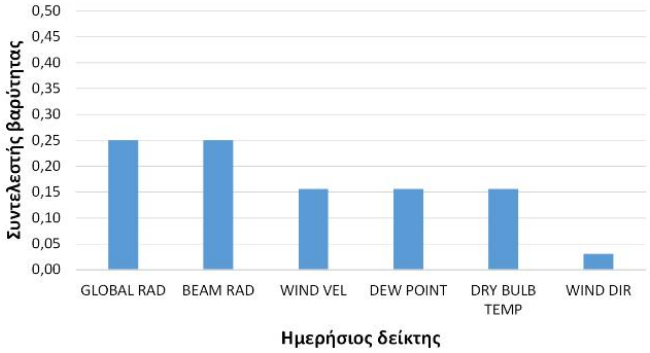
***Σχήμα** 4.2:**Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους**, Bahadori & Chamberlain (1986)*



***Σχήμα** 4.3:**Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους**, NREL (Marion & Urban 1995)*



***Σχήμα** 4.4:**Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους**, Petrakis et al. (1996)*



***Σχήμα** 4.5:**Κατανομή βαρύτητας στις μετεωρολογικές παραμέτρους**, Petrakis et al. (1998)*

Η επόμενη προσπάθεια συγκρότησης ΤΜΕ για την περιοχή της Αθήνας έγινε από τους Petrakis et al. (1996) χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα από το σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο Θησείο για περίοδο 17 ετών. Κατά την εφαρμογή της τροποποίησης της μεθόδου των Pissimanis et al. (1988), οι ερευνητές πρόσθεσαν στους ημερήσιους δείκτες το ημερήσιο εύρος μεταβολής της θερμοκρασίας αέρα, της θερμοκρασίας δρόσου και της ταχύτητας του ανέμου. Το 50% της βαρύτητας δόθηκε στην ολική ακτινοβολία, ενώ το υπόλοιπο 50% ισοκατανέμεται στους υπόλοιπους 12 ημερήσιους δείκτες (Πίνακας 4.II, Σχήμα 4.4).

Δύο χρόνια αργότερα, οι Petrakis et al. (1998) δημιούργησαν ΤΜΕ με την ίδια μέθοδο και για την πόλη της Λευκωσίας χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα 7 ετών. Χρησιμοποίησαν 16 ημερήσιους δείκτες, οι οποίοι περιλαμβάνουν την ημερήσια μέγιστη, ελάχιστη, μέση και εύρος τιμών θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου καθώς και τις μέσες ημερήσιες τιμές της διεύθυνσης του ανέμου, της άμεσης και της ολικής ακτινοβολίας. Οι τροποποιήσεις των ημερήσιων δεικτών καθώς και των σταθμικών συντελεστών αφορούσαν στην προσθήκη του δείκτη της μέσης ημερήσιας διεύθυνσης του ανέμου καθώς επίσης και τη μετατροπή των ημερήσιων δεικτών της ηλιακής ακτινοβολίας από ημερήσια αθροίσματα σε μέσες ημερήσιες τιμές. Στην ηλιακή ακτινοβολία αποδόθηκε βαρύτητα 50%, στη θερμοκρασία αέρα, τη σχετική υγρασία και τη ταχύτητα του ανέμου αποδόθηκε σταθμικός συντελεστής 15.62% και μόλις 3.12% στη διεύθυνση του ανέμου (Σχήμα 4.5). Οι μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων θερμοκρασίας αέρα, ταχύτητας ανέμου και σχετικής υγρασίας έχουν ως σταθμικό συντελεστή το 40% της συνολικής βαρύτητας της παραμέτρου (Πίνακας 4.II). Όσον αφορά στην τροποποίηση του ημερήσιου δείκτη της ηλιακής ακτινοβολίας δεν γίνεται αναφορά από τους συγγραφείς στην επίδραση που είχε η τροποποίηση στο παραγόμενο ΤΜΕ.

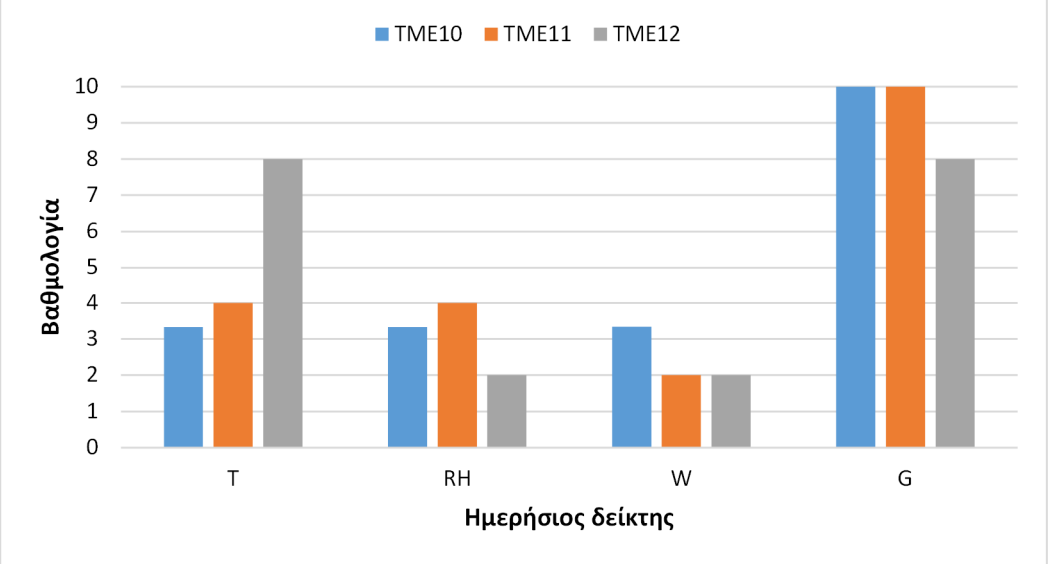
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η επιλογή των σταθμικών συντελεστών, καθώς επίσης και των ημερήσιων δεικτών που θα χρησιμοποιηθούν, δεν διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των διαφορετικών ερευνητικών ομάδων, ενώ στο δημοσιευμένο έργο των ομάδων αυτών στις συγκρίσεις των ΤΜΕ, που προκύπτουν με τις ιστορικές χρονοσειρές, παρουσιάζονται αξιόλογα αποτελέσματα. Οι Argiriou et al. (1999) στην εργασία τους συγκρίνουν διαφορετικές μεθόδους συγκρότησης ΤΜΕ, εξετάζοντας, εκτός των άλλων, και τρεις διαφορετικές ομάδες σταθμικών συντελεστών (Πίνακας 4.III) για τη θερμοκρασία αέρα *T*, τη σχετική υγρασία *RH*, την ταχύτητα ανέμου *W* και την ολική ακτινοβολία *I*.

***Πίνακας** 4.III: **Σταθμικοί συντελεστές για τη δημιουργία ΤΜΕ (αναπαραγωγή από** Argiriou et al. 1999)*

	T_{max}	T_{min}	$\bar{T}$	RH_{max}	RH_{min}	$\overline{RH}$	W_{max}	$\bar{I}$	I	**Άθροισμα**
ΤΜΕ10[a]	0,83	0,83	1,67	0,83	0,83	1,67	1,67	1,67	10	20
ΤΜΕ11[b]	1	1	2	1	1	2	1	1	10	20
ΤΜΕ12[c]	1,0	1,0	6,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	8,0	20

[a]Hall et al. (1978), Pissimanis et al. (1988)
[b]Marion & Urban (1995)
[c]Siurna et al. (1984), Bahadori & Chamberlain (1986)

Τα συγκεκριμένα ΤΜΕ προέκυψαν με εφαρμογή της μεθόδου Sandia τροποποιημένη από τους Argiriou et al. (1999). Για τον έλεγχο των ΤΜΕ οι ερευνητές έλεγξαν την ενεργειακή συμπεριφορά τεσσάρων ενεργειακών συστημάτων, την παραγωγή ζεστού νερού ενός απλού ηλιακού συλλέκτη (ZNX), τις ενεργειακές καταναλώσεις ενός κτηρίου (ΚΤ), την ενεργειακή παραγωγή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Φ/Β) και την ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος μεγάλης κλίμακας παραγωγής ζεστού νερού για την κάλυψη αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης και θέρμανση χώρων με σύστημα αποθήκευσης νερού (ΗΣΘ). Τα ΤΜΕ που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των 4 συστημάτων και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν με αντίστοιχη προσομοίωση χρησιμοποιώντας τις ιστορικές χρονοσειρές. Εάν από τον πίνακα κατάταξης των ΤΜΕ (στον οποίο οι συγγραφείς παρουσιάζουν το σύνολο των ΤΜΕ που συγκρίνουν) επικεντρωθούμε στα τρία συγκεκριμένα ΤΜΕ, διαπιστώνεται ότι ανάλογα με το σύστημα προσομοίωσης προκύπτει διαφορετική κατάταξη χωρίς να ακολουθείται κάποιος γενικός κανόνας. Εξετάζοντας το Σχήμα 4.6, φαίνεται ότι η 1η και η 2η ομάδα σταθμικών συντελεστών δεν έχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Παρόλα αυτά κατά την προσομοίωση του συστήματος θέρμανσης μεγάλης κλίμακας, τα αποτελέσματα που έδωσαν οι δύο αυτές ομάδες συντελεστών, φαίνεται να διαφοροποιούνται σημαντικά καθώς ενώ το ΤΜΕ10 βρίσκεται στη 2η θέση της γενικής κατάταξης, το ΤΜΕ11 βρίσκεται στην 11η. Καθώς δεν δίνονται από τους ερευνητές οι αποκλίσεις των ενεργειακών αποτελεσμάτων για κάθε ένα των ΤΜΕ που εκλέγησαν δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.



***Σχήμα** 4.6: **Ομάδες σταθμικών συντελεστών για την παραγωγή ΤΜΕ από τους** Argiriou et al. 1999*

Τελικά, οι ερευνητές αποδίδοντας μια συνολική βαθμολογία για κάθε των παραγόμενων ΤΜΕ, κατέταξαν το ΤΜΕ10 στην υψηλότερη θέση σε σχέση με τα υπόλοιπα, ακολουθεί το ΤΜΕ11 και αμέσως μετά το ΤΜΕ12. Στον Πίνακα 4.IV παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας των

Argiriou et al. (1999) με τους αριθμούς στις παρενθέσεις να αντιστοιχούν στην κατάταξη του ΤΜΕ στο σύνολο των 17 εξεταζόμενων ΤΜΕ.

***Πίνακας** 4.IV: **Πίνακας κατάταξης ΤΜΕ (αναπαραγωγή από** Argiriou et al. 1999)*

ΖΝΧ	ΚΤ περίοδος θέρμανσης	ΚΤ περίοδος ψύξης	ΗΣΘ	Φ/Β	Τελική κατάταξη
TME12 (2)	TME12 (4)	TME11 (2)	TME10 (2)	TME10 (5)	**TME**10 (3)
TME11 (4)	TME10 (12)	TME10 (9)	TME12 (3)	TME11 (8)	**TME**11 (5)
TME10 (13)	TME11 (13)	TME12 (13)	TME11 (11)	TME12 (9)	**TME**12 (7)

4.4 Αξιολόγηση μεθόδων

Η αξιολόγηση των μεθόδων συγκρότησης ΤΜΕ κινείται σε δύο άξονες. Ο πρώτος αφορά στη σύγκριση της ολικής ακτινοβολίας της παραγόμενης ετήσιας χρονοσειράς με τις αντίστοιχες τιμές της χρονοσειράς των ιστορικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν (Menicucci & Fernandez 1988, Lhendup & Lhundup 2007, Williams & Kerrigan 2012) και ο δεύτερος στη σύγκριση του ΤΜΕ με τη χρονοσειρά των ιστορικών δεδομένων μέσω της προσομοίωσης ενός ενεργειακού συστήματος (Freeman 1979, Hui 1996, Florides et al. 2000, Florides et al. 2002).

Σε μια εργασία σύγκρισης διαφορετικών ΤΜΕ, η οποία δημοσιεύτηκε από τον Crow (1981), αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα της ενεργειακής προσομοίωσης ενός τριώροφου κτηρίου γραφείων επιφάνειας 4500 m^2. Η αξιολόγηση των ΤΜΕ έγινε με τη σύγκριση των αντίστοιχων ενεργειακών αποτελεσμάτων προσομοίωσης του ίδιου κτηρίου με ιστορικά δεδομένα 30 ετών. Τα ΤΜΕ αφορούσαν ετήσιες χρονοσειρές TRY, WYEC και ΤΜΕ καθώς και παραλλαγές τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας, το ΤΜΕ με τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν το ΤΜΕ που είχε προκύψει με τη μέθοδο Sandia, όπως αυτή εφαρμόστηκε από τους Marion & Urban (1995).

Στη σύγκριση των διαφορετικών ΤΜΕ που παρουσίασαν οι Argiriou et al. (1999) προέκυψε ότι το ΤΜΕ που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο Festa-Ratto είχε την καλύτερη βαθμολογία στην προσομοίωση απλού συστήματος ζεστού νερού χρήσης, το ΤΜΕ, που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο Sandia, είχε την καλύτερη βαθμολογία στην ενεργειακή προσομοίωση κτηρίου, η μέθοδος Danish παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα κατά την προσομοίωση Φ/Β συστήματος και, τέλος, το έτος, που προέκυψε από τις μέσες τιμές της χρονοσειράς ιστορικών δεδομένων, είχε τα καλύτερα αποτελέσματα στην προσομοίωση ενός συστήματος παραγωγής ζεστού νερού μεγάλης κλίμακας. Εκ πρώτης όψεως, δεν προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τη μέθοδο η οποία θα μπορούσε να θεωρηθεί ως η πιο αξιόπιστη˙ ωστόσο, εξετάζοντας τον Πίνακα 4.V με τα αποτελέσματα της εργασίας, φαίνεται ότι συνολικά τα ΤΜΕ τα οποία βασίζονται στη μέθοδο Sandia, με τις διάφορες τροποποιήσεις που εφαρμόσθηκαν, δίνουν σε κάθε περίπτωση αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς στη χειρότερη περίπτωση βρίσκονται στη τρίτη θέση της κατάταξης (περίπτωση Φ/Β).

***Πίνακας** 4.V: **Πίνακας συνολικής κατάταξης ΤΜΕ (αναπαραγωγή από** Argiriou et al. 1999)*

Κατάταξη	ΖΝΧ	ΚΤ περίοδος θέρμανσης	ΚΤ περίοδος ψύξης	ΗΣΘ	Φ/Β
1	TME14	TME04	TME05	TME17	TME16
2	TME12	TME08	TME11	TME10	TME14
3	TME15	TME03	TME14	TME12	TME02
4	TME11	TME12	TME04	TME15	TME15
5	TME04	TME09	TME01	TME14	TME10

Κατάταξη	ZNX	ΚΤ περίοδος θέρμανσης	ΚΤ περίοδος ψύξης	ΗΣΘ	Φ/Β
6	TME16	TME13	TME09	TME01	TME03
7	TME01	TME01	TME13	TME02	TME07
8	TME09	TME16	TME06	TME08	TME11
9	TME13	TME15	TME10	TME05	TME12
10	TME06	TME14	TME03	TME09	TME09
11	TME05	TME02	TME15	TME11	TME13
12	TME02	TME10	TME07	TME03	TME08
13	TME10	TME11	TME12	TME06	TME01
14	TME17	TME05	TME02	TME04	TME04
15	TME03	TME06	TME16	TME07	TME06
16	TME07	TME17	TME08	TME16	TME05
17	TME08	TME07	TME17	TME13	TME17

TME βασισμένα στη μέθοδο Sandia
TME βασισμένα στη μέθοδο Danish
TME βασισμένα στη μέθοδο Festa-Ratto
TME που προέρχεται από τις μέσες τιμές των ιστορικών δεδομένων

Ο Skeiker (2007) σύγκρινε 6 μεθόδους συγκρότησης ΤΜΕ (Sandia, Danish, Festa-Ratto, Crow, Miquel-Bilbao, Gazela-Mathioulakis) τα οποία δημιουργήθηκαν από ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα 10 ετών της περιοχής της Δαμασκού. Τα ΤΜΕ αξιολογήθηκαν συγκρίνοντας τα ενεργειακά αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός κτηρίου 72,3m^2 για κάθε ΤΜΕ, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα. Το ΤΜΕ, που πλησίασε περισσότερο τα αποτελέσματα της χρονοσειράς των ιστορικών δεδομένων, ήταν αυτό που προέκυψε με την εφαρμογή της μεθόδου Sandia όπως τροποποιήθηκε από τους Pissimanis et al. (1988).

Σε αντίστοιχη εργασία, οι Janjai & Deeyai (2009) σύγκριναν τρεις διαφορετικές μεθόδους (Sandia, Danish και Festa-Ratto) συγκρότησης ΤΜΕ τα οποία δημιουργήθηκαν από ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα δεκαετίας σε 4 τοποθεσίες της Ταϊλάνδης. Η αξιολόγηση των ΤΜΕ πραγματοποιήθηκε με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης δύο συστημάτων παραγωγής ζεστού νερού χρήσης επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών 200 m^2 και 6,5 m^2, και δύο Φ/Β μονάδων επιφάνειας 244 m^2 και 5,8 m^2. Από τη σύγκριση των ΤΜΕ και των ιστορικών δεδομένων προέκυψε ότι και οι τρεις μέθοδοι δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα με ποσοστά σφάλματος μικρότερα του 2%. Από τη σύγκριση οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι δεν μπορεί να υπάρξει σαφής επιλογή μιας εκ των τριών μεθόδων, καθώς εμφανίζουν διαφορετική σειρά κατάταξης ανάλογα με το σύστημα το οποίο προσομοιώνεται και ανάλογα και με την περιοχή στην οποία εφαρμόζεται. Ως εκ τούτου, προτάθηκε η μέθοδος Sandia καθώς είναι απλούστερη στην εφαρμογή σε σχέση με τις άλλες.

Η επιλογή της προσομοίωσης ενός ενεργειακού συστήματος για την αποδοχή ή απόρριψη του ΤΜΕ δεν είναι ιδιαίτερα αντικειμενική, καθώς τα αποτελέσματα εξαρτώνται καθαρά από τα χαρακτηριστικά του συστήματος, το οποίο χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Για παράδειγμα, η προσομοίωση μιας Φ/Β εγκατάστασης η οποία αποτελείται από Φ/Β πλαίσια με υψηλό θερμοκρασιακό συντελεστή και μιας αντίστοιχης με Φ/Β πλαίσια χαμηλού θερμοκρασιακού συντελεστή, παράγει διαφορετικά αποτελέσματα. Κατά το ίδιο σκεπτικό, η προσομοίωση κτηρίων ίδιας επιφάνειας, αλλά με διαφορετικό αριθμό και είδος ανοιγμάτων, παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στην ταχύτητα του ανέμου. Συμπερασματικά, όταν η επιλογή του ΤΜΕ βασίζεται στα αποτελέ-

σματα που προκύπτουν από την προσομοίωση ενός ενεργειακού συστήματος, τότε το καθιστά αξιόπιστο κυρίως για την εφαρμογή του στο συγκεκριμένο σύστημα ή παρόμοια ενεργειακά συστήματα.

Στην Ελλάδα είναι η πρώτη φορά που δημιουργούνται ΤΜΕ για μεγάλο αριθμό περιοχών. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος που να είναι ευρέως διαδεδομένη, να έχει ελεγχθεί ως προς την καταλληλόλητά της στο ελληνικό κλίμα και τα δεδομένα που χρησιμοποιεί να είναι διαθέσιμα. Από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα επιλέχθηκε η εφαρμογή της μεθόδου Sandia όπως αυτή τροποποιήθηκε από τους Pissimanis et al. (1988) και τους Argiriou et al. (1999) καθώς αποτελεί την πλέον καταξιωμένη μέθοδο συγκρότησης ΤΜΕ. Η μέθοδος Sandia έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ΤΜΕ στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και πάνω σε αυτή έχει στηριχθεί η δημιουργία βάσης ΤΜΕ σε μεγάλο αριθμό περιοχών στον κόσμο (Πίνακας 4.Ι). Σύμφωνα με τις μελέτες των Freeman (1979), Crow (1981), Siurna et al. (1984), Menicucci & Fernandez (1988), Skeiker (2007) και Janjai & Deeyai (2009) η μέθοδος αυτή παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία κατά κανόνα χρησιμοποιούνται στη σύνθεση του ΤΜΕ, είναι η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα ταχύτητας ανέμου για τη δεκαπενταετία 1985-1999 και για τους 39 σταθμούς του δικτύου της ΕΜΥ στους οποίους πραγματοποιείται η εφαρμογή. Κατά τη διαδικασία της συγκρότησης των ΤΜΕ χρησιμοποιείται η ατμοσφαιρική πίεση αντί της ταχύτητας του ανέμου, καθώς η βαρομετρική δομή της ατμόσφαιρας καθορίζει τα συστήματα καιρού και αποτελεί βασικό παράγοντα στη διαμόρφωση των καιρικών συνθηκών που επικρατούν σε μια περιοχή. Τα ΤΜΕ που θα προκύψουν θα περιέχουν χρονοσειρές με ωριαίες τιμές των μεγεθών θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, άμεσης, διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Η επιλογή της βαρύτητας της κάθε παραμέτρου έλαβε υπόψη τα δεδομένα της βιβλιογραφίας αλλά και την ευαισθησία των ενεργειακών συστημάτων σε κάθε παράμετρο. Οι σταθμικοί συντελεστές κατανέμονται κατά 50% στην ηλιακή ακτινοβολία, 18% στη θερμοκρασία αέρα, 18% στη σχετική υγρασία και 14% στην ατμοσφαιρική πίεση. Στις μέσες ημερήσιες τιμές της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας αέρα, αποδόθηκε το 50% της βαρύτητας της κάθε παραμέτρου. Αναλυτικότερα οι παράμετροι, οι δείκτες και οι σταθμικοί συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν εμφανίζονται στον Πίνακα 4.VI.

Πίνακας** 4.VI: **Σταθμικοί συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ΤΜΕ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ	ΣΤΑΘΜΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ
Θερμοκρασία αέρα	*Μέγιστη*	3
Θερμοκρασία αέρα	*Ελάχιστη*	3
Θερμοκρασία αέρα	*Μέση*	9
Θερμοκρασία αέρα	*Εύρος*	3
Σχετική υγρασία	*Μέγιστη*	3
Σχετική υγρασία	*Ελάχιστη*	3
Σχετική υγρασία	*Μέση*	9
Σχετική υγρασία	*Εύρος*	3
Ατμοσφαιρική πίεση	*Μέγιστη*	5
Ατμοσφαιρική πίεση	*Ελάχιστη*	3
Ατμοσφαιρική πίεση	*Μέση*	3
Ατμοσφαιρική πίεση	*Εύρος*	3

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ	ΣΤΑΘΜΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ
Ολική ακτινοβολία	*Άθροισμα*	25
Άμεση ακτινοβολία	*Άθροισμα*	25
ΑΘΡΟΙΣΜΑ		100

4.5 Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα, που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ΤΜΕ, προέρχονται από χρονοσειρές ωριαίων τιμών της περιόδου 1985-1999 από 39 σταθμούς του δικτύου της ΕΜΥ. Οι χρονοσειρές αυτές περιέχουν ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Οι χρονοσειρές συμπληρώθηκαν με το μέγεθος της άμεσης ακτινοβολίας I_b στο οριζόντιο επίπεδο, η οποία υπολογίζεται ως:

$$I_b = I - I_d \tag{4.23}$$

όπου: I, η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο,
I_d, η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια.

Καθώς το παραγόμενο ΤΜΕ αποτελείται από ανεξάρτητους μήνες, και προς αποφυγή επιλογής μηνών που περιέχουν ελλείπουσες τιμές, αφαιρέθηκαν από τις χρονοσειρές οι μήνες που παρουσίαζαν ελλιπή δεδομένα. Στους Πίνακες 4.VII και 4.VIII παρουσιάζεται η πληρότητα των χρονοσειρών των σταθμών της Καστοριάς, η οποία ανήκει στην ομάδα σταθμών με το μεγαλύτερο αριθμό, καθώς και της Σούδας η οποία ανήκει στην ομάδα σταθμών με το μικρότερο αριθμό μηνών στη χρονοσειρά δεδομένων του. Για το σταθμό της Καστοριάς η επιλογή των μηνών Ιανουαρίου-Μαΐου θα γίνει από 15 μήνες, ενώ των μηνών Ιουνίου-Δεκέμβριου από 14 μήνες. Κατ' αντιστοιχία, στο σταθμό της Σούδας η επιλογή του Ιανουαρίου θα πραγματοποιηθεί από σύνολο 15 Ιανουάριων, Ιουνίου και Ιουλίου από 13 και οι υπόλοιποι μήνες του έτους θα επιλεγούν από χρονοσειρές 14 μηνών.

Πίνακας** 4.VII: **Πίνακας πληρότητας ανά μήνα της ωριαίας χρονοσειράς του σταθμού Καστοριάς

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1985	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1986	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1987	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1988	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1989	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1990	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1991	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1992	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1993	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1994	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1995	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1996	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1997	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1998	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Σύνολο 15ετίας	*15*	*15*	*15*	*15*	*15*	*14*	*14*	*14*	*14*	*14*	*14*	*14*

Πίνακας** 4.VIII: **Πληρότητα ανά μήνα της χρονοσειράς του σταθμού της Σούδας

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
1985	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1986	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1987	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1988	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1989	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1990	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1991	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
1992	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1993	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1994	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1995	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1996	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1997	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1998	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Σύνολο 15ετίας	*15*	*14*	*14*	*14*	*14*	*13*	*13*	*14*	*14*	*14*	*14*	*14*

Πλήρη εικόνα του αριθμού των μηνών που συμμετέχουν στη διαδικασία επιλογής ΤΜΜ παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.IX όπου με κόκκινο χρώμα χαρακτηρίζονται οι μήνες που θα επιλεγούν από 13 μηνιαίες χρονοσειρές. Οι παρατηρούμενες ελλείψεις κατά τους μήνες Ιούνιο έως και Δεκέμβριο, καθώς επίσης και το Φεβρουάριο οφείλονται σε μερική ή και ολική έλλειψη δεδομένων ηλιοφάνειας της πρωτογενούς χρονοσειράς μετρήσεων για τη χρονική περίοδο από Ιούνιο 1993 έως Φεβρουάριο 1994. Συνολικά κάθε παράμετρος της χρονοσειράς κάθε σταθμού αριθμεί από 122.992 έως 126.336 τιμές. Ως εκ τούτου, ο αριθμός δεδομένων εισαγωγής στη διαδικασία συγκρότησης ΤΜΕ ανά σταθμό κυμαίνεται μεταξύ 609.960 και 631.680 τιμές.

Πίνακας** 4.IX: **Πληρότητα της βάσης δεδομένων εισαγωγής στη διαδικασία επιλογής ΤΜΕ

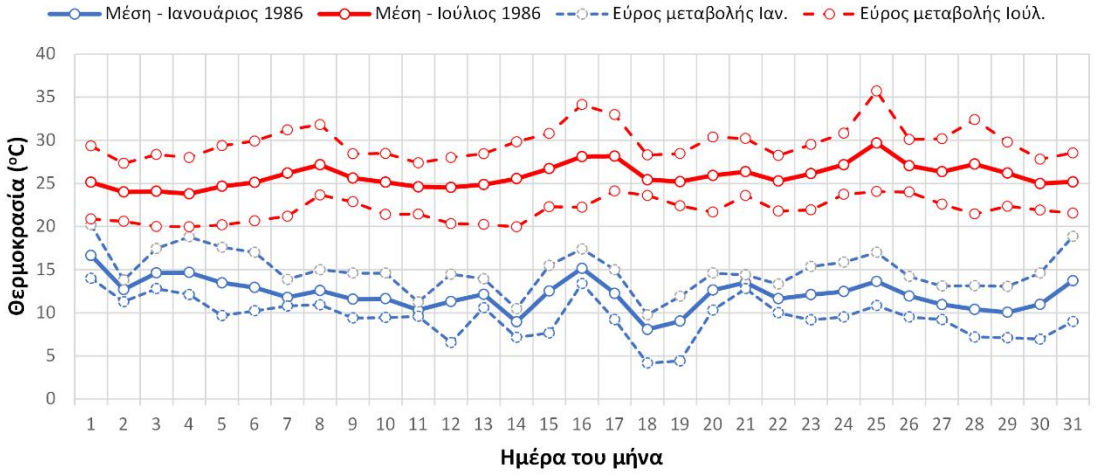
Σταθμός	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Σέρρες	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Καστοριά	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Μίκρα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Αλεξανδρούπολη	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	13
Κέρκυρα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Ιωάννινα	15	14	15	15	15	14	14	14	13	13	13	13
Λάρισα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Λήμνος	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Άρτα	15	14	15	15	15	14	14	14	13	13	13	13
Αγχίαλος	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Μυτιλήνη	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	13
Αγρίνιο	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Αλίαρτος	14	13	14	14	14	13	14	14	14	14	14	13
Λαμία	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Ανδραβίδα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Σκύρος	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Άραξος	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Τανάγρα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Χίος	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Πύργος	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14

Σταθμός	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Τρίπολη	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Ελληνικό	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Ζάκυνθος	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Σάμος	15	14	14	14	14	13	13	14	14	14	14	14
Άργος	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Καλαμάτα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Νάξος	15	14	14	14	14	13	13	14	14	14	14	14
Μεθώνη	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Σπάτα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Κύθηρα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Θήρα	15	15	14	14	14	13	13	14	14	14	14	14
Σούδα	15	14	14	14	14	13	13	14	14	14	14	14
Ρόδος	15	14	15	15	14	13	13	14	14	14	14	13
Ηράκλειο	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Ιεράπετρα	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Σητεία	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Ρέθυμνο	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Τυμπάκι	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
Καστέλι	15	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14

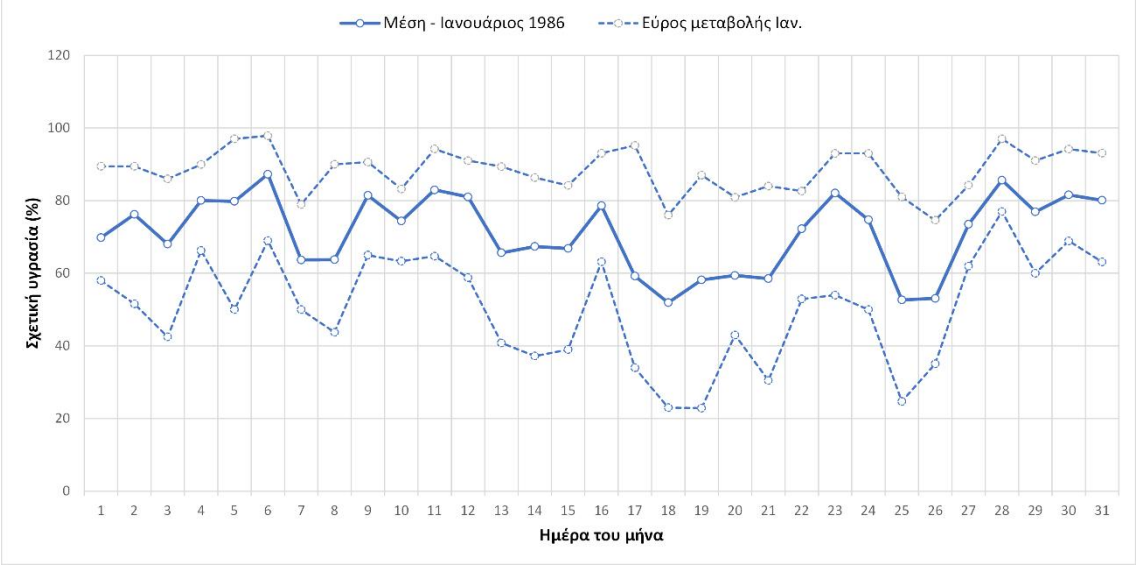
4.6 Μεθοδολογία συγκρότησης ΤΜΕ

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκρότηση του ΤΜΕ είναι η μέθοδος Sandia όπως αυτή τροποποιήθηκε από τους Pissimanis et al. (1988) και Argiriou et al. (1999). Αρχικά υπολογίστηκαν οι ημερήσιοι δείκτες των παραμέτρων που απαιτούνται στη διαδικασία. Δημιουργήθηκαν ημερήσιες χρονοσειρές απόλυτης μέγιστης, μέσης, απόλυτης ελάχιστης και εύρους μεταβολής θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης, καθώς επίσης και τα ημερήσια αθροίσματα ολικής και άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για κάθε έναν από τους επι-

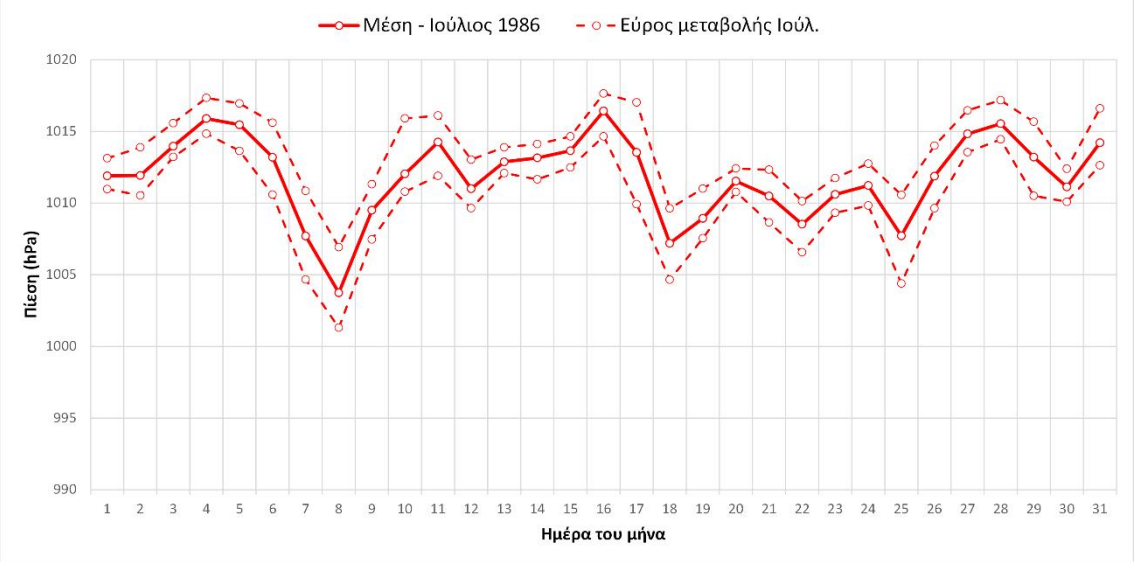
λεγμένους σταθμούς της ΕΜΥ. Συνολικά δημιουργήθηκαν 546 ημερήσιες χρονοσειρές (14 χρονοσειρές ανά σταθμό). Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται για το σταθμό της Αγχιάλου οι ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας αέρα (Σχήμα 4.7), σχετικής υγρασίας (Σχήμα 4.8) και ατμοσφαιρικής πίεσης (Σχήμα 4.9), ενώ στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται τα ημερήσια αθροίσματα των τιμών της άμεσης και ολικής ακτινοβολίας για τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο του 1986.



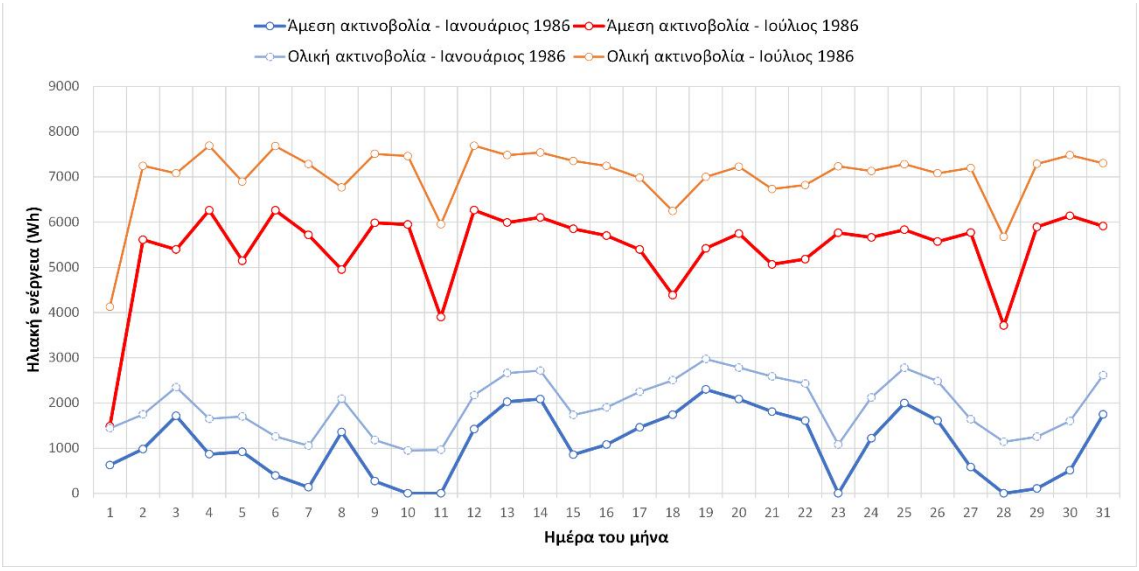
***Σχήμα** 4.7: **Μεταβολή απόλυτης ελάχιστης, μέσης και απόλυτης μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας αέρα στο σταθμό Αγχιάλου τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο** 1986*



***Σχήμα** 4.8: **Μεταβολή απόλυτης ελάχιστης, μέσης και απόλυτης μέγιστης ημερήσιας σχετικής υγρασίας στο σταθμό Αγχιάλου το μήνα Ιανουάριο** 1986*



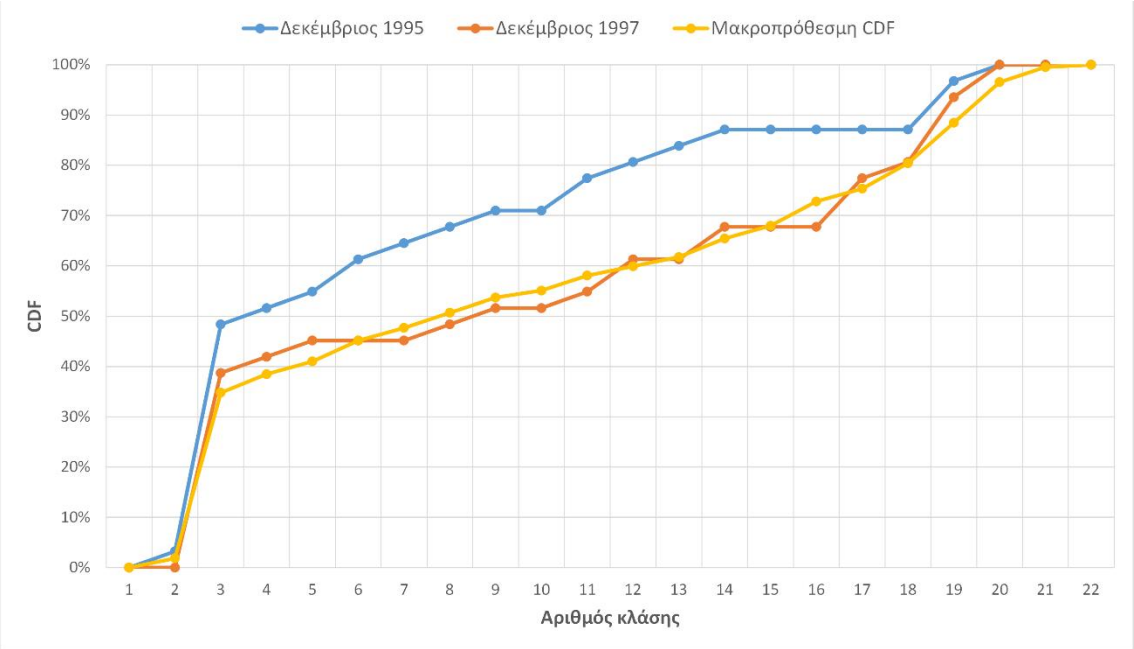
***Σχήμα** 4.9: **Μεταβολή απόλυτης ελάχιστης, μέσης και απόλυτης μέγιστης ημερήσιας ατμοσφαιρικής πίεσης στο σταθμό Αγχιάλου το μήνα Ιανουάριο** 1986*



***Σχήμα** 4.10: **Μεταβολή ημερήσιας άμεσης και ολικής ηλιακής ενέργειας στο σταθμό Αγχιάλου τους μήνες Ιανουάριο και Ιούλιο** 1986*

Μετά την προετοιμασία των ημερήσιων δεικτών των δεδομένων εισόδου, υπολογίστηκαν οι βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες συναρτήσεις αθροιστικής κατανομής για κάθε ημερήσιο δείκτη x σύμφωνα με τη σχέση 4.17 με αριθμό κλάσεων n=31. Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού της CDF (σχέση 4.17) ολικής ακτινοβολίας για το μήνα Δεκέμβριο στο σταθμό της Αγχιάλου. Φαίνεται χαρακτηριστικά η σύγκλιση των τιμών του Δεκεμβρίου 1997 με τις αντίστοιχες μακροπρόθεσμες τιμές (που περιλαμβάνουν τη χρονοσειρά όλων των Δεκεμβρίων με ημερήσιες τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο Δεκέμβριος του 1995 ήταν ο μήνας με τη μεγαλύτερη απόσταση από τις μακροπρόθεσμες τιμές και ως εκ τούτου ήταν ο Δεκέμβριος που παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή του στατιστικού συντελεστή Finkelstein-

Schäfer (FS). Αντίστοιχα, ο Δεκέμβριος 1997 ήταν ο μήνας που παρουσίασε τη μεγαλύτερη σύγκλιση στις μακροπρόθεσμες τιμές της CDF και κατά συνέπεια ο Δεκέμβριος με τη μικρότερη τιμή του στατιστικού συντελεστή FS.



Σχήμα** 4.11: **Τιμές συνάρτησης αθροιστικής κατανομής ολικής ακτινοβολίας για το μήνα Δεκέμβριο στο σταθμό Αγχιάλου

Με τη βοήθεια της σχέσης 4.18 υπολογίστηκαν οι μέσες απόλυτες διαφορές μεταξύ των βραχυπρόθεσμων και των μακροπρόθεσμων τιμών CDF οι οποίες αποτελούν και το στατιστικό συντελεστή FS. Ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται για κάθε ημερήσιο δείκτη κάθε παραμέτρου για κάθε μήνα του συνόλου της 15ετίας. Συνολικά σε κάθε σταθμό ΕΜΥ υπολογίζονται 2520 τιμές συντελεστή FS. Στη συνέχεια, για κάθε μήνα της 15-ετίας υπολογίζεται το σταθμικό άθροισμα WS από τη σχέση 4.19 λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές βαρύτητας που έχουν επιλεγεί (Πίνακας 4.VI). Παράγεται με αυτό τον τρόπο για κάθε σταθμό πίνακας σταθμικών αθροισμάτων των στατιστικών συντελεστών FS (Πίνακας 4.X). Για κάθε μήνα επιλέγονται τα 5 έτη στα οποία ο μήνας παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές σταθμικών αθροισμάτων (μπλε χρώμα). Με πράσινο φόντο απεικονίζεται η μικρότερη τιμή σταθμικού αθροίσματος που εμφανίζει ο μήνας, ενώ τα κενά κελιά του πίνακα αφορούν περιόδους με έλλειψη δεδομένων.

Πίνακας** 4.X: **Σταθμικά αθροίσματα** WS **του σταθμού Αγχιάλου

WFS	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1985	0,053	0,056	0,103	0,033	0,029	0,041	0,038	0,043	0,036	0,038	0,035	0,069
1986	0,044	0,089	0,117	0,064	0,025	0,038	0,025	0,029	0,030	0,046	0,033	0,053
1987	0,046	0,087	0,076	0,038	0,041	0,016	0,033	0,023	0,041	0,103	0,042	0,027
1988	0,086	0,035	0,046	0,073	0,024	0,031	0,035	0,026	0,026	0,049	0,050	0,069
1989	0,071	0,049	0,038	0,075	0,028	0,033	0,028	0,041	0,025	0,059	0,034	0,028
1990	0,085	0,086	0,144	0,030	0,030	0,034	0,022	0,026	0,033	0,036	0,041	0,058
1991	0,039	0,076	0,061	0,088	0,038	0,022	0,043	0,062	0,027	0,056	0,031	0,059
1992	0,057	0,078	0,045	0,025	0,077	0,065	0,041	0,035	0,025	0,059	0,080	0,045
1993	0,106	0,053	0,048	0,023	0,040							
1994	0,036		0,083	0,036	0,050	0,038	0,021	0,024	0,082	0,060	0,040	0,071
1995	0,045	0,051	0,058	0,040	0,070	0,025	0,028	0,039	0,051	0,068	0,076	0,092

WFS	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1996	0,128	0,092	0,120	0,036	0,028	0,034	0,025	0,023	0,023	0,063	0,064	0,053
1997	0,047	0,072	0,050	0,047	0,108	0,024	0,038	0,023	0,040	0,044	0,099	0,021
1998	0,048	0,056	0,069	0,046	0,048	0,037	0,055	0,028	0,030	0,048	0,032	0,058
1999	0,028	0,033	0,032	0,038	0,032	0,023	0,036	0,030	0,080	0,050	0,072	0,044

Το επόμενο στάδιο αφορά τη διαδικασία επιλογής του ΤΜΜ με τον υπολογισμό της ρίζας της μέσης τετραγωνικής διαφοράς (RMSD) των ωριαίων τιμών των παραμέτρων καθενός από τους πέντε υποψήφιους μήνες, από την αντίστοιχη μέση τιμή των μακροχρόνιων τιμών τους με εφαρμογή της σχέσης 4.20. Η σχέση 4.20 των Pissimanis et al. (1988) αναφέρεται στον υπολογισμό της RMSD για την ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, για την εφαρμογή της τροποποίησης των Argiriou et al. (1999) χρησιμοποιείται κατ' αντιστοιχία και στις υπόλοιπες παραμέτρους. Για κάθε παράμετρο υπολογίζεται βάσει της σχέσης 4.21 η βαθμολογία για κάθε έναν από τους 5 καλύτερους μήνες, σύμφωνα με τις τιμές των σταθμικών αθροισμάτων FS, για να προκύψει τελικά η σύνθετη βαθμολογία από τη σχέση 4.22 εφαρμόζοντας τους συνολικούς σταθμικούς συντελεστές για κάθε παράμετρο (Πίνακας 4.XI).

Πίνακας** 4.XI: **Σταθμικοί συντελεστές ανά παράμετρο

Παράμετρος	**Σταθμικός συντελεστής**
Άμεση ηλιακή ακτινοβολία	0,25
Ολικής ηλιακή ακτινοβολία	0,25
Θερμοκρασία αέρα	0,18
Σχετική υγρασία	0,18
Ατμοσφαιρική πίεση	0,14
Γενικό Άθροισμα	1,00

Ο Πίνακας 4.XII παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα όπως προέκυψαν για το σταθμό της Αγχιάλου. Κάθε μήνας έχει ταξινομηθεί από το έτος που εμφανίζει το μικρότερο σταθμικό άθροισμα WS προς το έτος που εμφανίζει το μεγαλύτερο σταθμικό άθροισμα WS. Ως εκ τούτου, το πρώτο έτος που εμφανίζεται σε κάθε μήνα, είναι αυτό στο οποίο η τιμή του σταθμικού αθροίσματος WS είναι η μικρότερη. Με πράσινο φόντο παρουσιάζονται οι μήνες που τελικά επιλέγησαν για τη συγκρότηση του ΤΜΕ. Οι τιμές SS του πίνακα αφορούν τη βαθμολογία, όπως αυτή προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσης 4.22.

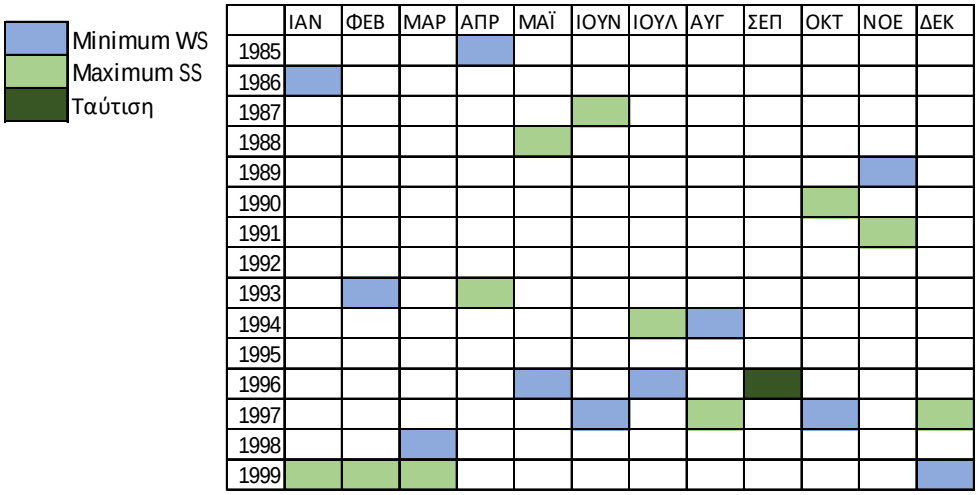
Πίνακας** 4.XII: **Τελική βαθμολογία και επιλογή ΤΜΜ για το σταθμό Αγχιάλου

ΜΗΝΑΣ	ΕΤΟΣ	SS	ΜΗΝΑΣ	ΕΤΟΣ	SS	ΜΗΝΑΣ	ΕΤΟΣ	SS
ΙΑΝ	1999	0,1791	ΜΑΙ	1988	0,1886	ΣΕΠ	1996	0,1769
	1994	0,1812		1986	0,1915		1989	0,1973
	1991	0,1816		1996	0,1866		1992	0,1813
	1986	0,1726		1989	0,1908		1988	0,1924
	1995	0,1809		1985	0,1987		1991	0,1963
ΦΕΒ	1999	0,1655	ΙΟΥΝ	1987	0,1865	ΟΚΤ	1990	0,1874
	1988	0,1884		1991	0,1843		1985	0,1788
	1989	0,1691		1999	0,1966		1997	0,1588
	1995	0,1849		1997	0,1833		1986	0,1913

ΜΗΝΑΣ	ΕΤΟΣ	SS	ΜΗΝΑΣ	ΕΤΟΣ	SS	ΜΗΝΑΣ	ΕΤΟΣ	SS
	1993	0,1618		1995	0,1994		1998	0,1867
ΜΑΡ	1999	0,1810	ΙΟΥΛ	1994	0,1844	ΝΟΕ	1991	0,2000
	1989	0,1856		1990	0,1809		1998	0,1712
	1992	0,1784		1996	0,1717		1986	0,1797
	1988	0,1689		1986	0,1845		1989	0,1692
	1993	0,1715		1995	0,1977		1985	0,1807
ΑΠΡ	1993	0,1934	ΑΥΓ	1997	0,1909	ΔΕΚ	1997	0,1795
	1992	0,1841		1987	0,1929		1987	0,1841
	1990	0,1821		1996	0,1941		1989	0,1728
	1985	0,1738		1994	0,1869		1999	0,1707
	1994	0,1890		1990	0,1918		1992	0,1878

Αντίστοιχα, στον Πίνακα 4.XIII αντιπαραβάλλονται οι μήνες που εμφανίζουν τη μικρότερη τιμή σταθμικού αθροίσματος WS με τους μήνες που τελικά επιλέγονται ως ΤΜΜ στο σταθμό της Αγχιάλου. Από το σχήμα συμπεραίνεται ότι οι χρονοσειρές δεδομένων των ετών 1992, 1995 και 1998 εμφανίζουν ακραίες τιμές σε σχέση με το τυπικό έτος της 15-ετίας καθώς οι τιμές WS και η σύνθετη βαθμολογία SS τα κατέστησαν μη επιλέξιμα. Επίσης, οι χρονοσειρές των ετών 1987, 1990 και 1991 παρόλο που κάποιοι από τους μήνες τους είχαν τις μικρότερες τιμές WS από τα υπόλοιπα έτη, παρουσίασαν μικρότερη σύνθετη βαθμολογία και δεν επιλέγησαν μήνες από αυτά. Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας προκύπτουν οι ΤΜΜ (Πίνακας 4.XIV), οι οποίοι τελικά συγκροτούν το ΤΜΕ.

***Πίνακας** 4.XIII: **Μήνες που εμφανίζουν ελάχιστο σταθμικό άθροισμα** WS **σε αντιστοιχία με τους μήνες που εμφανίζουν την υψηλότερη σύνθετη βαθμολογία** SS*

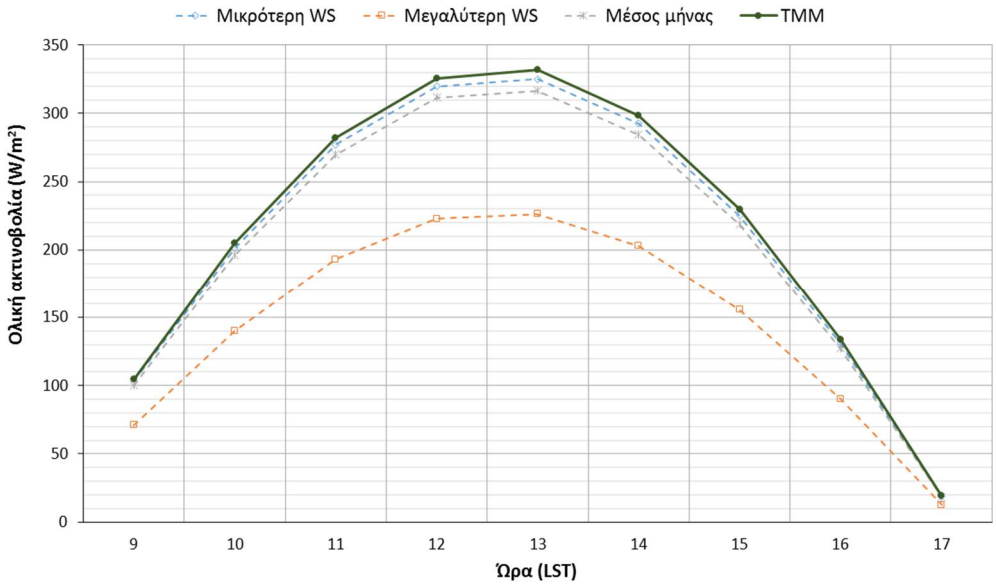


Πίνακας** 4.XIV: **Επιλογή μηνών που συγκροτούν το ΤΜΕ για το σταθμό Αγχιάλου

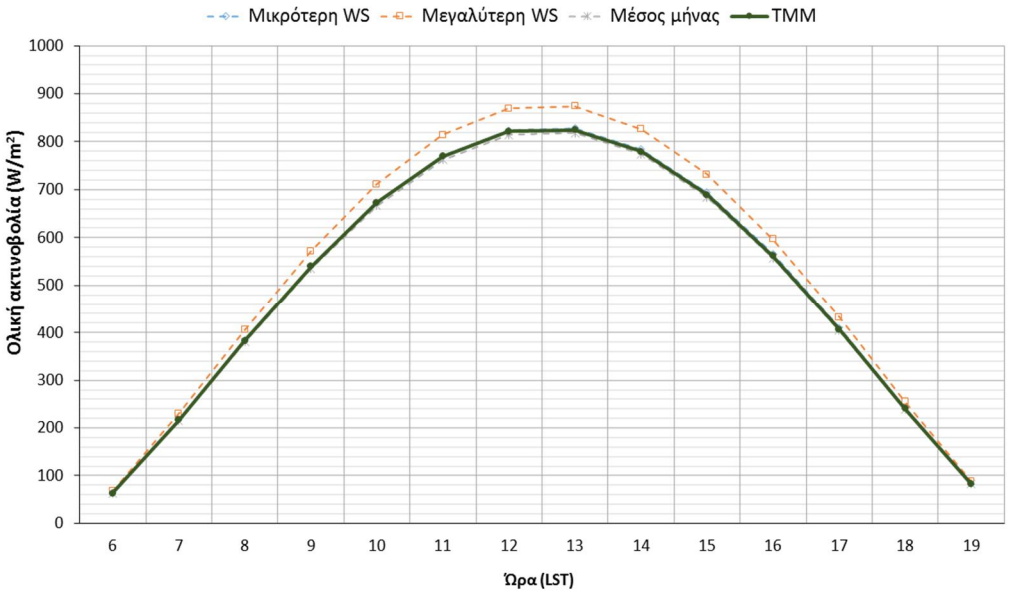
ΜΗΝΑΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
ΕΤΟΣ	1986	1993	1988	1985	1996	1997	1996	1994	1996	1997	1989	1999

Συγκρίνοντας τη μέση ενδοημερήσια μεταβολή της ολικής ακτινοβολίας για το μήνα Ιανουάριο από τέσσερα διαφορετικά έτη (Σχήμα 4.12) φαίνεται ότι ο Ιανουάριος που τελικά επιλέγη ως ΤΜΜ προσεγγίζει άριστα τον Ιανουάριο με τη μικρότερη τιμή WS καθώς επίσης και το μέσο Ιανουάριο

της χρονοσειράς. Ο Ιανουάριος με τη μικρότερη τιμή WS είναι σαφές ότι απέχει σημαντικά από τους υπόλοιπους, καθιστώντας τη διαδικασία επιλογής των ΤΜΜ αξιόπιστη.

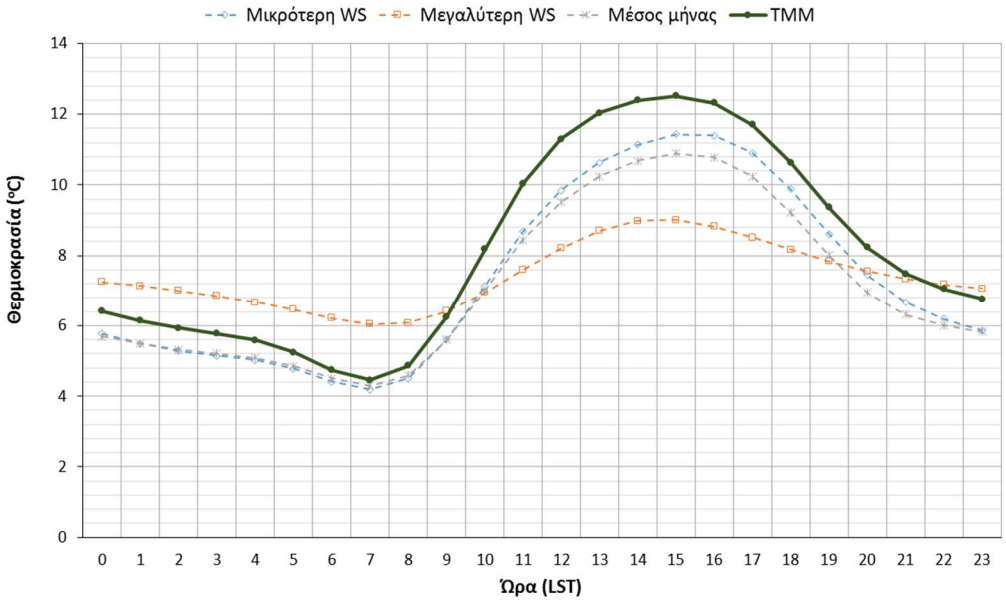


Σχήμα** 4.12: **Ενδοημερήσια μεταβολή ολικής ακτινοβολίας για το μήνα Ιανουάριο στο σταθμό Αγχιάλου

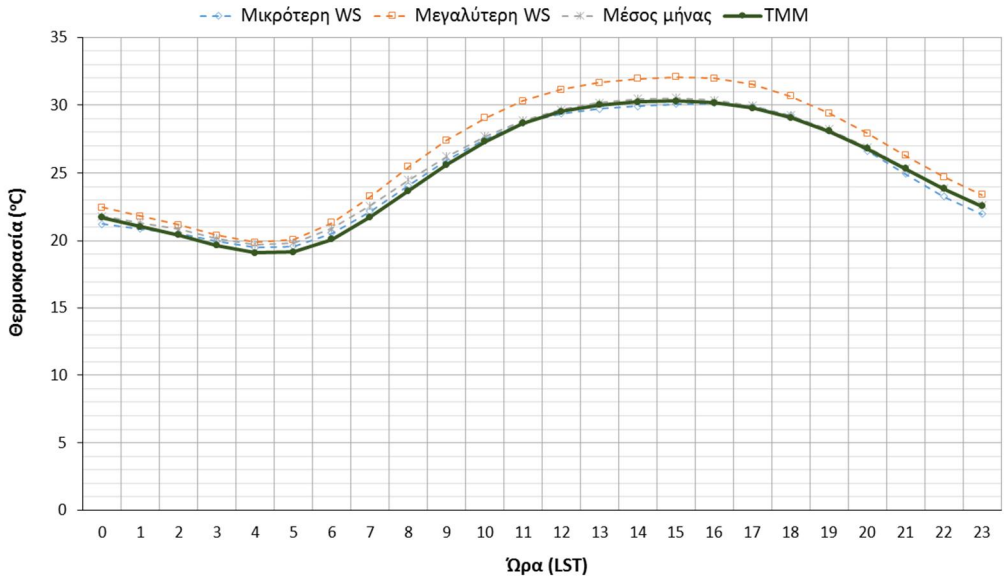


Σχήμα** 4.13: **Ενδοημερήσια μεταβολή ολικής ακτινοβολίας για το μήνα Ιούλιο στο σταθμό Αγχιάλου

Κατ' αντιστοιχία, στο Σχήμα 4.13 απεικονίζονται τα αποτελέσματα για το μήνα Ιούλιο, όπου η μέση ενδοημερήσια μεταβολή των Ιουλίων με τη μικρότερη τιμή WS, του ΤΜΜ και του μέσου Ιουλίου σχεδόν ταυτίζονται. Παράλληλα, η ενδοημερήσια μεταβολή της ολικής ακτινοβολίας του Ιουλίου με τη μικρότερη τιμή WS δεν απέχει σημαντικά από τις υπόλοιπες, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο μήνας Ιούλιος, τουλάχιστον για τη συγκεκριμένη περίοδο μελέτης (1985-1999), δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές από έτος σε έτος.



Σχήμα** 4.14: **Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα για το μήνα Ιανουάριο στο σταθμό Αγχιάλου

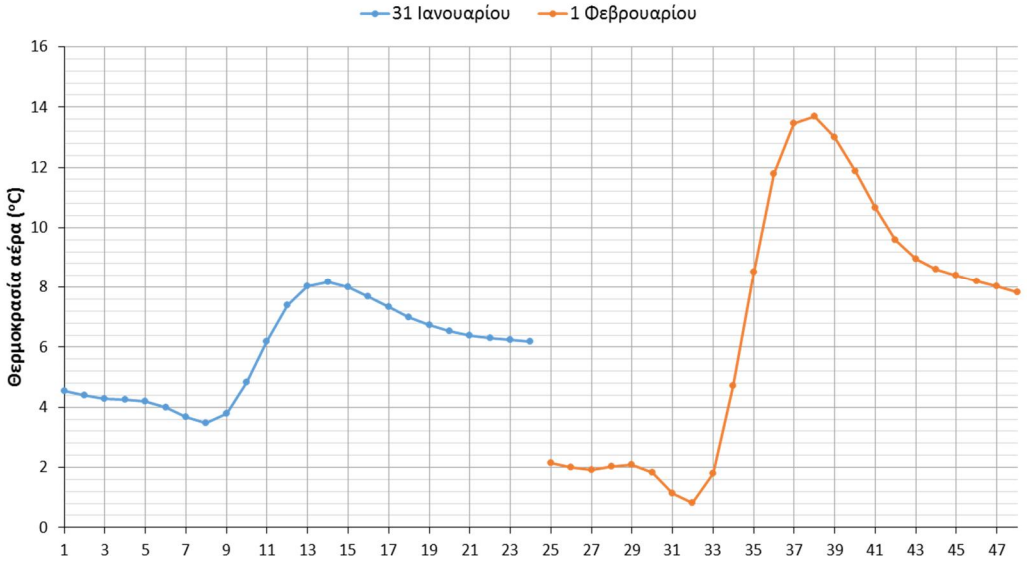


Σχήμα** 4.15: **Ενδοημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας αέρα για το μήνα Ιούλιο στο σταθμό Αγχιάλου

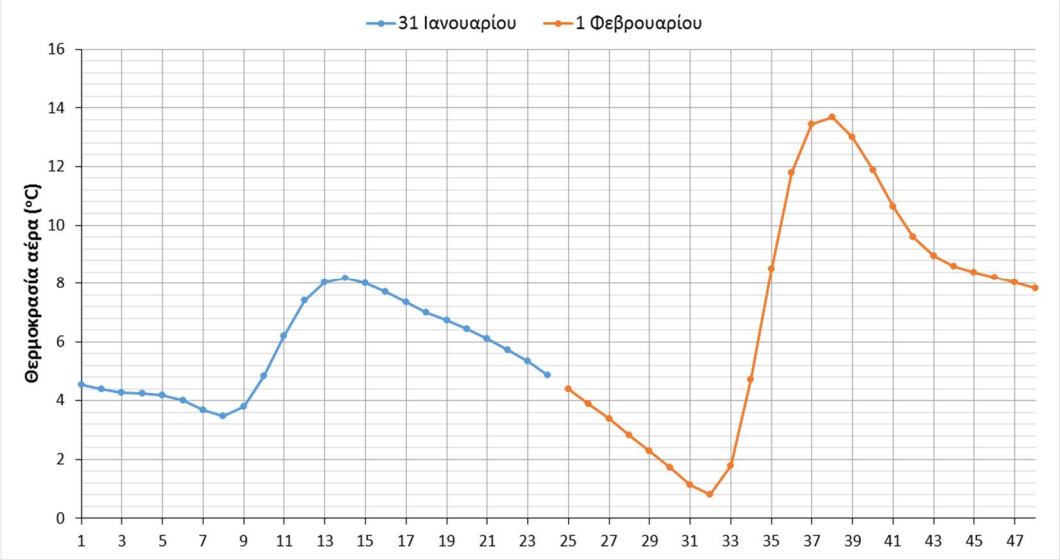
Η ίδια εικόνα εμφανίζεται και κατά τη μελέτη της μέσης ενδοημερήσιας μεταβολής της θερμοκρασίας αέρα για τους μήνες Ιανουάριο (Σχήμα 4.14) και Ιούλιο (Σχήμα 4.15). Από τα σχήματα διαπιστώνεται ότι κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών οι διαφορετικοί μήνες παρουσιάζουν μεγαλύτερη σύγκλιση σε σχέση με τις ώρες της ημέρας. Επίσης, είναι εμφανής η απόκλιση της μέσης ενδοημερήσιας μεταβολής του μήνα με τη μεγαλύτερη τιμή WS όσον αφορά στον Ιανουάριο, καθώς η μέση μέγιστη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι 9^{o}C ενώ στους υπόλοιπους μήνες κυμαίνεται σε 11-13^{o}C. Η απόκλιση αυτή, βέβαια, μειώνεται σημαντικά το μήνα Ιούλιο, όπου η μέση μέγιστη θερμοκρασία αέρα τον Ιούλιο με τη μεγαλύτερη τιμή WS διαφέρει μόλις 1-2^{o}C από τους υπόλοιπους.

Καθώς οι ΤΜΜ, οι οποίοι επιλέγονται, προκύπτουν από διαφορετικά έτη, στην ένωση μεταξύ των διαφορετικών μηνών εμφανίζονται ασυνέχειες (Σχήμα 4.16) για τις οποίες απαιτείται εφαρμογή μεθόδου εξομάλυνσης στο τέλος του προηγούμενου και στην αρχή του επόμενου μήνα.

Η εφαρμοσθείσα μέθοδος εξομάλυνσης ήταν η παρεμβολή με συναρτήσεις splines τρίτου βαθμού στις πέντε τελευταίες και τις πέντε πρώτες ώρες κάθε ΤΜΜ (Σχήμα 4.17). Η παρέμβαση αυτή ήταν απαραίτητη μόνο για τις χρονοσειρές της θερμοκρασίας αέρα και σχετικής υγρασίας καθώς η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών είναι μηδενική.



Σχήμα** 4.16: **Μεταβολή θερμοκρασίας κατά την ένωση δύο ΤΜΜ για το σταθμό Αγχιάλου



Σχήμα** 4.17: **Παρεμβολή ομαλοποίησης της μεταβολής θερμοκρασίας κατά την ένωση δύο ΤΜΜ για το σταθμό Αγχιάλου

4.7 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σύγκριση των χρονοσειρών της ολικής ακτινοβολίας των ΤΜΕ με τις αντίστοιχες χρονοσειρές των δεδομένων της δεκαπενταετίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας ως μέτρο του βαθμού συσχέτισης του ΤΜΕ με τις τιμές από τις οποίες προήλθε.

Αρχικά υπολογίστηκε ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) της ολικής ακτινοβολίας ο οποίος σύμφωνα με τα αποτελέσματα εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες του 85% σε όλους τους σταθμούς, χωρίς έντονες μεταβολές μεταξύ των σταθμών (Πίνακας 4.XV). Τις μικρότερες αριθμητικές τιμές συντελεστή προσδιορισμού εμφανίζουν οι σταθμοί της Βορείου Ελλάδας, Σερρών, Καστοριάς και Μίκρας ενώ οι σταθμοί της Νοτίου Ελλάδας, Ρόδου, Ιεράπετρας και Τυμπακίου έχουν τις μεγαλύτερες αριθμητικές τιμές. Η μέση τιμή των αριθμητικών τιμών του R^2 που προέκυψαν είναι 0,90 και η τυπική απόκλιση 0,022.

Ωστόσο, ο συντελεστής προσδιορισμού αποτελεί μια ένδειξη εάν υπάρχει σχέση-συσχέτιση μεταξύ των τιμών του ΤΜΕ και των χρονοσειρών 15-ετίας, χωρίς όμως να δίνει πληροφορίες για το πόσο «κοντά» είναι οι ωριαίες τιμές των δύο χρονοσειρών που συγκρίνει. Η σχέση-συσχέτιση των συγκρινόμενων μεγεθών μπορεί να είναι η ταύτισή τους αλλά και μια σχέση γραμμική, εκθετική, λογαριθμική κοκ. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετοι στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας (όπως το μέσο σφάλμα προκατάληψης (MBE), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και ο δείκτης συμφωνίας (IA)) με σκοπό τον καθορισμό ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

Πίνακας** 4.XV: **Στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας των αποτελεσμάτων συγκρότησης ΤΜΕ

Σταθμός	R^2	MBE (W/m^2)	RMSE (W/m^2)	IA	Σταθμός	R^2	MBE (W/m^2)	RMSE (W/m^2)	IA
Σέρρες	0,854	1,847	91,22	0,961	**Τρίπολη**	0,888	3,524	89,35	0,970
Καστοριά	0,858	2,579	92,57	0,962	**Ελληνικό**	0,921	3,931	74,94	0,979
Μίκρα	0,864	0,511	89,82	0,963	**Ζάκυνθος**	0,890	0,279	86,24	0,971
Αλεξανδρούπολη	0,870	1,275	88,41	0,965	**Σάμος**	0,917	2,588	80,05	0,978
Κέρκυρα	0,887	-0,386	83,79	0,970	**Άργος**	0,900	1,864	81,84	0,974
Ιωάννινα	0,869	1,559	87,37	0,965	**Καλαμάτα**	0,901	1,437	82,38	0,974
Λάρισα	0,874	4,607	90,08	0,966	**Νάξος**	0,919	0,258	75,84	0,979
Λήμνος	0,904	1,154	78,96	0,975	**Μεθώνη**	0,912	1,507	77,97	0,977
Άρτα	0,890	2,024	83,65	0,971	**Σπάτα**	0,909	3,038	78,00	0,976
Αγχίαλος	0,873	2,500	90,88	0,966	**Κύθηρα**	0,923	1,262	74,52	0,980
Μυτιλήνη	0,906	0,421	80,51	0,975	**Θήρα**	0,923	-0,672	74,62	0,980
Αγρίνιο	0,889	-0,270	84,98	0,971	**Σούδα**	0,918	1,792	79,75	0,978
Αλίαρτος	0,885	2,059	87,98	0,970	**Ρόδος**	0,933	1,057	71,25	0,983
Λαμία	0,868	-1,133	90,01	0,965	**Ηράκλειο**	0,914	2,045	80,66	0,977
Ανδραβίδα	0,911	-0,118	78,98	0,977	**Ιεράπετρα**	0,939	0,386	70,00	0,984
Σκύρος	0,886	-0,994	84,61	0,970	**Σητεία**	0,922	0,088	76,75	0,980
Άραξος	0,902	0,979	81,02	0,974	**Ρέθυμνο**	0,905	0,307	81,69	0,975
Τανάγρα	0,891	0,709	85,87	0,971	**Τυμπάκι**	0,936	2,350	70,77	0,984
Χίος	0,911	1,474	78,53	0,977	**Καστέλι**	0,922	1,556	75,09	0,980
Πύργος	0,917	1,475	76,13	0,978					

Το MBE της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (Πίνακας 4.XV), στην πλειοψηφία των σταθμών, κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές (έως και 4,607 W/m^2) γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία των ΤΜΕ τα οποία δημιουργήθηκαν. Ειδικότερα, τη μεγαλύτερη τιμή MBE παρουσιάζει ο σταθμός της Λάρισας και τη μικρότερη ο σταθμός της Σητείας. Από τον Πίνακα 4.XV διαπιστώνεται ότι το 95% των ΤΜΕ που συγκροτήθηκαν έχουν κατ' απόλυτη τιμή MBE μικρότερο του 3,5 W/m^2. Η μέση τιμή του MBE

των χρονοσειρών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στα ΤΜΕ είναι 1,304 W/m^2 με τυπική απόκλιση 1,283 W/m^2.

Οι τιμές του RMSE (Πίνακας 4.XV) είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερες των 90 W/m^2, με μέση τιμή 81,720 W/m^2 και τυπική απόκλιση 6,093 W/m^2, ενώ παρατηρείται σχεδόν σταδιακή μείωση του σφάλματος καθώς μεταβαίνουμε σε σταθμούς που βρίσκονται σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη. Αυτό προκύπτει από τη μείωση των έντονων μεταβολών του καιρού σε περιοχές της Νότιας Ελλάδας σε σχέση με αντίστοιχες περιοχές της Βόρειας Ελλάδας. Επίσης, υψηλή τιμή RMSE παρουσιάζει και ο σταθμός της Τρίπολης ο οποίος βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο.

Ο ΙΑ είναι αδιάστατο μέγεθος με τιμές μεταξύ του μηδενός και της μονάδας. Όταν η τιμή του πλησιάζει στο μηδέν, τότε δεν υπάρχει καμία απολύτως συμφωνία-ταύτιση μεταξύ του ΤΜΕ και των χρονοσειρών της 15-ετίας, ενώ όταν η τιμή του πλησιάζει στη μονάδα τότε έχουμε συμφωνία-ταύτιση. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα (Πίνακας 4.XV), τα ΤΜΕ τα οποία συγκροτήθηκαν βρίσκονται σε πολύ καλό επίπεδο συμφωνίας με τα δεδομένα από τα οποία προήλθαν όσον αφορά τις τιμές της ολικής ακτινοβολίας τις οποίες περιέχουν. Σε κάθε περίπτωση, ο δείκτης συμφωνίας παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 0,961 με μέση τιμή 0,974 και τυπική απόκλιση 0,006.

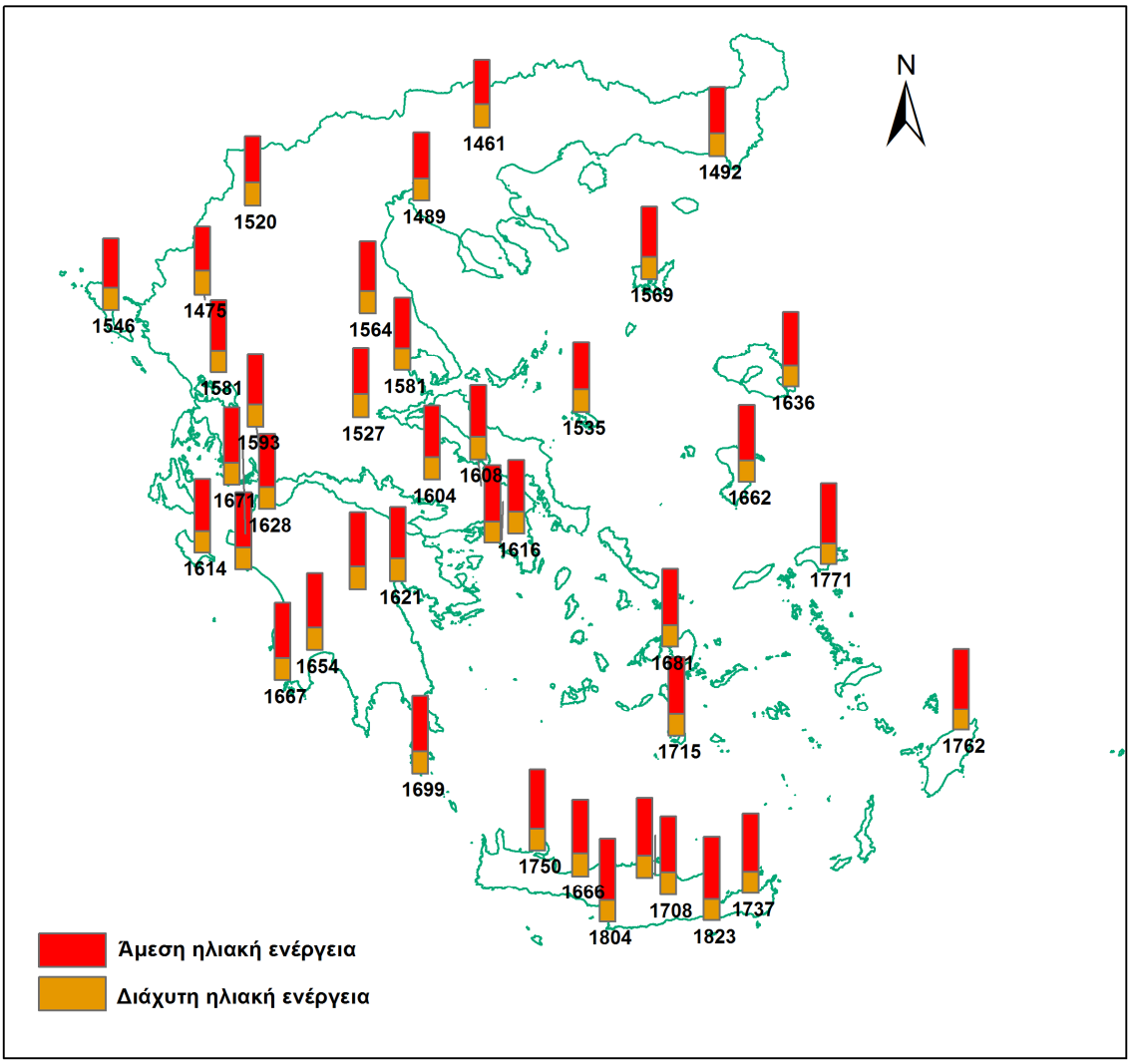
Για την αξιολόγηση των χρονοσειρών της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας οι οποίες περιέχονται στα ΤΜΕ, εξετάστηκαν οι τιμές σφαλμάτων ενδεικτικά για έναν σταθμό από κάθε κλιματική ζώνη[7] (Πίνακας 4.XVI). Οι σταθμοί που εξετάζονται είναι, από την πρώτη κλιματική ζώνη ο σταθμός Ηρακλείου Κρήτης, από τη δεύτερη κλιματική ζώνη ο σταθμός Αράξου, από την τρίτη κλιματική ζώνη ο σταθμός της Λάρισας και από την τέταρτη κλιματική ζώνη ο σταθμός της Καστοριάς. Όσον αφορά στη χρονοσειρά της θερμοκρασίας, τα σφάλματα κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα όπως και τα σφάλματα της ολικής ακτινοβολίας, ενώ στη σχετική υγρασία εμφανίζονται μεγαλύτερες αποκλίσεις. Λαμβάνοντας υπόψη τους σταθμικούς συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκρότηση των ΤΜΕ, γίνεται αντιληπτή η επίδραση που έχουν στη σύνθεση της τελικής χρονοσειράς του ΤΜΕ καθώς οι παράμετροι των ΤΜΕ με το μεγαλύτερο σταθμικό συντελεστή εμφανίζουν μικρότερες αποκλίσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες χρονοσειρές της δεκαπενταετίας.

Πίνακας** 4.XVI: **Στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας ΤΜΕ επιλεγμένων σταθμών

	Δείκτης	754	687	648	614
Θερμοκρασία αέρα	MBE (ºC)	-0,229	-0,216	0,197	0,241
	RMSE (ºC)	3,631	4,080	5,110	5,331
Σχετική υγρασία	MBE (ºC)	-1,177	-0,785	-1,427	-0,950
	RMSE (ºC)	14,575	16,089	17,747	18,715

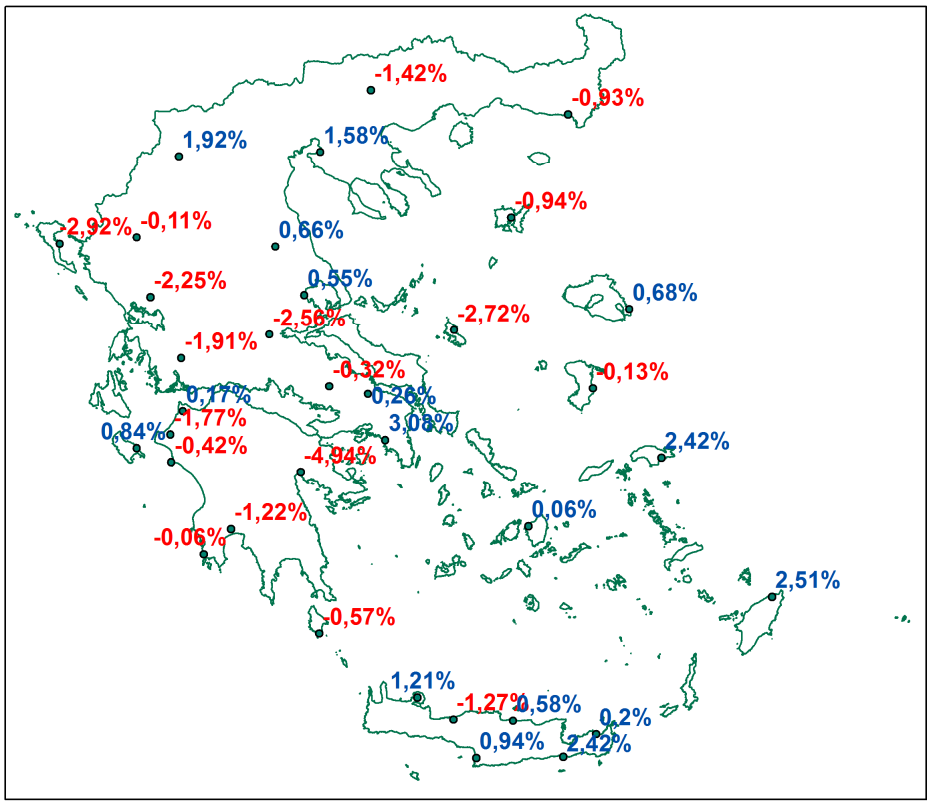
Από τις χρονοσειρές της ολικής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο των ΤΜΕ για τους 39 σταθμούς της ΕΜΥ προκύπτουν οι ετήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας καθώς επίσης και οι αντίστοιχες τιμές της διάχυτης ηλιακής ενέργειας όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.18. Η διακύμανση της ηλιακής ενέργειας κυμαίνεται από τις 1400 kWh/m^2 στη Βόρεια Ελλάδα έως τις 1800 kWh/m^2 σε περιοχές της Νότιας Ελλάδας, με μέση τιμή σε όλη την επικράτεια 1636,22 kWh/m^2 και τυπική απόκλιση 91,94 kWh/m^2.

[7] Ζώνες στις οποίες διαιρείται η Ελλάδα με βάση τις βαθμοημέρες θέρμανσης (ΤΕΕ 2010).

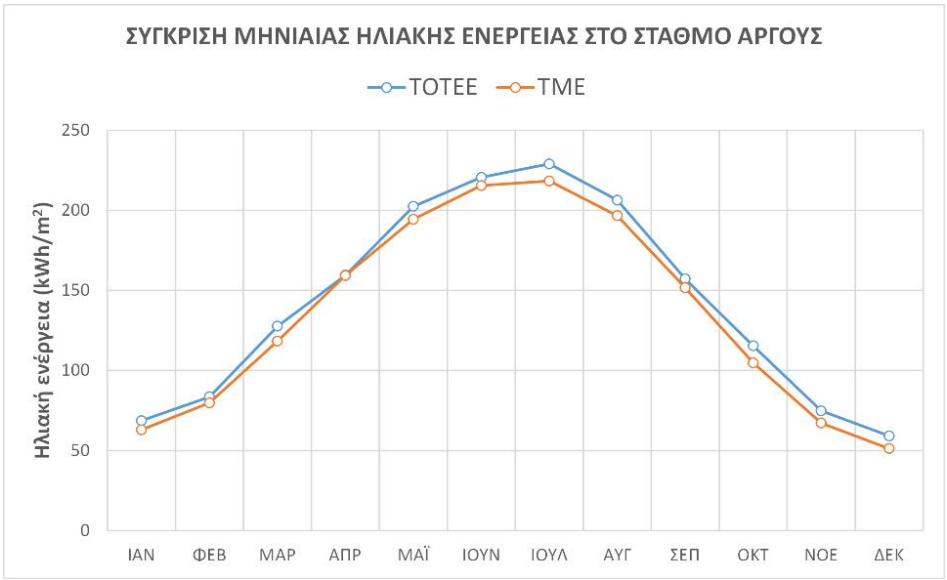


Σχήμα** 4.18: **Ετήσια ολική (άμεση + διάχυτη) ηλιακή ενέργεια σε** kWh/m² **στο οριζόντιο επίπεδο σύμφωνα με τα αποτελέσματα συγκρότησης ΤΜΕ

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση των υπολογιζόμενων τιμών ετήσιας ολικής και διάχυτης ηλιακής ενέργειας με τις αντίστοιχες τιμές που συμπεριλαμβάνονται στην Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010 (ΤΕΕ 2010). Η συγκεκριμένη Τεχνική Οδηγία περιέχει κλιματολογικά δεδομένα ελληνικών περιοχών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή πιστοποίηση των κτηρίων. Οι τιμές των κλιματολογικών δεδομένων προέρχονται από επεξεργασία μετρήσεων σε σταθμούς του δικτύου της ΕΜΥ και αφορούν μέσες τιμές της διαθέσιμης χρονοσειράς. Από τη σύγκριση προέκυψαν οι διαφορές στην ηλιακή ενέργεια όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.19. Οι τιμές στο σχήμα αφορούν ποσοστιαία απόκλιση των τιμών που προκύπτουν από τις χρονοσειρές των ΤΜΕ μείον τις τιμές της ΤΟΤΕΕ προς τις αντίστοιχες τιμές της ΤΟΤΕΕ. Η μεγαλύτερη απόκλιση που παρατηρείται είναι περίπου 5% στο σταθμό του Άργους. Στο Σχήμα 4.20 πραγματοποιείται σύγκριση των μηνιαίων τιμών της ολικής ακτινοβολίας της χρονοσειράς ΤΜΕ με τις αντίστοιχες τιμές που περιέχονται στην ΤΟΤΕΕ για το σταθμό του Άργους. Από τη σύγκριση φαίνεται ότι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους η ΤΟΤΕΕ υπερεκτιμά κατά μέσο όρο 7 kWh/m² ανά μήνα, γεγονός το οποίο δημιουργεί και την αντίστοιχη απόκλιση μεταξύ των ετήσιων τιμών ηλιακής ενέργειας στο συγκεκριμένο σταθμό.



Σχήμα** 4.19: **Ποσοστιαία απόκλιση ετήσιας ηλιακής ενέργειας ΤΜΕ με τις αντίστοιχες τιμές της ΤΟΤΕΕ



Σχήμα** 4.20: **Σύγκριση τιμών μηνιαίας ηλιακής ενέργειας ΤΜΕ και ΤΟΤΕΕ στο σταθμό του Άργους

Τέλος, παρουσιάζονται οι αναλυτικοί πίνακες που προκύπτουν από τα ΤΜΕ τα οποία συγκροτήθηκαν για κάθε σταθμό και αφορούν τη μέση μηνιαία θερμοκρασία 24-ώρου (Πίνακας 4.XVII), τη μηνιαία διάχυτη (Πίνακας 4.XVIII) και τη μηνιαία ολική ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο (Πίνακας 4.XIX).

***Πίνακας** 4.XVII: **Μέση μηνιαία θερμοκρασία** (°C)*

Σταθμός	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Σέρρες	4,9	1,8	8,9	15,6	20,0	24,9	25,8	27,2	20,8	13,1	9,0	2,4
Καστοριά	3,5	0,2	5,0	10,4	15,3	21,4	22,3	23,6	16,9	12,1	6,8	4,8
Μίκρα	5,3	3,6	8,9	13,2	18,5	23,3	25,1	25,0	20,8	16,0	10,3	5,2
Αλεξανδρούπολη	5,1	5,0	8,9	12,1	16,9	21,2	24,2	24,6	20,0	13,3	8,0	5,8
Κέρκυρα	9,4	8,9	10,2	14,2	19,8	23,5	24,8	27,4	22,1	19,3	11,6	10,9
Ιωάννινα	2,2	5,8	6,5	11,7	15,6	22,1	21,7	22,4	18,9	13,7	5,9	3,9
Λάρισα	6,1	5,0	8,6	12,6	19,6	24,8	25,6	26,0	20,5	13,8	10,8	7,5
Λήμνος	7,9	8,7	9,9	14,5	17,3	22,8	25,3	24,8	20,0	15,7	12,7	9,1
Άρτα/Χαλκιάδες	8,8	5,9	9,4	14,7	20,8	24,5	25,4	24,9	22,1	15,3	10,1	7,6
Αγχίαλος	8,1	5,0	9,2	14,8	20,1	23,7	25,2	25,8	21,0	14,9	11,3	9,4
Μυτιλήνη	7,5	9,3	11,9	17,1	17,9	24,6	26,9	25,7	21,8	15,8	14,3	9,6
Αγρίνιο	5,9	5,9	9,3	14,6	20,3	24,9	25,4	25,3	21,7	16,4	9,5	7,5
Αλίαρτος	7,7	8,0	8,7	14,5	17,7	24,9	25,6	24,3	21,6	15,1	11,3	7,4
Λαμία	6,9	4,3	4,9	13,6	18,5	24,0	25,5	24,1	21,2	13,9	11,1	9,2
Ανδραβίδα	8,1	7,5	9,5	15,1	19,6	22,8	24,2	24,5	21,7	17,7	11,6	9,9
Σκύρος	10,7	10,2	10,0	13,9	18,4	23,3	25,1	24,7	22,7	18,4	11,8	7,6
Άραξος	8,4	10,3	10,5	15,2	19,7	22,2	26,7	25,8	22,7	17,9	12,1	12,1
Τανάγρα	7,6	5,0	8,6	12,8	18,1	24,2	26,2	26,4	21,5	15,5	14,1	7,7
Χίος	9,6	7,0	11,8	15,4	18,1	24,0	26,5	25,4	22,7	17,0	14,8	11,7
Πύργος	10,3	9,4	12,8	13,4	19,0	22,2	25,9	24,6	22,3	17,8	13,4	10,9
Τρίπολη	3,1	5,0	6,8	9,8	14,5	20,1	21,9	23,0	17,9	11,5	8,9	5,9
Ελληνικό	10,6	10,9	11,9	15,0	20,3	25,2	26,2	28,8	23,3	20,4	13,2	11,0
Ζάκυνθος	10,6	10,8	9,7	15,1	18,7	23,8	25,1	25,3	22,2	16,4	12,7	10,5
Σάμος	9,7	8,2	13,3	14,8	18,6	23,6	28,5	27,6	23,2	19,7	14,5	11,1
Πυργέλα/Άργος	9,1	8,5	10,7	13,8	19,5	23,6	26,7	26,4	22,1	16,7	12,5	9,6
Καλαμάτα	8,7	7,4	9,5	14,5	18,3	23,0	25,1	25,7	22,1	18,7	12,0	10,7
Νάξος	13,3	12,1	14,1	16,7	18,7	23,6	25,9	24,7	22,8	18,8	17,1	13,3
Μεθώνη	10,5	11,1	10,9	13,9	19,4	22,5	24,1	24,4	23,4	19,0	17,0	11,7
Σπάτα	8,8	9,0	11,6	14,0	19,9	24,7	28,8	26,2	22,9	16,4	10,8	8,4
Κύθηρα	11,7	8,6	12,9	15,8	18,7	23,9	27,1	27,4	23,0	20,4	15,0	12,7
Θήρα	13,2	9,6	12,2	14,9	20,7	24,2	24,7	25,8	23,1	18,6	15,3	13,6
Σούδα	12,0	11,2	12,9	15,7	20,7	23,7	26,1	25,5	21,1	18,3	15,1	11,7
Ρόδος	11,7	12,1	13,0	17,4	19,8	24,2	25,8	27,0	24,8	21,1	16,6	13,7
Ηράκλειο	11,1	11,7	13,6	15,7	19,5	24,8	25,5	25,5	23,0	17,5	14,4	14,9
Ιεράπετρα	13,2	12,3	13,7	17,3	20,1	24,6	27,6	27,8	25,4	20,7	16,9	14,6
Σητεία	13,2	11,9	13,7	15,8	21,1	24,2	25,8	25,0	23,0	18,7	17,7	13,6
Ρέθυμνο	11,8	12,3	14,4	17,4	21,5	26,9	26,1	26,0	25,3	18,3	18,2	15,7
Τυμπάκι	10,4	11,7	11,4	15,7	20,7	24,3	27,9	27,7	24,3	17,9	14,0	12,2
Καστέλι	10,3	8,5	10,7	15,1	17,2	22,3	25,2	24,5	21,4	14,4	12,9	12,2

***Πίνακας** 4.XVIII: **Μηνιαία διάχυτη ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο** (kWh/m²/mo)*

Σταθμός	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Σέρρες	25,8	31,6	46,7	53,7	60,7	55,8	52,9	44,6	41,2	36,0	26,6	23,4
Καστοριά	25,0	31,7	45,4	56,2	64,1	53,1	52,8	46,9	40,6	36,8	27,3	23,5
Μίκρα	26,8	32,4	46,9	53,6	61,5	51,5	52,6	46,3	40,8	34,8	26,8	23,6
Αλεξανδρούπολη	25,9	31,5	45,1	55,9	58,6	53,3	50,9	44,1	38,8	35,2	27,4	23,6
Κέρκυρα	25,7	32,5	45,2	53,6	58,6	50,3	47,7	43,0	40,1	35,9	27,0	23,3
Ιωάννινα	27,2	32,1	47,7	58,3	64,4	51,7	55,4	46,7	45,2	36,9	29,4	25,5
Λάρισα	26,3	31,5	46,0	49,8	57,7	49,6	49,6	44,5	40,1	37,0	28,5	24,4
Λήμνος	26,7	31,7	46,3	48,3	56,9	50,4	47,3	41,0	38,8	36,4	27,0	23,8
Άρτα/Χαλκιάδες	25,0	31,7	46,2	54,0	60,5	48,9	47,9	43,4	40,9	35,2	27,8	23,2
Αγχίαλος	26,3	32,4	45,6	51,8	57,8	49,3	49,2	43,9	40,2	37,3	27,3	23,8
Μυτιλήνη	26,2	31,2	45,4	49,3	52,7	46,9	44,5	40,9	35,4	33,9	26,4	24,9
Αγρίνιο	27,3	32,4	46,8	53,7	57,7	49,5	48,2	41,8	40,9	35,2	28,2	24,1
Αλίαρτος	28,1	32,7	47,5	51,4	57,8	49,6	47,1	44,9	38,9	37,0	28,8	25,9
Λαμία	27,3	33,5	49,0	51,0	59,9	51,9	54,1	48,2	43,1	37,6	28,1	24,6
Ανδραβίδα	27,0	31,7	45,1	51,2	55,4	47,1	44,0	40,4	38,4	35,1	27,8	24,2
Σκύρος	28,3	32,4	48,1	52,4	58,8	52,2	47,3	43,7	39,5	37,7	28,8	26,3
Άραξος	26,4	31,2	45,6	50,1	56,5	50,4	47,0	42,1	41,3	35,6	28,6	24,6
Τανάγρα	27,5	34,8	49,5	49,5	56,8	51,3	46,9	41,0	39,4	37,1	28,7	25,2
Χίος	27,0	34,0	44,0	48,0	55,0	46,5	43,2	40,1	37,0	34,3	27,6	25,1
Πύργος	27,2	31,1	45,0	50,9	52,4	48,5	45,5	41,7	39,2	35,3	27,2	24,9
Τρίπολη	28,9	32,5	46,2	50,3	58,5	50,5	51,9	43,4	38,8	36,4	28,8	25,6
Ελληνικό	26,9	31,3	44,4	47,7	54,2	48,7	46,4	40,1	38,3	34,3	29,8	25,1
Ζάκυνθος	28,3	32,4	47,3	50,9	56,0	48,9	43,2	41,5	40,8	36,8	29,4	25,5
Σάμος	26,3	32,8	43,2	46,2	51,9	42,7	40,0	38,4	34,7	32,3	26,6	25,1
Πυργέλα/Άργος	27,8	33,1	47,8	52,3	56,4	50,0	50,4	44,9	40,5	37,1	29,0	26,1
Καλαμάτα	28,0	34,9	46,7	52,9	55,5	48,7	48,1	43,1	39,1	34,4	30,2	25,8
Νάξος	28,7	33,5	46,2	50,1	50,7	45,6	43,5	40,4	36,5	35,2	29,4	26,3
Μεθώνη	28,8	31,4	45,7	50,3	53,5	49,0	46,2	42,7	41,6	36,1	28,3	25,3
Σπάτα	27,6	33,3	47,0	49,9	59,1	50,2	48,6	45,3	39,6	37,9	30,3	25,5
Κύθηρα	29,5	34,6	47,7	50,1	52,9	49,2	45,5	41,1	38,0	37,3	29,7	26,8
Θήρα	28,8	35,1	43,8	47,7	53,8	49,0	46,4	40,6	35,5	34,5	28,6	27,1
Σούδα	31,2	33,8	47,2	48,8	50,9	44,0	43,2	39,6	38,5	36,2	31,2	28,1
Ρόδος	28,0	32,5	45,2	48,5	47,7	43,8	43,6	40,5	36,1	34,2	28,1	26,5
Ηράκλειο	30,7	35,0	47,6	50,4	52,6	44,8	44,1	40,4	37,8	38,0	30,8	28,2
Ιεράπετρα	29,2	32,3	45,9	47,4	50,6	42,8	40,4	38,3	36,3	33,6	28,7	27,5
Σητεία	31,3	35,4	46,0	48,1	52,4	44,4	43,3	40,7	36,9	37,4	30,7	28,4
Ρέθυμνο	31,1	35,5	49,6	51,2	51,3	46,8	46,9	43,3	41,1	39,7	30,9	28,4
Τυμπάκι	29,5	33,0	47,1	47,7	50,4	45,0	41,4	38,5	36,2	34,5	29,5	28,1
Καστέλι	32,4	35,0	49,0	50,9	55,3	48,3	46,1	42,4	40,0	37,9	30,8	28,8

***Πίνακας** 4.XIX: **Μηνιαία ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο** (kWh/m^2/mo)*

Σταθμός	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Σέρρες	48,3	71,4	109,0	146,1	174,3	194,7	204,9	189,3	136,4	90,1	55,4	40,8
Καστοριά	59,4	74,8	121,8	141,6	174,0	210,5	211,8	189,2	143,0	93,1	56,3	44,8
Μίκρα	47,6	70,0	111,2	144,2	176,2	208,9	207,2	188,1	140,1	95,9	57,5	42,5
Αλεξανδρούπολη	46,4	68,5	111,9	135,5	184,2	204,7	211,1	192,6	144,8	96,5	55,8	40,4
Κέρκυρα	57,5	69,1	120,9	143,8	183,1	211,0	219,9	194,5	141,5	95,5	59,5	49,3
Ιωάννινα	55,4	73,9	115,6	134,3	169,9	211,3	200,4	191,0	131,5	96,3	54,4	40,6
Λάρισα	56,8	74,8	119,0	159,4	188,6	215,0	217,5	194,5	146,5	94,0	54,1	44,3
Λήμνος	49,5	69,9	113,3	161,4	191,0	212,3	222,4	201,8	147,7	94,8	61,0	44,1
Άρτα/Χαλκιάδες	65,8	78,2	120,2	145,8	178,4	214,2	219,0	196,8	143,2	103,4	61,9	53,7
Αγχίαλος	59,8	76,6	121,2	152,9	187,7	215,4	218,5	194,9	146,8	94,7	62,9	49,6
Μυτιλήνη	58,5	79,6	117,8	158,6	198,7	216,9	224,2	200,9	158,0	108,3	67,8	46,8
Αγρίνιο	60,6	77,5	120,1	147,8	187,8	214,1	217,5	202,2	145,0	103,9	63,2	53,4
Αλίαρτος	55,9	77,6	118,1	159,3	192,7	215,2	224,7	195,7	153,1	102,8	62,1	46,6
Λαμία	56,1	73,4	111,2	157,1	180,9	212,2	204,9	185,0	139,1	96,4	61,2	48,8
Ανδραβίδα	65,5	82,3	128,2	156,5	194,6	219,5	230,1	207,2	154,7	107,4	68,3	57,0
Σκύρος	49,1	74,4	112,4	151,2	184,2	205,6	220,6	193,3	148,5	93,5	60,9	41,8
Άραξος	66,6	83,8	125,2	159,8	190,4	212,8	222,1	202,7	143,6	105,1	65,2	51,1
Τανάγρα	58,8	72,5	112,8	162,2	194,1	210,9	225,4	206,3	152,3	100,7	62,4	49,7
Χίος	61,2	73,9	125,8	166,5	193,6	221,7	229,4	205,5	155,2	110,4	67,5	51,0
Πύργος	65,9	84,6	126,3	160,8	202,7	217,2	226,4	203,3	152,9	108,9	72,5	56,0
Τρίπολη	62,7	85,4	131,1	167,3	197,3	219,3	215,2	207,1	160,6	111,9	70,2	57,3
Ελληνικό	63,6	85,9	130,0	169,8	200,8	215,8	227,6	206,4	157,2	112,3	63,5	54,0
Ζάκυνθος	57,3	76,5	119,5	157,6	190,8	213,2	232,0	203,0	146,0	103,4	62,5	52,1
Σάμος	69,4	83,2	129,5	175,6	205,3	233,6	241,0	213,2	166,7	120,9	76,2	56,5
Πυργέλα/Άργος	63,0	79,8	118,4	159,3	194,4	215,5	218,4	196,7	151,6	104,9	67,2	51,3
Καλαμάτα	67,6	78,2	127,1	155,1	195,7	216,4	220,1	199,5	156,8	116,0	65,9	55,4
Νάξος	60,4	80,2	122,1	160,4	207,9	222,0	229,3	205,3	160,6	111,4	67,6	53,5
Μεθώνη	64,1	88,6	129,8	162,9	199,2	214,3	222,0	200,4	146,8	108,3	72,0	58,7
Σπάτα	60,4	78,5	120,3	164,5	187,9	216,6	223,3	196,8	153,1	100,8	61,1	52,7
Κύθηρα	65,0	83,1	124,3	166,3	204,3	214,9	229,3	207,1	161,6	112,1	73,2	57,9
Θήρα	65,6	79,6	137,3	171,6	198,5	215,3	224,4	207,1	167,6	118,0	74,3	56,2
Σούδα	61,8	87,1	127,8	172,5	212,2	232,9	236,3	214,0	162,8	116,6	68,6	57,5
Ρόδος	73,0	88,5	133,2	167,8	217,2	227,5	228,0	206,8	163,7	118,3	76,1	61,9
Ηράκλειο	67,7	85,9	126,5	167,6	205,9	226,0	231,6	209,1	164,5	113,9	74,9	59,0
Ιεράπετρα	76,1	96,0	134,9	174,0	211,6	231,7	239,0	215,3	167,4	129,8	81,5	65,7
Σητεία	66,1	81,8	132,3	173,7	206,2	224,3	231,7	207,6	166,0	114,9	72,7	59,8
Ρέθυμνο	64,7	82,2	118,8	164,4	207,4	219,6	222,2	200,7	151,4	106,6	71,2	56,5
Τυμπάκι	75,7	94,3	132,1	173,1	211,1	224,6	237,4	215,1	169,4	127,6	80,7	62,5
Καστέλι	62,7	86,9	128,4	167,2	199,3	220,8	229,1	207,4	156,4	116,9	74,3	58,6

Βιβλιογραφία

Argiriou, A., Lykoudis, S., Kontoyiannidis, S., Balaras, C.A., Asimakopoulos, D.N., Petrakis, M. & Kassomenos, P., 1999. Comparison of methodologies for TMY generation using 20 years data for Athens, Greece. *Solar Energy*, 66(1), pp.33–45.

Bahadori, M.N. & Chamberlain, M.J., 1986. A simplification of weather data to evaluate daily and monthly energy needs of residential buildings. *Solar Energy*, 36(6), pp.499–507.

Chan, A.L.S., Chow, T.T., Fong, S.K.F. & Lin, J.Z., 2006. Generation of a typical meteorological year for Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 47(1), pp.87–96.

Crawley, D.B., 1998. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? *ASHRAE Transactions*, 104, pp.1–18.

Crow, L.W., 1981. Development of hourly data for weather year for energy calculations (WYEC), including solar data at 21 stations throughout U.S. In *ASHRAE Transactions*.

Ecevit, A., Akinoglu, B.G. & Aksoy, B., 2002. Generation of a typical meteorological year using sunshine duration data. *Energy*, 27(10), pp.947–954.

Fagbenle, R.L., 1995. Generation of a test reference year for Ibadan, Nigeria. *Energy conversion and management*, 36(1), pp.61–63.

Festa, R. & Ratto, C.F., 1993. Proposal of a numerical procedure to select Reference Years. *Solar Energy*, 50(1), pp.9–17.

Finkelstein, J.M. & Schafer, R.E., 1971. Improved goodness to fit tests. *Biometrica*, 58(3), pp.641–645.

Florides, G., Kalogirou, S.A., Theophilou, K. & Evangelou, E., 2003. Analysis of the typical meteorological year (TMY) of cyprus and house load simulation. In *Eighth International IBPSA Conference*. Eindhoven, Netherlands, pp. 339–346.

Florides, G.A., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A. & Wrobel, L.C., 2000. Modeling of the modern houses of Cyprus and energy consumption analysis. *Energy*, 25, pp.915–937.

Florides, G.A., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A. & Wrobel, L.C., 2002. Modelling and simulation of an absorption solar cooling system for Cyprus. *Solar Energy*, 72(1), pp.43–51.

Freeman, T., 1979. Evaluation of the typical meteorological years for solar heating and cooling system studies. Final report.

Gabrielsson, J. & Wiljanen, H., 1994. A weather model for indoor thermal calculations. *Building and Environment*, 29(3), pp.345–351.

Hall, I.J., Prairie, R.R., Anderson, H.E. & Boes, E.C., 1978. Generation of a typical meteorological year. *1978 Annual Meeting of the American Section of the ISES*.

Hui, C.M., 1996. *Energy Performance of Air-conditioned Buildings in Hong Kong*. City University of Hong Kong.

Hui, S. & Lam, J., 1992. Test reference year (TRY) for comparative energy study. *Hong Kong Engineer*.

Janjai, S. & Deeyai, P., 2009. Comparison of methods for generating typical meteorological year using meteorological data from a tropical environment. *Applied Energy*, 86, pp.528–537.

Jiang, Y., 2010. Generation of typical meteorological year for different climates of China. *Energy*, 35(5), pp.1946–1953.

Kalogirou, S.A., 2003. Generation of typical meteorological year (TMY-2) for Nicosia, Cyprus. *Renewable Energy*, 28(15), pp.2317–2334.

Klein, S.A., Beckman, W.A. & Duffie, J.A., 1976. A design procedure for solar heating systems. *Solar Energy*, 18(November 1975), pp.113–127.

Lam, J.C., Hui, S.C.M. & Chan, A.L.S., 1996. A statistical approach to the development of a typical meteorological year for Hong Kong. *Architectural Science Review*, 39(4), pp.201–209.

Lhendup, T. & Lhundup, S., 2007. Comparison of methodologies for generating a typical meteorological year (TMY). *Energy for Sustainable Development*, 11(3), pp.5–10.

Lund, H., 2001. *Design Reference Years and Test Reference Years in Europe, Turkey and Israel*, Rotterdam, The Netherlands.

Lund, H., 1984. *Short Reference Years and Test Reference Years for EEC countries, Final report EUR 10208 EN*, Denmark.

Lund, H., 1995. *The Design Reference Year, A Report of Task 9: Solar Radiation and Pyranometer Studies*. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark.

Lund, H. & Eidorff, S., 1981. *Selection Methods for Production of Test Reference Years*, Denmark.

Marion, W. & Urban, K., 1995. *User's manual for TMY2s—Typical Meteorological Years*, National Renewable Energy Laboratory.

Menicucci, D.F. & Fernandez, J.P., 1988. *A comparison of typical meteorological year solar radiation information with the SOLMET data base*, Albuquerque, New Mexico.

Muzathik, A.M., Nik, W.M.N.B.W., Samo, K. Bin & Ibrahim, M.Z., 2010. Reference Solar Radiation Year and Some Climatology Aspects of East Coast of West Malaysia. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(2), pp.293–299.

NCDC, 1976. *Test Reference Year (TRY), Tape Reference Manual, TD-9706*, Asheville, North Carolina.

NCDC, 1981. *Typical Meteorological Year User's Manual, TD-9734, Hourly Solar Radiation - Surface Meteorological Observations*, Asheville, North Carolina.

Petrakis, M., Kambezidis, H.D., Lykoudis, S., Adamopoulos, A.D., Kassomenos, P., Michaelides, I.M., Kalogirou, S.A., Roditis, G. & Chrysis, I., 1998. Generation of "Typical Meteorological Year" for Nicosia, Cyprys. *Renewable Energy*, 13(3).

Petrakis, M., Lykoudis, S. & Kassomenos, P., 1996. A software tool for the creation of a typical meteorological year. *Environmental Software*, 11(4), pp.221–227.

Petrie, W. & McClintock, M., 1978. Determining typical weather for use in solar energy simulations. *Solar Energy*, 21(2), pp.55–59.

Pissimanis, D., Karras, G., Notaridou, V. & Gavra, K., 1988. The generation of a "typical meteorological year" for the city of Athens. *Solar Energy*, 40(5), pp.405–411.

Said, S. a. M. & Kadry, H.M., 1994. Generation of representative weather—Year data for Saudi Arabia. *Applied Energy*, 48(2), pp.131–136.

Sawaqed, N.M., Zurigat, Y.H. & Al-Hinai, H., 2005. A step-by-step application of Sandia method in developing typical meteorological years for different locations in Oman. *International Journal of Energy Research*, 29(8), pp.723–737.

Shaltout, M. & Tadros, M., 1994. Typical solar radiation year for Egypt. *Renewable energy*, 1481(4).

Siurna, D.L., D'Andrea, L.J. & Hollands, K.G.T., 1984. A Canadian representative meteorological year for solar system simulation. In *Proceedings of the 10th Annual National Conference of the Solar Energy Society of Canada*. Alberta, Canada: Solar Energy Society of Canada, pp. 85–88.

Skeiker, K., 2007. Comparison of methodologies for TMY generation using 10 years data for Damascus, Syria. *Energy Conversion and Management*, 48(7), pp.2090–2102.

Skeiker, K., 2004. Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein–Schafer statistical method. *Energy Conversion and Management*, 45(1), pp.99–112.

Williams, M.K. & Kerrigan, S.L., 2012. How typical is solar energy? A 6 year evaluation of Typical Meteorological Data (TMY3). In *World Renewable Energy Congress XII and Exhibition*. Denver, Colorado: World Renewable Energy Network, pp. 1–7.

Wong, W.L. & Ngan, K.H., 1993. Selection of an "example weather year" for Hong Kong. *Energy and Buildings*, 19, pp.313–316.

ΤΕΕ, 2010. *Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010*, Αθήνα.

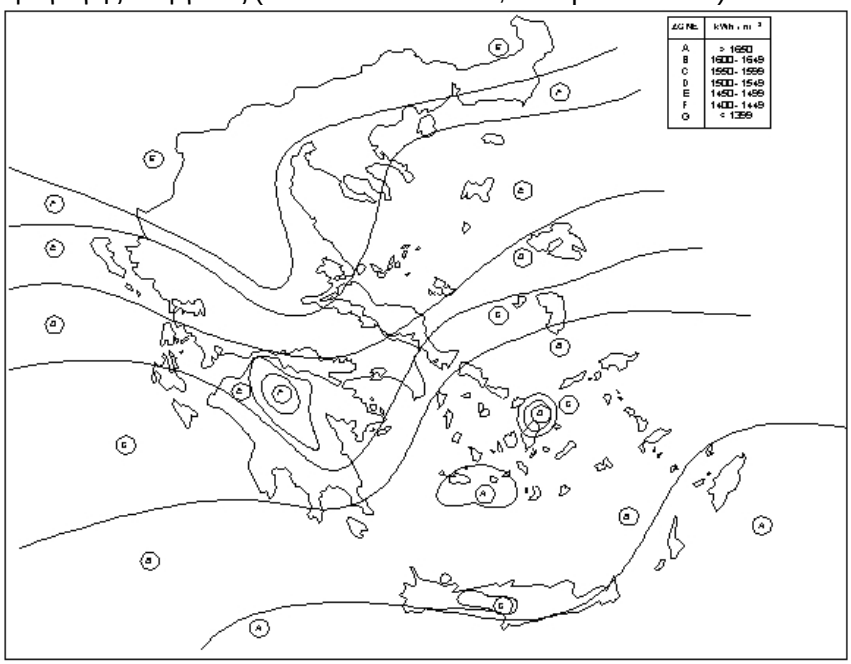
5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Ηλιακός Χάρτης Ελλάδας

5.1 Εισαγωγή

Η γεωφυσική θέση της Ελλάδας την καθιστά μία από τις περιοχές της Ευρώπης με εξαιρετικό ενδιαφέρον στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, ειδικότερα στον κτηριακό τομέα, με εφαρμογή στον ηλεκτρισμό, τη θέρμανση, την ψύξη και τη χρήση ζεστού νερού. Για το λόγο αυτό, ο επιμερισμός της Ελλάδας σε κλιματικές ζώνες ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί έργο μεγάλης σημασίας, για την προκαταρκτική αξιολόγηση και μοντελοποίηση των ηλιακών συστημάτων, είτε πρόκειται για φυσικά συστήματα όπως η χλωρίδα και η πανίδα (Thompson & Perry 1997), είτε ηλιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας (Kavadias et al. 2011, Axaopoulos 2011).



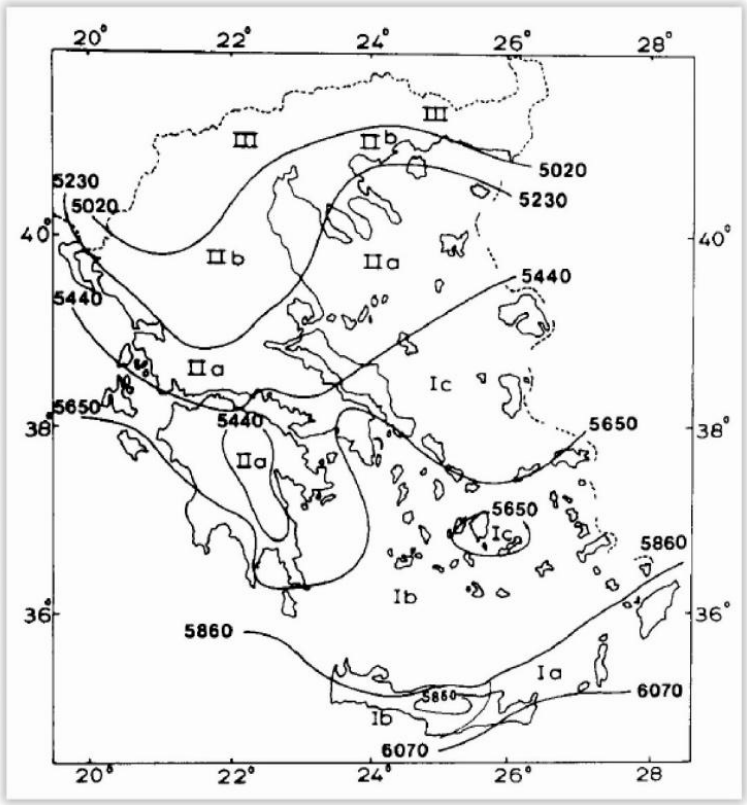
***Σχήμα** 5.1: **Κατανομή της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας** (Kavadias et al. 2010)*

Παρόλη τη διαθεσιμότητα ηλιακών χαρτών για την περιοχή της Ελλάδας, σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει επαρκής καταγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία τους, εγείροντας αμφιβολίες για την αξιοπιστία των ηλιακών δεδομένων που παρέχουν. Στο Σχήμα 5.1

παρουσιάζεται η χαρτογράφηση του ηλιακού δυναμικού της Ελλάδας από στην εργασία των Kavadias et al. (2010).

Η χαρτογράφηση του ηλιακού δυναμικού αποτελεί, τα τελευταία χρόνια, έναν ιδιαίτερα διαδεδομένο τομέα έρευνας, λόγω του έντονου ενδιαφέροντος που παρουσιάζεται από τους μελετητές και επενδυτές των ηλιακών ενεργειακών συστημάτων. Χαρακτηριστικές μελέτες χαρτογράφησης του ηλιακού δυναμικού αποτελούν, ο ψηφιακός ηλιακός άτλαντας της Ευρώπης (European Solar Radiation Atlas, Scharmer & Greif 2000), η δημιουργία του οποίου βασίστηκε σε δεδομένα της περιόδου 1981-1990, αλλά και το Meteonorm (Meteonorm 2015), μια ψηφιακή βάση δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας, που συνδυάζει διαφορετικές βάσεις μετρήσεων και εκτιμήσεων ηλιακής ακτινοβολίας από όλο τον κόσμο, με την πλειοψηφία των τιμών να προέρχονται από μετρήσεις κατά την τριακονταετία 1961-1990.

Στη βιβλιογραφία έχουν εφαρμοστεί διάφορες τεχνικές χωρικής παρεμβολής, όπως η μέθοδος της αντίστροφης σταθμισμένης απόστασης (Inverse Distance Weighted, IDW), η μέθοδος φυσικών γειτόνων, καθώς επίσης και παραλλαγές της μεθόδου kriging. Η οικογένεια των μεθόδων kriging είναι ευρέως διαδεδομένη, όχι μόνο στην πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας (Ertekin & Evrendilek 2007, Alsamamra et al. 2009), αλλά και βροχόπτωσης (Kebaili Bargaoui & Chebbi 2009, Kambezidis et al. 2010), χιονοκάλυψης (Erxleben et al. 2002), θερμοκρασίας αέρα (Benavides et al. 2007) και αλατότητας εδάφους (Eldeiry & Garcia 2010).



***Σχήμα** 5.2: **Ζώνες ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο σε** MJ/m², **σύμφωνα με τον** Flocas (1980)*

Εδώ, αξίζει να αναφερθούν μερικές από τις προσπάθειες ερευνητικών ομάδων για τη χαρτογράφηση του ηλιακού δυναμικού σε περιοχές μικρότερης κλίμακας, καθώς επίσης και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν. Για την Ελλάδα, ο Flocas (1980) χρησιμοποιώντας το μοντέλο του

Ångström[1] (Ångström 1924), υπολόγισε τιμές μηνιαίας ηλιακής ενέργειας σε 33 μετεωρολογικούς σταθμούς του ελλαδικού χώρου. Σε κάθε έναν από τους σταθμούς, αξιοποιώντας τα δεδομένα σχετικής ηλιοφάνειας της χρονικής περιόδου 1964 – 1975, επαναπροσδιόρισε τους συντελεστές a και b του μοντέλου του Ångström, προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια των εκτιμώμενων τιμών. Από τις τιμές μηνιαίας ηλιακής ενέργειας που προέκυψαν, αποτύπωσε σε χάρτη τις ζώνες ετήσιας ηλιακής ενέργειας στον ελλαδικό χώρο (Σχήμα 5.2).

Το 1992, οι Zelenka et al. (1992) εφάρμοσαν χωρική παρεμβολή σε ηλιακά δεδομένα της Ελβετίας και των ΒΑ Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, για τη δημιουργία αντίστοιχων ηλιακών χαρτών, εφαρμόζοντας δύο διαφορετικές μεθόδους χωρικής παρεμβολής: τη μέθοδο kriging[2], και τη μέθοδο της αντίστροφης τετραγωνικής σταθμισμένης απόστασης (inverse distance squared weighted interpolation). Σύμφωνα με τους ερευνητές, οι δύο μέθοδοι χωρικής παρεμβολής που εφαρμόστηκαν, κατέληξαν σε παρόμοια σφάλματα.

Οι Rehman & Ghori (2000) δημιούργησαν μηνιαίους χάρτες ηλιακής ενέργειας για την περιοχή της Σαουδικής Αραβίας, χρησιμοποιώντας μακροχρόνιες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας από 41 σταθμούς. Για τη δημιουργία του ηλιακού χάρτη, εφάρμοσαν τη μέθοδο kriging, ενώ από την αξιολόγηση της χωρικής παρεμβολής, προέκυψε μέσο σφάλμα εκτίμησης από 0,5% έως 1,7%.

Οι Hofierka et al. (2002) ενσωμάτωσαν στο GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System) το μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας r.sun[3], δημιουργώντας ένα λογισμικό ελεύθερης χρήσης για τη δημιουργία ηλιακών χαρτών. Στην εργασία τους, οι ερευνητές παρουσιάζουν μια εφαρμογή του λογισμικού σε αστική περιοχή της ανατολικής Σλοβακίας.

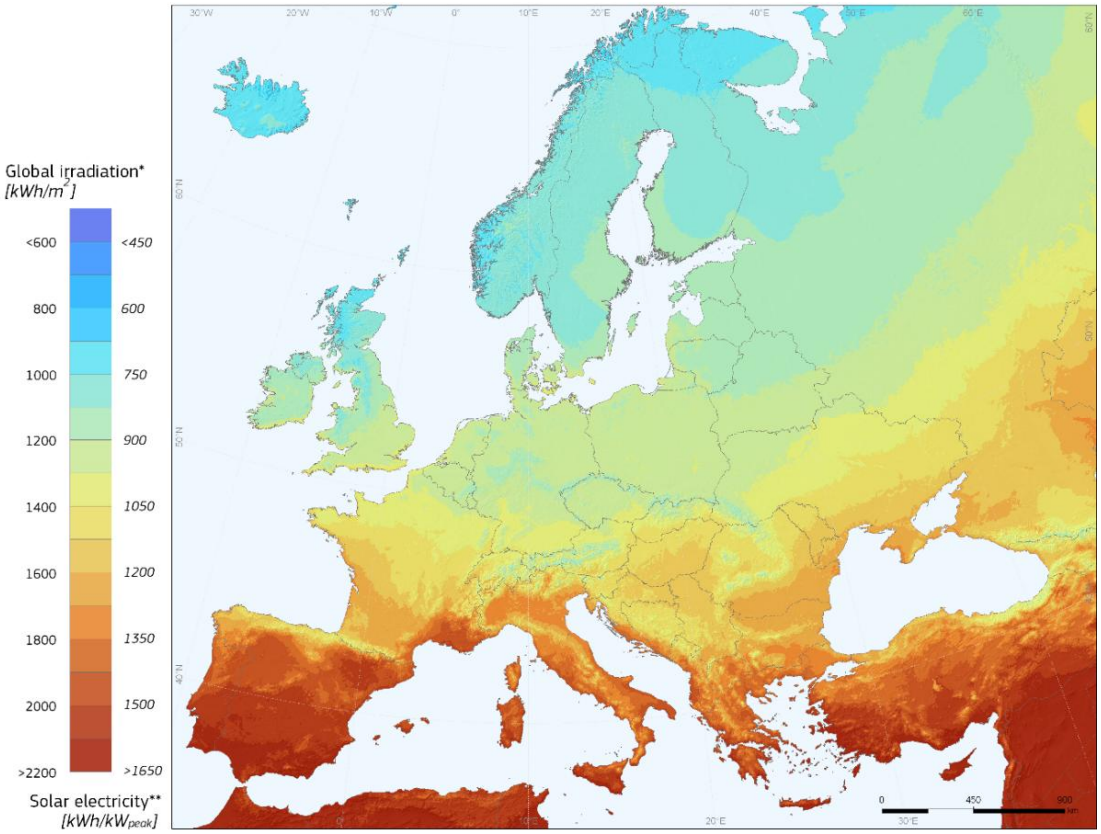
Μεταξύ των ετών 2001 και 2005, αναπτύχθηκε η ευρωπαϊκή βάση δεδομένων ηλιακής ενέργειας, χρησιμοποιώντας τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες υπολογίζονται από μοντέλα και κλιματικά δεδομένα. Τα δεδομένα της βάσης έχουν ενσωματωθεί στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών Φωτοβολταϊκών (Photovoltaic Geographic Information System, PVGIS) με χωρική ανάλυση 1km^2 (Šúri et al. 2007, Huld et al. 2012), παρέχοντας μέσες μηνιαίες και ετήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας, όπως προκύπτουν από τα δεδομένα της χρονικής περιόδου 1981-1990 που περιέχονται στη βάση (Σχήμα 5.3).

Το 2004, οι Diabate et al. (2004) δημιούργησαν τον πρώτο χάρτη ηλιακής ενέργειας για την αφρικανική ήπειρο. Λίγο αργότερα, ο Madhlopa (2006) δημιούργησε τον ηλιακό χάρτη του Μαλάουι, τον οποίο σύγκρινε με τον αντίστοιχο των Diabate et al. (2004). Παρά το γεγονός ότι η ανάλυση των Diabate et al. (2004) δεν συμπεριελάμβανε δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας από την ευρύτερη περιοχή του Μαλάουι, παρά μόνο προβλέψεις βασισμένες σε μέσες μηνιαίες τιμές του ημερήσιου δείκτη αιθριότητας, τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο χαρτών κρίθηκαν από τον Madhlopa ικανοποιητικά.

[1] Το μοντέλο του Ångström ανήκει στην κατηγορία των εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας. Το μοντέλο συσχετίζει το λόγο της μηνιαίας ημερήσιας τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας H σε οριζόντιο επίπεδο προς τη μέση ημερήσια ακτινοβολία καθαρού ουρανού H_c τον ίδιο μήνα, με τη μέση μηνιαία σχετική ηλιοφάνεια $\frac{SD_m}{SD_t}$, σύμφωνα με τη σχέση: $\frac{H}{H_c} = a + b \cdot \frac{SD_m}{SD_t}$.

[2] Γεωστατική μέθοδος χωρικής παρεμβολής η οποία πήρε το όνομά της προς τιμήν του Νοτιοαφρικάνου μεταλλειολόγου μηχανικού Danie Gerhardus Krige (Krige 1952).

[3] Ηλιακό μοντέλο που παράγει χάρτες άμεσης, διάχυτης και ανακλώμενης ακτινοβολίας για δεδομένη ημέρα, γεωγραφικό μήκος και πλάτος, επιφάνεια και ατμοσφαιρικές συνθήκες (Hofierka et al. 2002).



Σχήμα** 5.3: **Ευρωπαϊκός χάρτης ηλιακής ενέργειας και φωτοβολταϊκής παραγωγής

Πρόσφατα, οι Alsamamra et al. (2009) χαρτογράφησαν το ηλιακό δυναμικό της Νότιας Ισπανίας μετά από συγκριτική ανάλυση δύο μεθόδων χωρικής παρεμβολής, της μεθόδου kriging με απομάκρυνση των υπολοίπων (residual kriging) και της μεθόδου συνήθους kriging (ordinary kriging). Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν μετρήσεις τεσσάρων ετών προερχόμενες από 166 σταθμούς, ενσωματώνοντας παράλληλα την επίδραση της σκίασης, αξιοποιώντας το ψηφιοποιημένο μοντέλο του εδάφους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μέθοδος του κανονικού kriging ήταν αποτελεσματικότερη για τη δημιουργία μηνιαίων ηλιακών χαρτών, με το RMSE να λαμβάνει σχεδόν τη μισή τιμή κατά τους καλοκαιρινούς μήνες σε σχέση με τους χειμερινούς. Ωστόσο, οι συγγραφείς πρότειναν τη μέθοδο kriging με απομάκρυνση των υπολοίπων ως ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο.

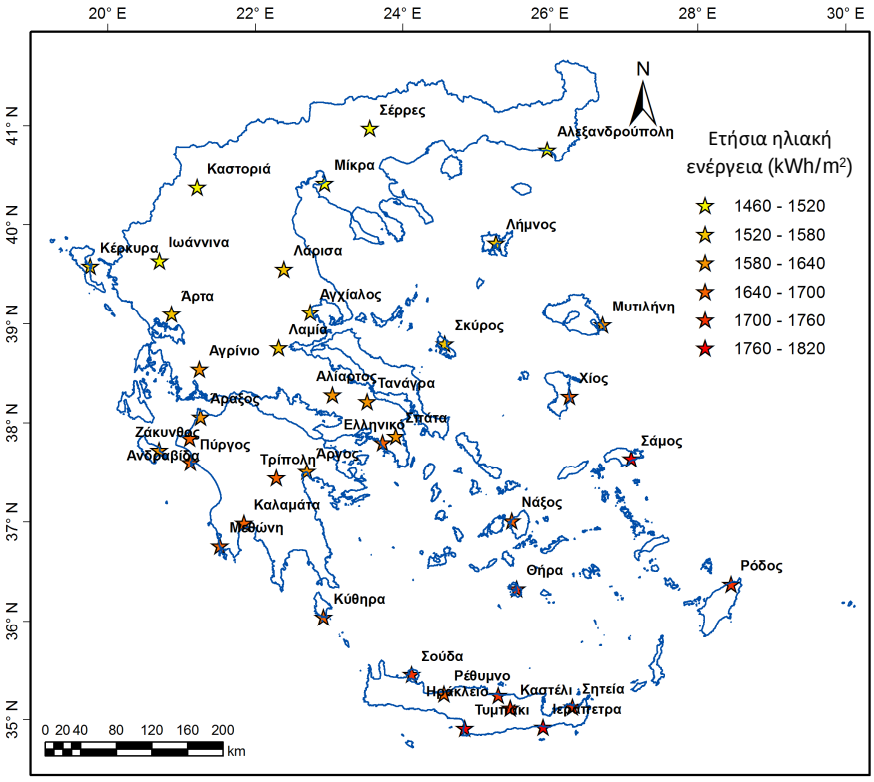
Οι Ruiz-Arias et al. (2011) μελέτησαν δύο διαφορετικά μοντέλα χωρικής παρεμβολής˙ τη μέθοδο kriging με απομάκρυνση των υπολοίπων και τη μέθοδο κανονικού kriging, για τη δημιουργία χάρτη μηνιαίων τιμών ηλιακής ενέργειας της Ανδαλουσίας στη νότια Ισπανία. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποίησαν μετρήσεις χρονικής διάρκειας 10 ετών από 63 σταθμούς. Η μέθοδος kriging με απομάκρυνση των υπολοίπων και με προγνωστικό παράγοντα την ηλιακή ακτινοβολία σε καθαρό ουρανό ή με χρήση του δείκτη αιθριότητας ως μεταβλητή για την ηλιακή ακτινοβολία, παρείχε καλύτερα αποτελέσματα από τη μέθοδο κανονικού kriging. Οι δύο μέθοδοι φάνηκαν χρήσιμες για την αξιοποίηση μεγάλων βάσεων δεδομένων με υψηλή πυκνότητα διασποράς των σταθμών. Τα σφάλματα υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την τεχνική της διασταυρωμένης επαλήθευσης (cross validation) αλλά και με τη βοήθεια δεδομένων επαλήθευσης από σταθμούς μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας.

5.2 Ανάλυση της βάσης δεδομένων

Για τη δημιουργία του ηλιακού χάρτη, χρησιμοποιήθηκαν μηνιαίες και ετήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας από 39 μετεωρολογικούς σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, όπως προέκυψαν από τις ωριαίες χρονοσειρές των ΤΜΕ σε κάθε σταθμό, που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το δίκτυο των επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών, με χρωματικές αποχρώσεις ανάλογα με το εύρος τιμών της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στην οποία κατατάσσεται κάθε σταθμός.

Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 5.4, το δίκτυο των σταθμών είναι ικανοποιητικά πυκνό και ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλη την περιοχή μελέτης. Η μέση πυκνότητα των θέσεων των μετεωρολογικών σταθμών είναι περίπου ένας σταθμός για κάθε 484 km^2 (22 km x 22 km), οι διαφορές γεωγραφικού πλάτος και μήκους μεταξύ των σταθμών δεν είναι μεγαλύτερες από 2,88^o και 5,58^o αντίστοιχα, ενώ οι διακυμάνσεις των αποστάσεων μεταξύ των σταθμών είναι μεταξύ 20 και 800 km.



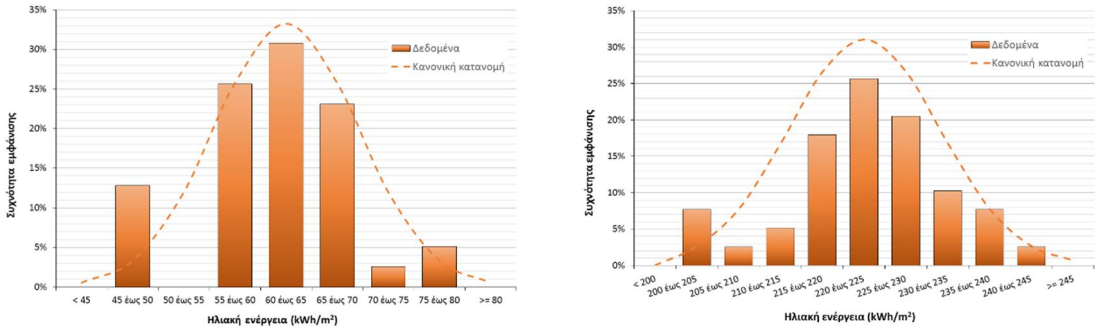
Σχήμα** 5.4: **Γεωγραφική κατανομή των** 39 **επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ

5.2.1 Έλεγχος κανονικότητας

Στον Πίνακα 5.I παρατίθενται οι τιμές των βασικών στατιστικών δεικτών των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ηλιακών χαρτών, ενώ στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η κατανομή συχνοτήτων με την αντίστοιχη καμπύλη κανονικής κατανομής, για το σύνολο των τιμών μηνιαίας ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών, για τους μήνες Ιανουάριο (Σχήμα 5.5α) και Ιούλιο (Σχήμα 5.5β). Όμοια, στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η κατανομή συχνοτήτων καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη κανονικής κατανομής, για το σύνολο των τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας στον ελλαδικό χώρο.

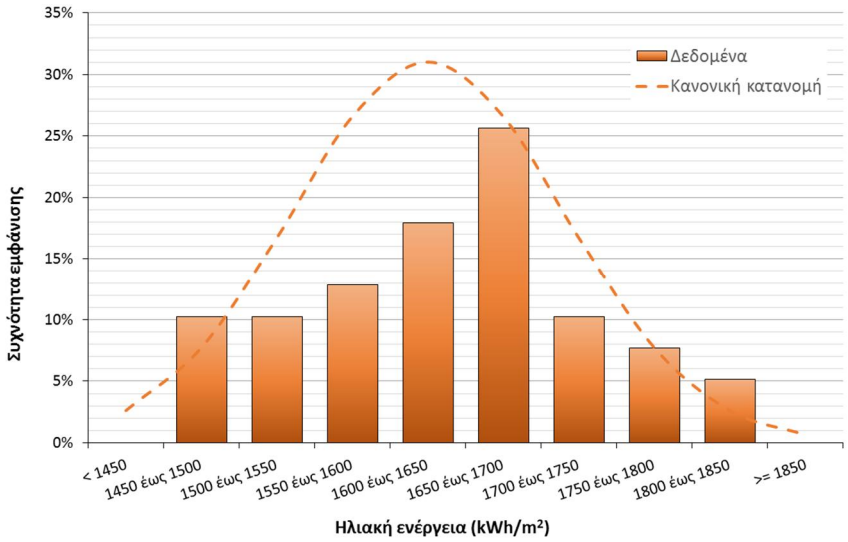
Πίνακας** 5.I: **Στατιστικοί δείκτες μηνιαίων και ετήσιων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο στους 39 επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς

Παράμετρος	**ΙΑΝ**	**ΦΕΒ**	**ΜΑΡ**	**ΑΠΡ**	**ΜΑΪ**	**ΙΟΥΝ**	**ΙΟΥΛ**	**ΑΥΓ**	**ΣΕΠ**	**ΟΚΤ**	**ΝΟΕ**	**ΔΕΚ**	**ΕΤΟΣ**
Ελάχιστη (kWh/m^2)	46,4	68,5	109,0	134,3	169,9	194,7	200,4	185,0	131,5	90,1	54,1	40,4	1460,7
Μέγιστη (kWh/m^2)	76,1	96,0	137,3	175,6	217,2	233,6	241,0	215,3	169,4	129,8	81,5	65,7	1823,0
Μέση (kWh/m^2)	61,3	79,7	122,7	159,4	194,4	216,6	223,0	201,4	152,7	106,6	66,2	52,3	1636,2
Διάμεσος (kWh/m^2)	61,8	79,6	121,8	160,4	194,4	215,4	223,3	202,2	152,9	106,6	65,9	53,4	1636,1
Εύρος μεταβολής (kWh/m^2)	29,7	27,5	28,3	41,3	47,3	38,9	40,6	30,3	37,9	39,7	27,4	25,3	362,3
Τυπική απόκλιση (kWh/m^2)	7,1	6,7	7,4	10,7	11,7	7,7	9,4	7,8	9,6	9,9	7,3	6,6	91,9
Ασυμμετρία	-0,21	0,36	-0,03	-0,61	-0,16	0,06	-0,40	-0,16	-0,05	0,32	0,19	-0,22	-0,03
Κύρτωση	2,97	2,68	2,09	2,66	2,34	3,99	2,94	2,28	2,17	2,42	2,22	2,23	2,32



(α) (β)

Σχήμα** 5.5: **Ιστόγραμμα συχνοτήτων μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών, για τους μήνες (α) Ιανουάριο και (β) Ιούλιο



Σχήμα** 5.6: **Ιστόγραμμα συχνοτήτων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας των 39 επιλεγμένων σταθμών

Εξετάζοντας τις τιμές των στατιστικών παραμέτρων που έχουν προκύψει από την επεξεργασία των μηνιαίων και ετήσιων τιμών ηλιακής ενέργειας, διαπιστώνεται ότι η μέγιστη αναμενόμενη τιμή ετήσιας ηλιακής ενέργειας, σύμφωνα με τα ΤΜΕ των σταθμών, είναι 1823 kWh/m^2, η ελάχι-

στη 1461 kWh/m^2, προσδιορίζοντας ένα εύρος μεταβολής ίσο με 362 kWh/m^2. Το αντίστοιχο εύρος μεταβολής των μηνιαίων τιμών ηλιακής ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 25 και 47 kWh/m^2, με τη μέγιστη διακύμανση να εμφανίζεται το μήνα Μάιο και την ελάχιστη το μήνα Δεκέμβριο.

Από τα στοιχεία του Πίνακα 5.Ι καθώς και από τα Σχήματα 5.5 και 5.6, ελέγχεται η κανονικότητα των μηνιαίων και ετήσιων τιμών ηλιακής ενέργειας, καθώς, για τη δημιουργία αξιόπιστων ηλιακών χαρτών με την εφαρμογή μεθόδων χωρικής παρεμβολής, οι τιμές των δεδομένων θα πρέπει να ακολουθούν σχεδόν κανονική κατανομή. Σε αντίθετη περίπτωση, πριν από την εφαρμογή της χωρικής παρεμβολής, τα δεδομένα θα πρέπει να μετασχηματιστούν.

Συγκρίνοντας τις αριθμητικές τιμές της μέσης τιμής και της διαμέσου (Πίνακας 5.Ι), διαπιστώνεται ότι οι τιμές αυτές ελάχιστα διαφέρουν μεταξύ τους, ενώ οι απόλυτες τιμές των διαφορών τους δεν υπερβαίνουν τις 1,2 kWh/m^2. Η ταύτιση των δύο αυτών μέτρων θέσης, υποδεικνύει ότι οι κατανομές των τιμών ηλιακής ενέργειας στον ελλαδικό χώρο ακολουθούν συμμετρική κατανομή. Κατά τον έλεγχο των τιμών του συντελεστή ασυμμετρίας[4], στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι τιμές παρουσιάζουν αρνητική ή αριστερά ασύμμετρη κατανομή, ενώ σε τέσσερεις περιπτώσεις (Φεβρουάριος, Ιούνιος, Οκτώβριος και Νοέμβριος) οι τιμές παρουσιάζουν θετική ή δεξιά ασύμμετρη κατανομή. Ελέγχοντας τη σημαντικότητα της ασυμμετρίας των κατανομών[5], προκύπτει ότι τα δεδομένα μηνιαίων και ετήσιων τιμών ηλιακής ενέργειας δεν παρουσιάζουν ισχυρή ασυμμετρία, καθώς οι τιμές του συντελεστή ασυμμετρίας δεν είναι στατιστικά σημαντικές (Πίνακας 5.Ι).

Όσον αφορά στην κύρτωση[6], όταν η κατανομή των δεδομένων είναι κανονική τυπική κατανομή, η τιμή της είναι ίση με 3. Οι τιμές της κύρτωσης, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.Ι, κυμαίνονται μεταξύ 2,09 και 3,99. Τη μέγιστη απόκλιση από την τυπική κανονική κατανομή την παρουσιάζει ο μήνας Ιούνιος με τιμή 3,99, στον οποίο η κατανομή χαρακτηρίζεται ως λεπτόκυρτη, και ο μήνας με την αμέσως μικρότερη κύρτωση είναι ο Μάρτιος, του οποίου η τιμή του συντελεστή κύρτωσης είναι ίση με 2,09. Ο μήνας που πλησιάζει περισσότερο την κανονική κατανομή είναι ο Ιανουάριος με τιμή του συντελεστή κύρτωσης ίση με 2,97. Εκτός του Ιουνίου, οι κατανομές των υπόλοιπων μηνών, καθώς επίσης και για το σύνολο του έτους, χαρακτηρίζονται ως πλατύκυρτες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή του συντελεστή κύρτωσης που αντιστοιχεί στην τυπική κανονική κατανομή είναι 3, οι τιμές κύρτωσης των μηνιαίων και ετήσιων δεδομένων ηλιακής ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά, μη σημαντικές.

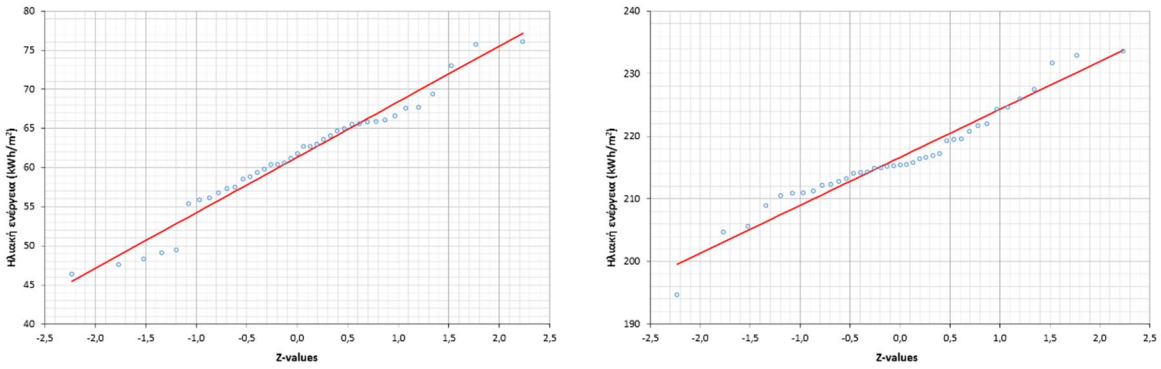
Συνεχίζοντας τη διερεύνηση της κανονικότητας των δεδομένων, εξετάστηκε επιπλέον η κανονικότητα της κατανομής των τιμών ηλιακής ενέργειας για τους 39 επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς με τη βοήθεια των διαγραμμάτων P-P (P-P plots, Ghasemi & Zahediasl 2012). Στο Σχήμα 5.7α εμφανίζεται το διάγραμμα ελέγχου της κανονικότητας των τιμών ηλιακής ενέργειας για το μήνα Ιανουάριο, ενώ στο Σχήμα 5.7β εμφανίζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για το μήνα Ιούνιο. Στο Σχήμα 5.8 εμφανίζεται το διάγραμμα ελέγχου της κανονικότητας των ετήσιων τιμών ηλιακής ενέργειας. Στα σχήματα αυτά συγκρίνονται τα δεδομένα ηλιακής ενέργειας με τις αντίστοιχες θεωρητικές κανονικά κατανεμημένες τιμές.

---

[4] Κεντρική ροπή τρίτης τάξης που υπολογίζεται ως $S = \frac{\sum(H-\bar{H})^3}{n\cdot\sigma^3}$, όπου H οι τιμές ηλιακής ενέργειας, $\bar{H}$ η μέση τιμή, n το πλήθος των τιμών και σ η τυπική απόκλιση.

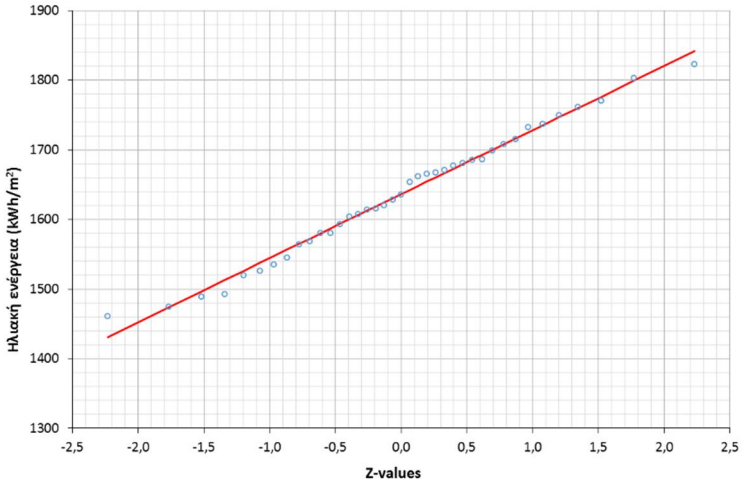
[5] Εάν ο συντελεστής ασυμμετρίας είναι μικρότερος από $\left(2\cdot\sqrt{\frac{6}{n}}\right)$, τότε η ασυμμετρία που παρουσιάζει η κατανομή δεν είναι στατιστικά σημαντική.

[6] Κεντρική ροπή τέταρτης τάξης που υπολογίζεται ως $K = \frac{\sum(H-\bar{H})^4}{n\cdot\sigma^4}$, όπου H οι τιμές ηλιακής ενέργειας, $\bar{H}$ η μέση τιμή, n το πλήθος των τιμών και σ η τυπική απόκλιση.



(α) (β)

Σχήμα** 5.7: **Έλεγχος κανονικότητας των μηνιαίων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας για τους μήνες Ιανουάριο (α) και Ιούνιο (β), των** 39 **επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών



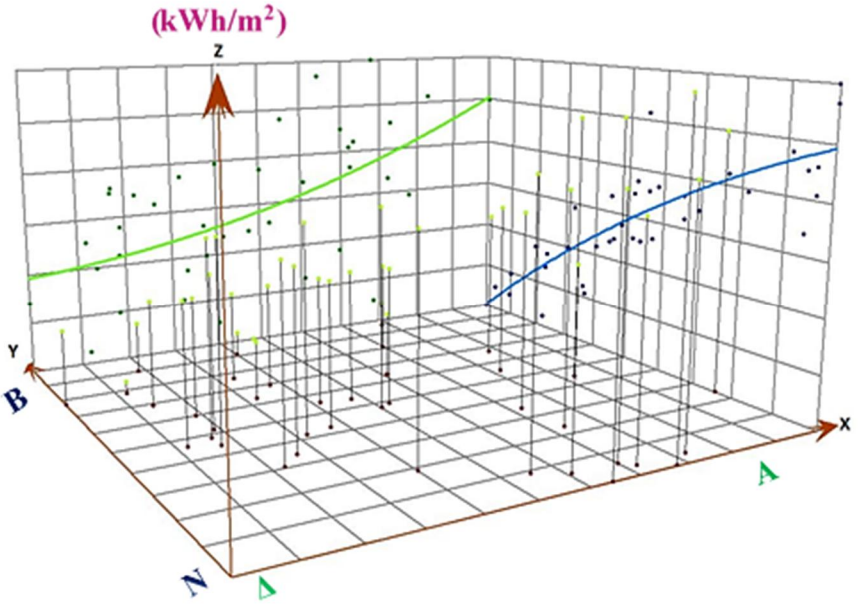
Σχήμα** 5.8: **Έλεγχος κανονικότητας των ετήσιων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας των** 39 **επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών

Όπως είναι φανερό, τα δεδομένα δεν αποκλίνουν σημαντικά από αυτά της κανονικής κατανομής, τα οποία σχηματίζουν την ευθεία γραμμή, γεγονός που οδηγεί, με σχετικά μεγάλη βεβαιότητα, στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για μια κατανομή η οποία συγκλίνει προς την κανονική. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα δεδομένα ηλιακής ενέργειας των 39 μετεωρολογικών σταθμών συμφωνούν με τις παραδοχές, που χρησιμοποιούν οι τεχνικές χωρικής παρεμβολής, δημιουργώντας τις προϋποθέσεις για μια αξιόπιστη και σταθερά συνεχή χωρική πρόβλεψη των περιοχών όπου δεν υπάρχουν δεδομένα ηλιακής ενέργειας.

5.2.2. Χωρική ανάλυση

Για την επιλογή και παραμετροποίηση των μοντέλων χωρικής παρεμβολής, είναι απαραίτητη η διερεύνηση των διαθέσιμων δεδομένων ως προς τη χωρική τους κατανομή. Η χωρική ανάλυση πραγματοποιείται με την εφαρμογή μιας σειράς επιμέρους αναλύσεων, όπως η αναγνώριση των χωρικών δομών με τη χρήση της ανάλυσης εγγύτερου γείτονα, η διερεύνηση των ενδεχόμενων τάσεων που ακολουθούν τα δεδομένα και ο εντοπισμός ενδεχομένως χωρικά ακραίων τιμών, η επιβεβαίωση της χωρικής συσχέτισης των δεδομένων ηλιακής ενέργειας με τη χρήση βαριογραμμάτων και διαγραμμάτων συνδιασποράς, κ.ά. Βασικό έλεγχο, στο πλαίσιο της χωρικής ανάλυσης,

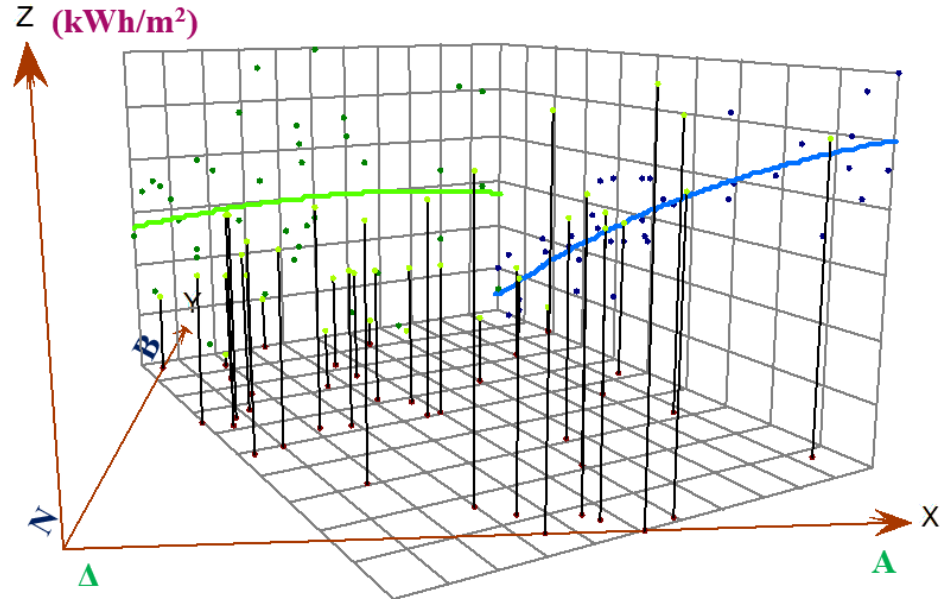
αποτελεί ο έλεγχος χωρικής αυτοσυσχέτισης και ισοτροπίας των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Αυτό διότι η κατανομή των δεδομένων στο χώρο, τουλάχιστον για τις γεωστατιστικές μεθόδους, θα πρέπει να έχει χαρακτηριστικά στάσιμης ή ομοιογενούς διαδικασίας. Ως στάσιμη ορίζεται η χωρική διαδικασία, της οποίας οι στατιστικοί δείκτες είναι ανεξάρτητοι από την απόλυτη θέση στην περιοχή μελέτης, δηλαδή, η μέση τιμή και η διασπορά είναι ανεξάρτητες της θέσης. Στασιμότητα σημαίνει, επίσης, ότι η συνδιασπορά μεταξύ των τιμών σε δυο σημεία εξαρτάται μόνο από τη σχετική θέση των σημείων αυτών, καθώς και τη μεταξύ τους απόσταση και κατεύθυνση και όχι την απόλυτη θέση τους στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις, μια στάσιμη χωρική διαδικασία θα πρέπει να είναι και ισοτροπική. Αυτό ισχύει όταν η συνδιασπορά εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ των σημείων και όχι την κατεύθυνση κατά την οποία διαχωρίζονται. Εάν η μέση τιμή, η διασπορά ή η συνδιασπορά διαφοροποιούνται στην περιοχή μελέτης, τότε η διαδικασία θεωρείται μη-στάσιμη ή ετερογενής και, θεωρητικά, κάποιες από τις μεθόδους χωρικής παρεμβολής δεν μπορούν να εφαρμοστούν (Κουτσόπουλος 2002).



Σχήμα** 5.9: **Τρισδιάστατη απεικόνιση γραμμικών τάσεων των δεδομένων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους** 39 **επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς

Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται η τάση του ετήσιου ηλιακού δυναμικού κατά μήκος των βασικών διευθύνσεων, από νότο προς βορρά και από δύση προς ανατολή.

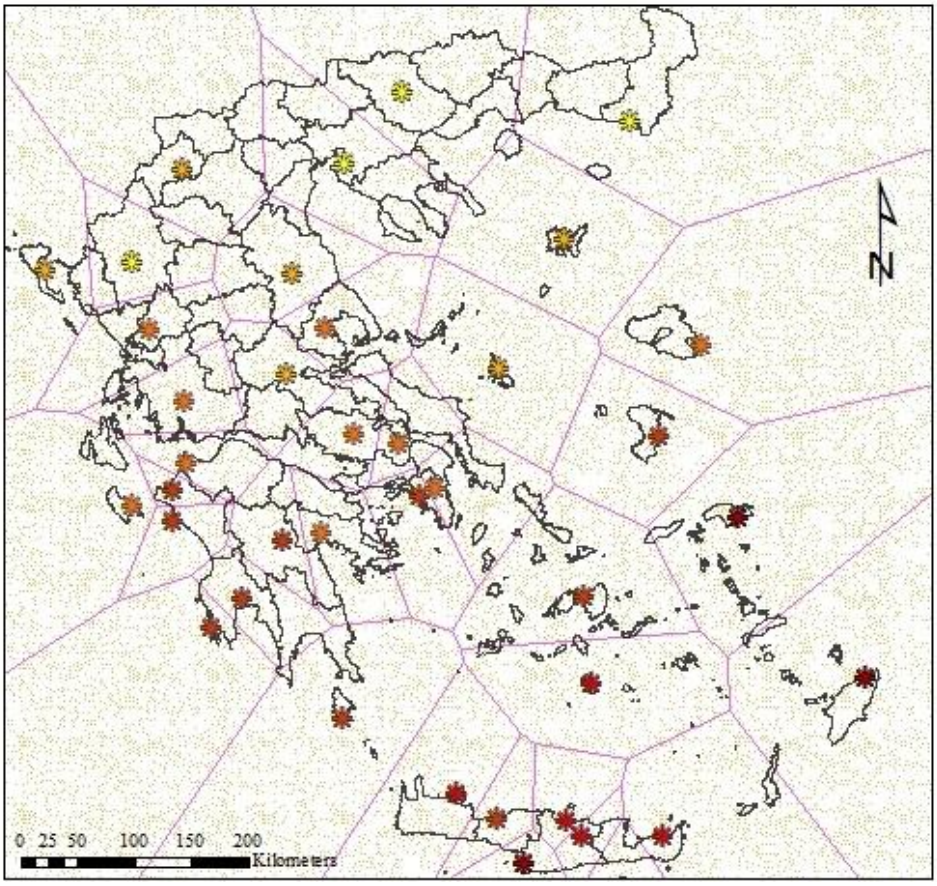
Οι θέσεις των σταθμών αναφοράς φαίνονται στο επίπεδο X-Y με κόκκινο χρώμα. Πάνω από κάθε σημείο, η τιμή ακτινοβολίας δίνεται από το ύψος της μπάρας στη διάσταση Z και στη συνέχεια προβάλλονται, με πράσινο χρώμα στον άξονα X-Z και με γαλάζιο χρώμα στον άξονα Y-Z, ως διαγράμματα διασποράς. Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 5.9, οι γραμμές τάσης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας, τόσο με κατεύθυνση από τα δυτικά προς τα ανατολικά, όσο και από βορρά προς νότο, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από την πράσινη και τη γαλάζια γραμμή, αντίστοιχα, δείχνουν αυξητική εξέλιξη. Αυτή η αυξητική εξέλιξη είναι εντονότερη στη δεύτερη περίπτωση (βορρά-νότου). Η μεταβολή της ετήσιας ηλιακής ενέργειας κατά τη διεύθυνση βορρά-νότου είναι αναμενόμενη, καθώς λόγω της απόκλισης του άξονα της γης από την κάθετη διεύθυνση στο ελλειπτικό επίπεδο περιστροφής της γύρω από τον ήλιο, οι περιοχές που βρίσκονται σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη δέχονται μεγαλύτερες εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα** 5.10: **Τρισδιάστατη απεικόνιση γραμμικών τάσεων των δεδομένων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας με διεύθυνση ΒΒΔ, στους** 39 **επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς

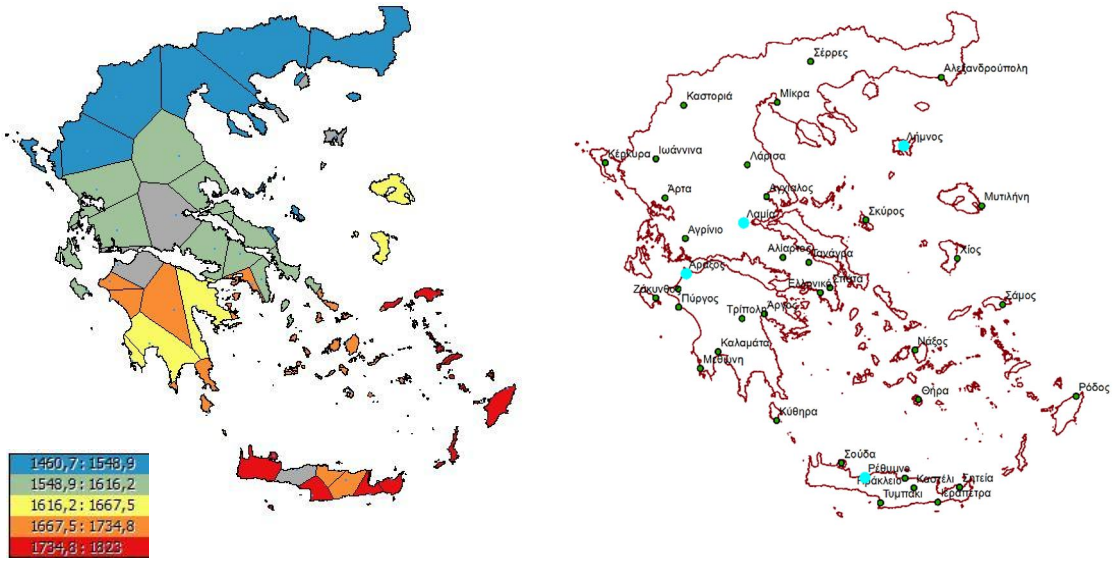
Προκειμένου να διερευνηθεί βαθύτερα η τάση μεταβολής κατά τη διεύθυνση ανατολής-δύσης, πραγματοποιήθηκε σταδιακή μεταβολή του προσανατολισμού της τρισδιάστατης απεικόνισης και ελέγχθηκαν οι τάσεις μεταβολής διαφορετικών διευθύνσεων. Η νέα τρισδιάστατη απεικόνιση απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10 και παρουσιάζει την τάση μεταβολής των ετήσιων τιμών της ηλιακής ενέργειας των σταθμών κατά τις διευθύνσεις ΝΝΑ προς ΒΒΔ (γαλάζια γραμμή) και ΔΝΔ προς ΑΒΑ (πράσινη γραμμή). Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα, κατά τη διεύθυνση ΑΒΑ προς ΔΝΔ οι τιμές της ετήσιας ηλιακής ενέργειας δεν παρουσιάζουν τάσεις μεταβολής, ενώ παραμένει έντονη η μεταβολή των τιμών κατά τη διεύθυνση ΔΝΔ προς ΑΒΑ, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στον ελλαδικό χώρο η πραγματική τάση μεταβολής των τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας είναι κατά τη διεύθυνση ΑΒΑ προς ΔΝΔ και όχι από βορρά προς νότο.

Στη συνέχεια της χωρικής ανάλυσης, εφαρμόζεται η μέθοδος χωρικής παρεμβολής με πολύγωνα επιρροής (πολύγωνα Thiessen, Thiessen 1911). Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται όταν η παράμετρος, στην οποία εφαρμόζεται χωρική παρεμβολή, δεν παρουσιάζει συνεχείς και ομαλά μεταβαλλόμενες τιμές. Σύμφωνα με τη μέθοδο, η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε υποπεριοχές, των οποίων τα όρια προκύπτουν από τις μεσοκαθέτους στις ευθείες που ενώνουν δύο παρακείμενους μετεωρολογικούς σταθμούς. Οι υποπεριοχές που δημιουργούνται, περιλαμβάνουν όλα τα σημεία που βρίσκονται κοντά στο μετεωρολογικό σταθμό που περικλείεται από το πολύγωνο, παρά σε οποιονδήποτε άλλο, ορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την περιοχή επιρροής γύρω από κάθε σταθμό. Κάθε σημείο εντός της περιοχής του πολυγώνου θεωρείται ότι δέχεται την ίδια ετήσια ηλιακή ενέργεια με το σταθμό που περιλαμβάνεται σε αυτό. Η χρήση της μεθόδου στην παρούσα διατριβή αποσκοπεί στην παρουσίαση των πολυγώνων επιρροής γύρω από τους 39 επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς (Σχήμα 5.11). Τα πολύγωνα επιρροής αποτελούν μια γρήγορη μέθοδο συσχέτισης των σημειακών δεδομένων με την περιοχή μελέτης και βοηθούν στην κατανόηση της χωρικής δομής των δεδομένων.



***Σχήμα** 5.11: **Χωρική ανάλυση των δεδομένων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με τη χρήση των πολυγώνων επιρροής** Thiessen*

Από το Σχήμα 5.11 είναι προφανές ότι η μορφή των πολυγώνων εξαρτάται από την πυκνότητα των μετεωρολογικών σταθμών, δηλαδή των σημείων στα οποία το δίκτυο είναι πυκνότερο, τα πολύγωνα που διαμορφώνονται έχουν μικρότερο εμβαδό. Επίσης, τα πολύγωνα επιρροής λαμβάνουν υπόψη μόνο τη θέση του σταθμού και όχι τα φυσικογεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Εξετάζοντας τις περιοχές επιρροής γύρω από τους μετεωρολογικούς σταθμούς, παρατηρούμε ότι στα νησιά, λόγω του μικρού αριθμού δεδομένων, προκύπτουν μεγάλης έκτασης περιοχές επιρροής, με αποτέλεσμα η τιμή ηλιακής ενέργειας στις περιοχές αυτές να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή ηλιακής ενέργειας του μετεωρολογικού σταθμού που βρίσκεται εντός του πολυγώνου. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι ο σκοπός των ηλιακών χαρτών που δημιουργούνται στην παρούσα διατριβή, είναι η αξιοποίησή τους κυρίως στις χερσαίες εφαρμογές ηλιακών συστημάτων, οπότε η ακρίβεια των τιμών ηλιακής ενέργειας στις θαλάσσιες περιοχές δεν αποτελεί προτεραιότητα. Επίσης, με τη βοήθεια των πολυγώνων επιρροής εντοπίζονται οι περιοχές όπου τα μοντέλα χωρικής παρεμβολής αντιμετωπίζουν δυσκολία στην πρόβλεψη της ηλιακής ενέργειας. Οι περιοχές αυτές βρίσκονται στα σημεία όπου τέμνεται μεγάλος αριθμός πολυγώνων. Στις συγκεκριμένες περιοχές, η ακρίβεια πρόβλεψης μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση των δεδομένων ηλιακής ενέργειας, γεγονός όμως που στην παρούσα διατριβή, η εισαγωγή δεδομένων ηλιακής ενέργειας τα οποία δεν έχουν υπολογιστεί με την ίδια διαδικασία θα διαφοροποιούσε την αξιοπιστία της βάσης δεδομένων.



(α) (β)

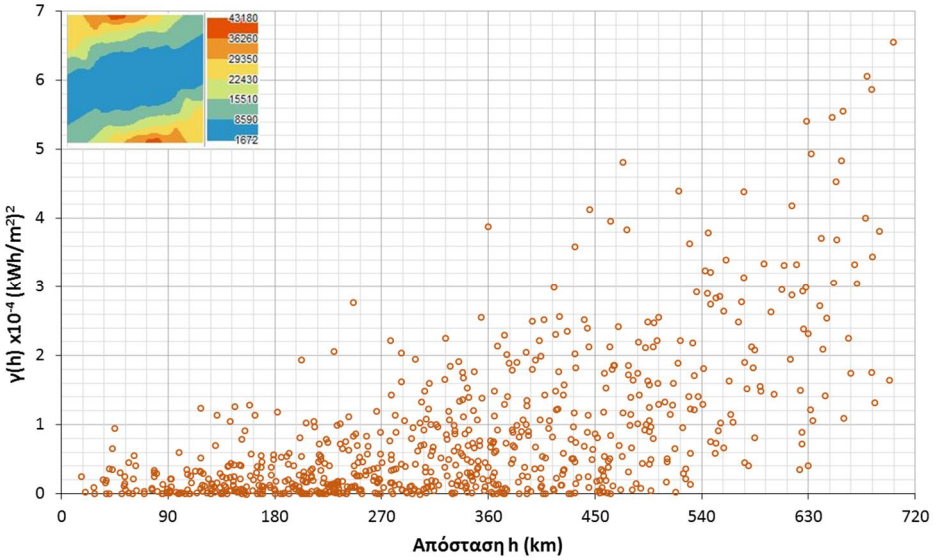
Σχήμα** 5.12: **Χωρική ανάλυση των δεδομένων ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με εφαρμογή ομαδοποιημένων πολυγώνων επιρροής

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται η εφαρμογή των πολυγώνων επιρροής με ομαδοποίηση, η οποία μπορεί να μας οδηγήσει σε τιμές ηλιακής ενέργειας που χαρακτηρίζονται εν δυνάμει ακραίες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της ηλιακής ενέργειας γειτονικών πολυγώνων. Στο Σχήμα 5.12α, οι τιμές ηλιακής ενέργειας έχουν χωριστεί σε 5 ζώνες και κάθε πολύγωνο έχει χρωματισθεί ανάλογα με τη ζώνη στην οποία ανήκει. Στην περίπτωση όπου η ζώνη στην οποία ανήκει είναι διαφορετική από τις αντίστοιχες των γειτονικών του πολυγώνων, τότε αυτό απεικονίζεται με γκρι χρώμα. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 5.12β παρουσιάζονται οι σταθμοί των οποίων οι τιμές δεν βρίσκονται σε συμφωνία με τους γειτονικούς, σύμφωνα πάντα με τη ζώνη στην οποία κατετάγησαν. Οι σταθμοί αυτοί είναι του Ρεθύμνου, της Αράξου, της Λαμίας και της Λήμνου, των οποίων οι τιμές θεωρούνται, σύμφωνα με την ανάλυση, τοπικά ακραίες.

Για να προσδιοριστεί η ισχύς της υπόθεσης ότι δηλ. οι τιμές ηλιακής ενέργειας σε έναν σταθμό επηρεάζονται από αυτές παρακείμενων σταθμών και να αξιολογηθεί πώς αυτή η «ομοιότητα» μεταβάλλεται συναρτήσει της απόστασης, πραγματοποιήθηκε διερευνητική ανάλυση των χωρικών τιμών ηλιακής ενέργειας εξετάζοντας την ημιδιασπορά. Τα νέφη βαριογράμματος και συνδιακύμανσης απεικονίζουν τη στατιστική συσχέτιση συναρτήσει της απόστασης, σχεδιάζοντας τιμές βαριογράμματος και συνδιακύμανσης για όλα τα ζεύγη των θέσεων μέσα στο σύνολο των δεδομένων, σε συνάρτηση με την απόσταση που χωρίζει τις δύο θέσεις. Το νέφος βαριογράμματος παρουσιάζει την ημιδιακύμανση μεταξύ δύο σημείων που βρίσκονται σε απόσταση h. Στην παρούσα διατριβή η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όχι μόνο για την εξέταση των τοπικών χαρακτηριστικών της χωρικής συσχέτισης των τιμών της ηλιακής ενέργειας, αλλά και τον εντοπισμό ενδεχόμενων τοπικών ακραίων τιμών και κατευθυνόμενων τάσεων. Οι τιμές του βαριογράμματος υπολογίζονται, σύμφωνα με τον Cressie (1993), ως:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(H_{(i)} - H_{(i+h)} \right)^2 \qquad (5.1)$$

όπου n ο αριθμός των ζευγών των τιμών ηλιακής ενέργειας που απέχουν μεταξύ τους απόσταση h και H οι τιμές ηλιακής ενέργειας στις αντίστοιχες θέσεις (i) και $(i+h)$. Οι τιμές που υπολογίζονται εκφράζουν το ήμισυ του μέσου των διαφορών των τετραγώνων μεταξύ των τιμών συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης.

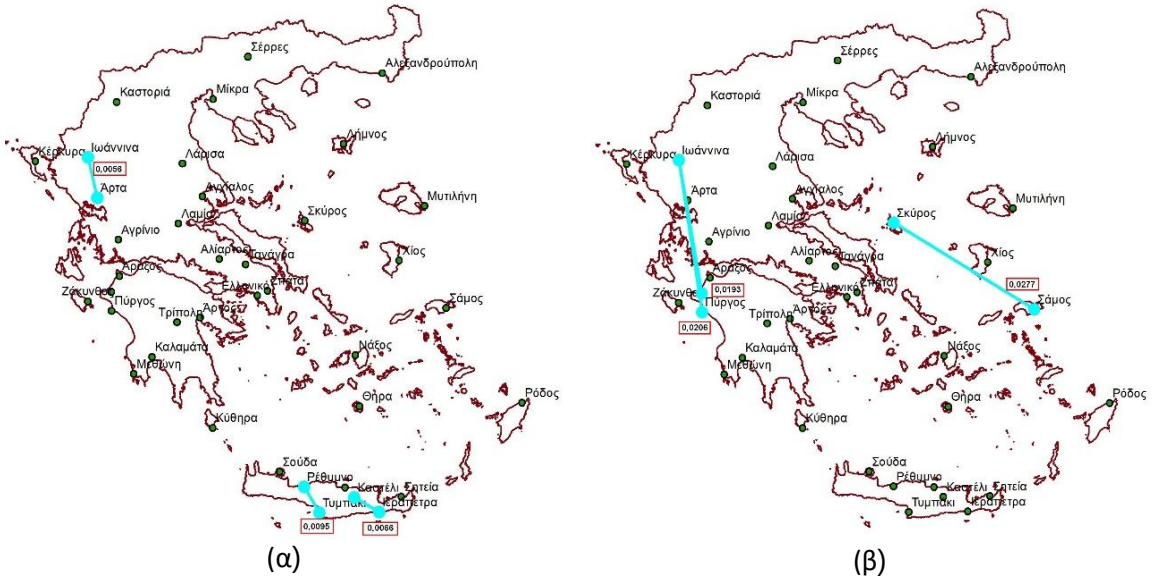


Σχήμα** 5.13: **Νέφος και επιφάνεια βαριογράμματος των τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας των** 39 **επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών

Για τη δημιουργία του βαριογράμματος, υπολογίστηκαν αρχικά τα ζεύγη των αποστάσεων των επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών και, στη συνέχεια, ομαδοποιήθηκαν με κριτήριο την απόσταση και την κατεύθυνση. Για κάθε ζεύγος μετεωρολογικών σταθμών υπολογίστηκε ένα εύρος τιμών απόστασης και για κάθε εύρος δημιουργήθηκε μία κλάση στην οποία ταξινομήθηκαν τα ζεύγη αποστάσεων. Για κάθε ζεύγος απόστασης που ανήκει στη μια κλάση, προσδιορίζεται η τιμή $\gamma(h)$. Ο υπολογισμός της ημιδιακύμανσης πραγματοποιείται είτε προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, οπότε προκύπτουν τα γενικευμένα βαριογράμματα, είτε προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση από όπου προκύπτουν τα κατευθυντικά βαριογράμματα. Στα γενικευμένα βαριογράμματα γίνεται η παραδοχή ότι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι η ίδια προς οποιαδήποτε κατεύθυνση (ισοτροπικό φαινόμενο). Στο Σχήμα 5.13, παρουσιάζεται το γενικευμένο νέφος βαριογράμματος, στο οποίο οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών κατηγοριοποιήθηκαν σε 10 κλάσεις με απόσταση ανά κλάση τα 72 km. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ημιδιακύμανση των τιμών δύο σημείων που σχηματίζουν ζεύγος (κατακόρυφος άξονας), δεν είναι σημαντική για μικρές αποστάσεις, εξασφαλίζοντας, παρά το μικρό αριθμό δεδομένων, την ύπαρξη χωρικής συσχέτισης του ηλιακού δυναμικού στον ελλαδικό χώρο, υποδεικνύοντας ότι η χωρική παρεμβολή μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλη αξιοπιστία.

Διερευνώντας τις τιμές ημιδιακύμανσης, παρουσιάζονται περιπτώσεις χωρικά ακραίων τιμών, δηλαδή σχετικά κοντινών μετεωρολογικών σταθμών οι οποίοι παρουσιάζουν μεταξύ τους μεγάλη διαφοροποίηση στις τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα ζεύγη των σταθμών, που βρίσκονται σε απόσταση έως 90 km (Σχήμα 5.14α), Ιεράπετρα και Καστέλλι (0,007), Ρέθυμνο και Τυμπάκι (0,009), Ιωάννινα και Άρτα (0,006). Όσον αφορά σε σταθμούς με μεταξύ τους απόσταση μεταξύ 180 και 270 km (Σχήμα 5.14β), αυξημένες τιμές ημιδιακύμανσης εμφανίζουν τα ζεύγη των σταθμών Πύργου και Ιωαννίνων (0,021), Σάμου και Σκύρου (0,028), Ανδραβίδας και Ιωαννίνων (0,019).

Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται εκτός από το νέφος και η επιφάνεια βαριογράμματος (έγχρωμη επιφάνεια πάνω αριστερά) η οποία δημιουργείται κατατάσσοντας τις τιμές ημιδιακύμανσης σε κατηγορίες ανάλογα με την τιμή και τον προσανατολισμό, καταλήγοντας σε μια ομαλοποιημένη επιφάνεια, η οποία παρουσιάζει τη χωρική κατανομή των τιμών ημιδιακύμανσης που εμφανίζουν οι τιμές ηλιακής ενέργειας.



(α) (β)

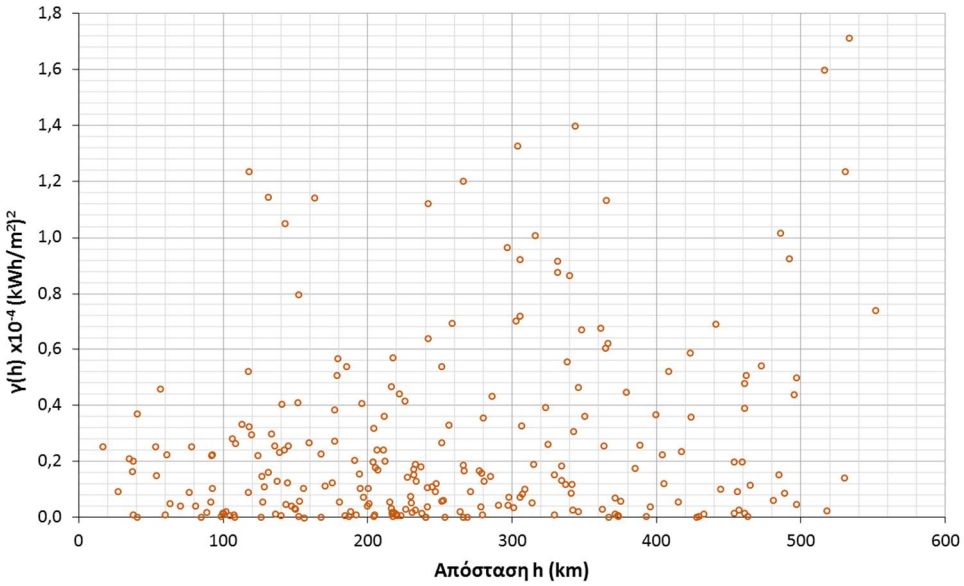
Σχήμα** 5.14: **Ζεύγη μετεωρολογικών σταθμών που παρουσιάζουν ασυνήθιστα υψηλές τιμές ημιδιακύμανσης σε σχέση με ζεύγη που βρίσκονται σε αντίστοιχο εύρος αποστάσεων

Ο χρωματισμός της επιφάνειας αλλάζει με την απόσταση από το κέντρο των αρχικών συντεταγμένων της υπό μελέτη περιοχής και τα θερμά χρώματα (κόκκινο-πορτοκαλί) διαδέχονται τα ψυχρά (γαλάζιο-κυανό). Αντίστοιχα, αυξάνονται οι τιμές της ημιδιακύμανσης και μειώνεται η χωρική αυτοσυσχέτιση μεταξύ των σταθμών. Από το σχήμα φαίνεται χαρακτηριστικά ότι οι σταθμοί, που βρίσκονται κατά μήκος της διεύθυνσης των 75° δεξιόστροφα του βορρά, παρουσιάζουν μικρότερες τιμές ημιδιακύμανσης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το νέφος βαριογράμματος κατά μήκος της διεύθυνσης των 75° δεξιόστροφα του βορρά (Σχήμα 5.15). Προκειμένου να αξιοποιηθεί το στοιχείο αυτό κατά την εφαρμογή των μεθόδων χωρικής παρεμβολής, θα πρέπει να μην αποτελεί τυχαίο γεγονός. Εξετάζοντας τη γεωμορφολογία της Ελλάδας, η οροσειρά της Πίνδου, με γενική κατεύθυνση ΒΒΔ προς ΝΝΑ, διαιρεί τη χώρα σε δύο τμήματα με πολλές κλιματολογικές διαφορές (Φωτιάδη et al. 1996). Στη δυτική Ελλάδα οι ετήσιες βροχοπτώσεις υπερβαίνουν τα 1200 mm, ενώ στην ανατολική Ελλάδα η αντίστοιχη τιμή είναι 400 mm (Στάθης 2004).

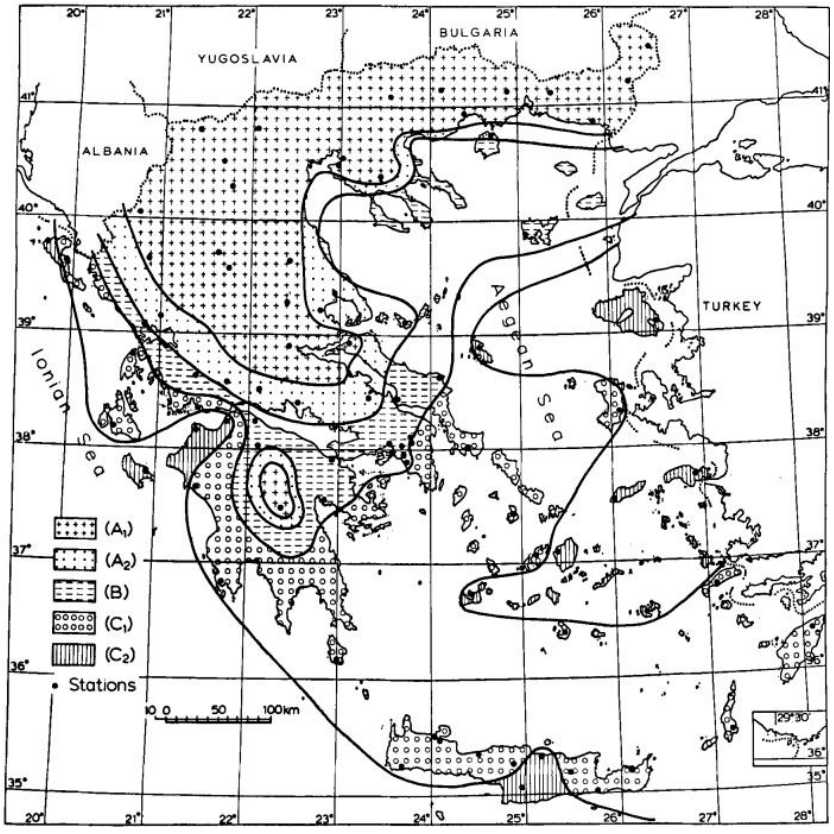
Οι Kotinis-Zambakas et al. (1984), χρησιμοποιώντας ως κριτήριο 5 κατηγορίες ετήσιας πορείας του μέσου μηνιαίου αριθμού ημερών καταιγίδας, σχεδίασαν τις αντίστοιχες κλιματικές μεταβατικές ζώνες της Ελλάδας (Σχήμα 5.16). Οι A_1 και A_2, είναι ζώνες ηπειρωτικές μεσογειακές θερμού θέρους, η Β, κύρια μεταβατική ζώνη και οι C_1 και C_2, γνήσιες μεσογειακές ζώνες με ατμοσφαιρική ευστάθεια. Η κατανομή και το σχήμα των ζωνών, όπως αποτυπώθηκαν στην εργασία των Kotinis-Zambakas et al. (1984) επαληθεύουν την κύρια διεύθυνση, όπως προκύπτει και από την παρούσα χωρική ανάλυση, επιβεβαιώνοντας ότι η κύρια διεύθυνση που προκύπτει κατά τη χωρική ανάλυση δεν αποτελεί τυχαίο γεγονός.

Σύμφωνα με την επιφάνεια του βαριογράμματος (Σχήμα 5.13), η μεγαλύτερη απόκλιση τιμών μεταξύ των μετεωρολογικών σταθμών, παρουσιάζεται κατά τη διεύθυνση ΝΝΑ προς ΒΒΔ, διεύθυνση η οποία επιβεβαιώθηκε και κατά τη διερεύνηση τάσεων (Σχήμα 5.10). Το γεγονός αυτό μας

οδηγεί στο ασφαλές συμπέρασμα ότι οι τιμές ηλιακής ενέργειας κατά μήκος της συγκεκριμένης διεύθυνσης παρουσιάζουν εντονότερη μεταβολή, συγκριτικά με τη μεταβολή που παρατηρείται κατά μήκος οποιασδήποτε άλλης διεύθυνσης.

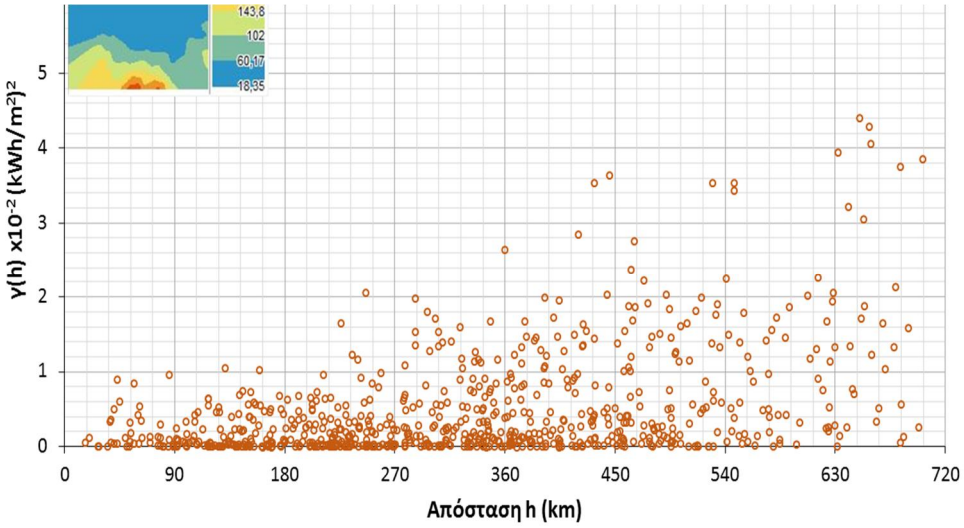


Σχήμα** 5.15: **Νέφος βαριογράμματος των μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται κατά μήκος της διεύθυνσης** 75° **δεξιόστροφα του βορρά

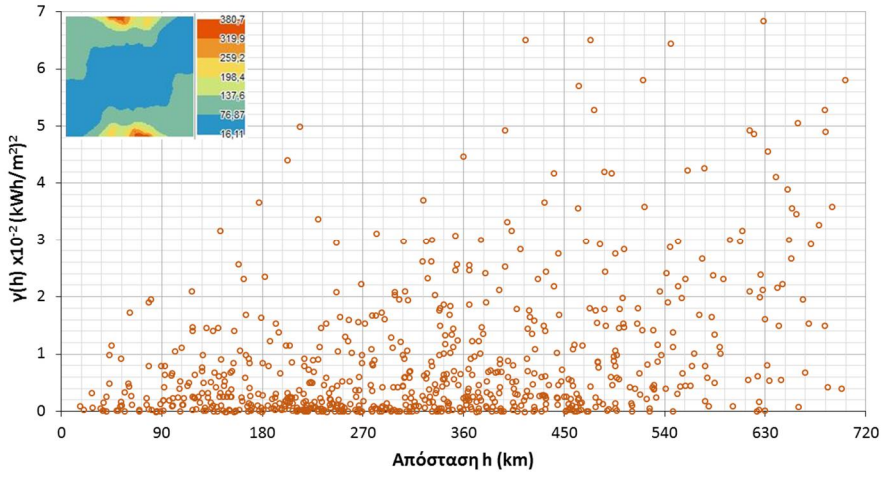


***Σχήμα** 5.16: **Μεταβατικές κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα με κριτήριο την ετήσια μεταβολή του μέσου μηνιαίου αριθμού καταιγίδων** (Kotinis-Zambakas et al. 1984)*

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα νέφη και επιφάνειες βαριογραμμάτων για τις μηνιαίες τιμές ηλιακής ενέργειας δύο ενδεικτικών μηνών του έτους, του Ιανουαρίου (Σχήμα 5.17) και Ιουλίου (Σχήμα 5.18). Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι, σύμφωνα με τη μεταβολή των τιμών ημιδιακύμανσης, το μήνα Ιανουάριο παρουσιάζεται εντονότερη χωρική συσχέτιση του ηλιακού δυναμικού με σημαντικά μικρότερη διασπορά των τιμών ημιδιακύμανσης μεταξύ των μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους. Εξετάζοντας τις επιφάνειες βαριογραμμάτων των δύο μηνών, διαπιστώνεται ότι το μήνα Ιανουάριο, κατά μήκος της διεύθυνσης βορρά-νότου εμφανίζεται εντονότερη μεταβολή τιμών ημιδιακύμανσης, ενώ το μήνα Ιούλιο, η διεύθυνση αυτή μεταβάλλεται σε ΝΔ-ΒΑ.

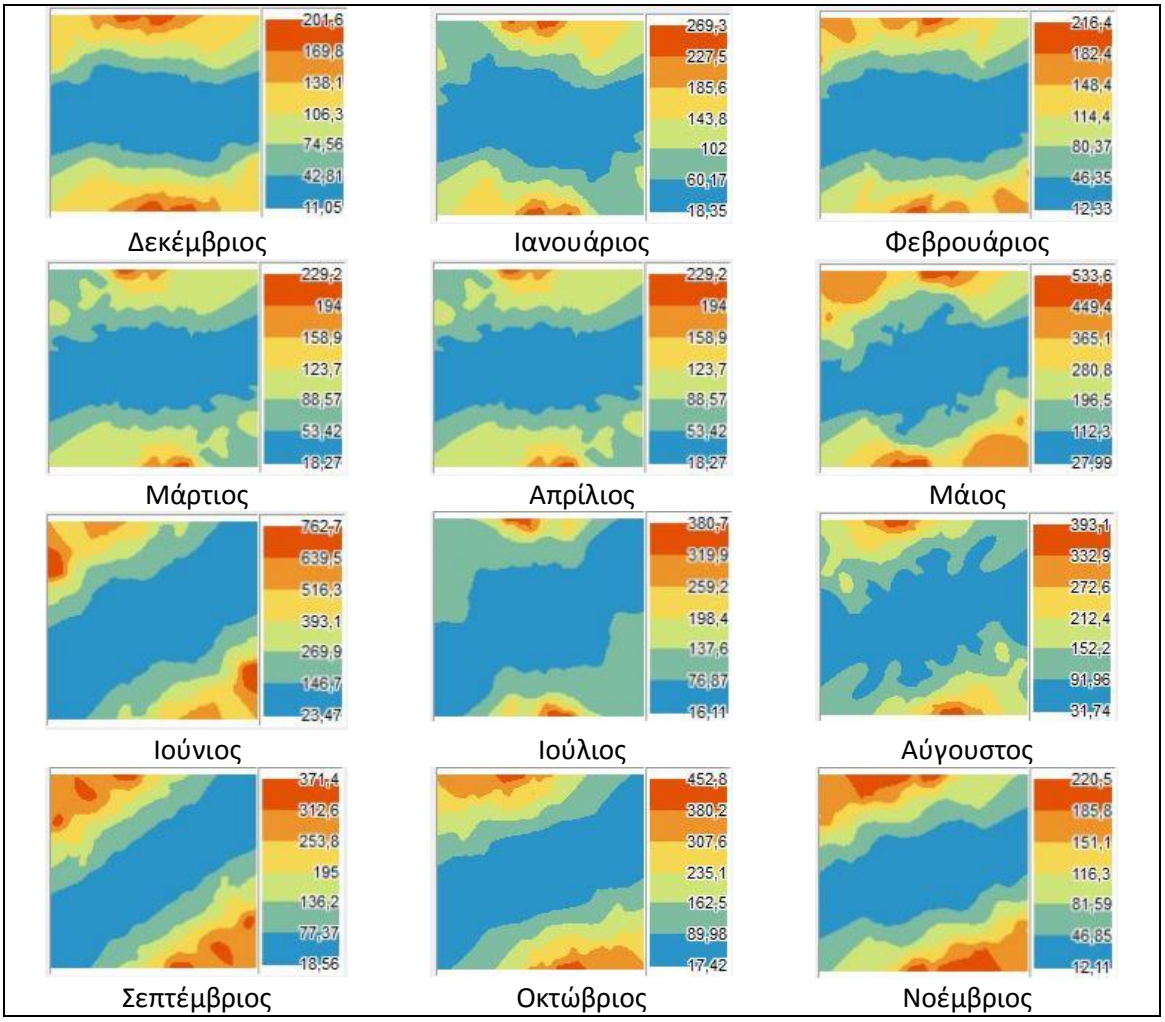


Σχήμα** 5.17: **Νέφος και επιφάνεια βαριογράμματος των μηνιαίων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας Ιανουαρίου των** 39 **επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών



Σχήμα** 5.18: **Όπως το Σχήμα** 5.17, **αλλά για τον Ιούλιο

Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της διεύθυνσης που εμφανίζουν τα μηνιαία διαγράμματα ημιδιακύμανσης, εξετάσθηκαν οι επιφάνειες βαριογραμμάτων όλων των μηνών του έτους.



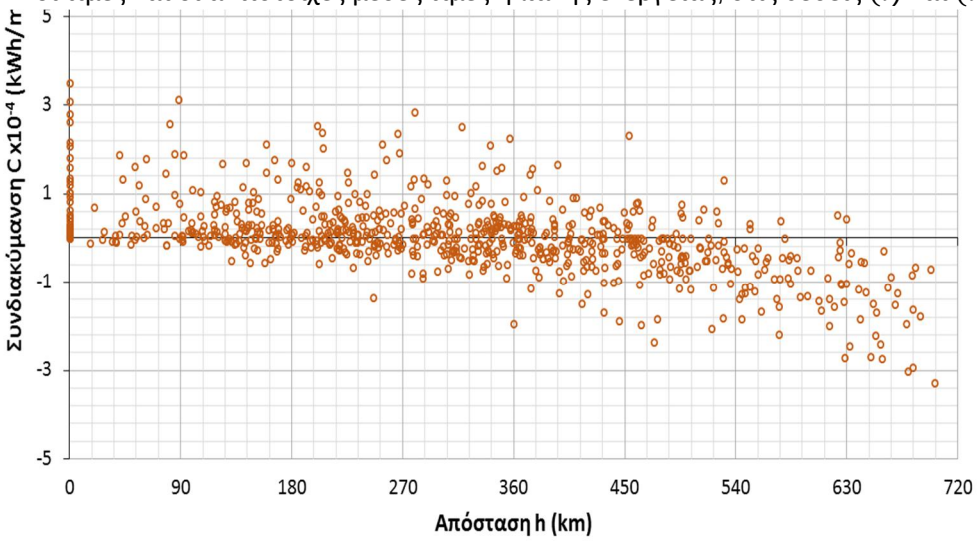
Σχήμα** 5.19: **Επιφάνειες βαριογραμμάτων των μηνιαίων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας για κάθε μήνα του έτους των** 39 **επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών

Από το Σχήμα 5.19 διαπιστώνεται ότι κατά την περίοδο του χειμώνα και της άνοιξης, οι τιμές ημιδιακύμανσης παρουσιάζουν έντονη χωρική συσχέτιση, κυρίως κατά τη διεύθυνση βορρά-νότου. Τις υπόλοιπες εποχές του έτους, η διεύθυνση αυτή μεταβάλλεται προς τα δυτικά, παρουσιάζοντας στους μήνες από Ιούνιο μέχρι Σεπτέμβριο μέγιστη απόκλιση από το βορρά. Καθώς οι τιμές της ηλιακής ενέργειας είναι υψηλότερες κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, η τάση χωρικής συσχέτισης των τιμών ημιδιακύμανσης σε ετήσια βάση επηρεάζεται από την τάση που εμφανίζεται κατά τη θερμή περίοδο του έτους, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται η διεύθυνση ΝΝΑ-ΒΒΔ ως εκείνη με την εντονότερη μεταβολή των τιμών ημιδιακύμανσης.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της χωρικής κατανομής, στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται το νέφος συνδιακύμανσης των ετήσιων τιμών ηλιακής ενέργειας. Οι τιμές συνδιακύμανσης υπολογίζονται ως:

$$C = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(H_{(i)} - \overline{H}_{(i)}\right)\cdot\left(H_{(i+h)} - \overline{H}_{(i+h)}\right) \qquad (5.2)$$

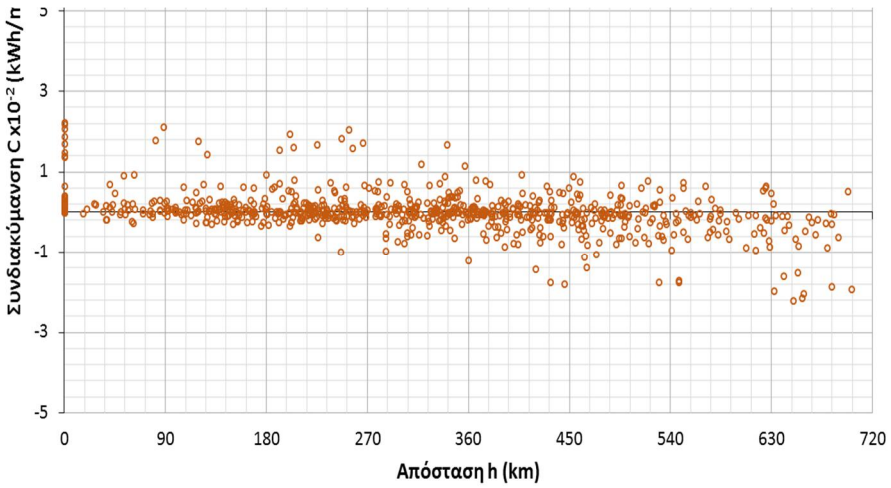
όπου n, ο αριθμός των ζευγών των τιμών ηλιακής ενέργειας που απέχουν μεταξύ τους απόσταση h και H, $\bar{H}$ οι τιμές και οι αντίστοιχες μέσες τιμές ηλιακής ενέργειας, στις θέσεις (i) και $(i+h)$.



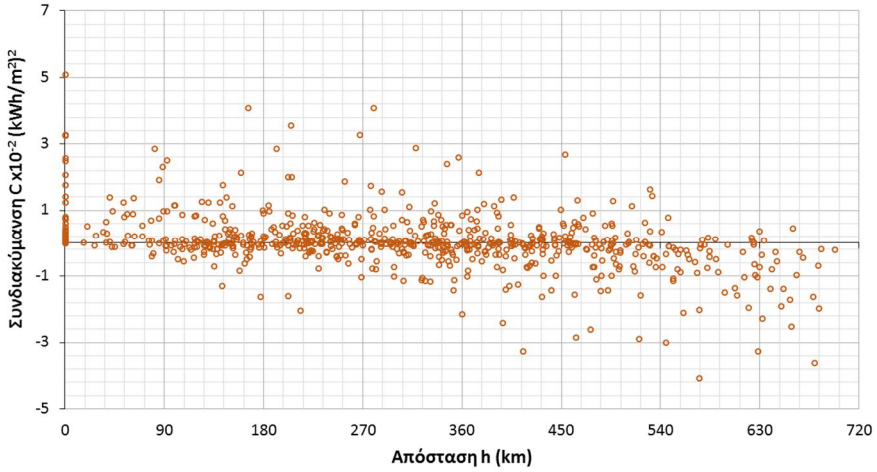
Σχήμα** 5.20: **Νέφος συνδιακύμανσης όλων των ζευγών τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας των 39 υπό μελέτη μετεωρολογικών σταθμών

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.20, για διάφορα ζεύγη αποστάσεων (ακόμα και σταθμών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους), οι τιμές συνδιακύμανσης είναι μηδενικές. Άρα δεν υπάρχει χωρική συσχέτιση μεταξύ τους. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι σε σταθμούς, μεταξύ των οποίων η απόσταση είναι μικρότερη των 360 km, η συνδιακύμανση έχει υψηλή τιμή, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις, η τιμή της συνδιακύμανσης σχετίζεται αρνητικά με την απόσταση. Αυτή η αντιστρόφως ανάλογη σχέση των μεταβλητών συσχετισμού και απόστασης δείχνει ότι η συσχέτιση μειώνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των σταθμών και αντίστροφα. Επίσης, σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 360 km επικρατούν κυρίως αρνητικές τιμές συνδιακύμανσης, υποδηλώνοντας ότι, πέρα από αυτήν την απόσταση, η συνδιακύμανση των τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας μεταξύ των μετεωρολογικών σταθμών είναι ασήμαντη.

Στα Σχήματα 5.21 και 5.22 παρουσιάζονται τα νέφη τιμών συνδιακύμανσης για τις μηνιαίες τιμές ηλιακής ενέργειας των μηνών Ιανουαρίου και Ιουλίου, αντίστοιχα. Παρατηρώντας τα διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι οι τιμές συνδιακύμανσης τη χειμερινή περίοδο παρουσιάζουν μικρότερο εύρος μεταβολής με την πλειοψηφία των τιμών να βρίσκονται μεταξύ -0,01 και 0,01. Όπως και στην περίπτωση του νέφους συνδιακύμανσης των ετήσιων τιμών, έτσι και εδώ παρατηρείται αύξηση των αρνητικών τιμών συνδιακύμανσης μετά την απόσταση των 360 km, οδηγώντας μας στο συμπέρασμα ότι η απόσταση αυτή αποτελεί το όριο χωρικής συσχέτισης μεταξύ των σταθμών. Τον Ιούλιο, οι τιμές συνδιακύμανσης των μηνιαίων τιμών ηλιακής ενέργειας παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα σε σχέση με τον Ιανουάριο, καθώς τον Ιούλιο το 85% των τιμών συνδιακύμανσης βρίσκονται μεταξύ -0,01 και 0,01 ενώ το αντίστοιχο ποσοστό, τον Ιανουάριο, είναι 95%.



Σχήμα** 5.21: **Όπως στο Σχήμα** 5.20, **αλλά για τον Ιανουάριο



Σχήμα** 5.22: **Όπως στο Σχήμα** 5.20, **αλλά για τον Ιούλιο

Από τα διαγράμματα συνδιακύμανσης (Σχήματα 5.20 έως 5.22) διαπιστώνεται ότι τόσο οι ετήσιες όσο και οι μηνιαίες τιμές ηλιακής ενέργειας σε καμία απόσταση μεταξύ τους δεν παρουσιάζουν αυξημένη συσχέτιση, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι τιμές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Οι τιμές της συνδιακύμανσης, σε κάθε περίπτωση, δεν ξεπερνούν το ±0,05, τιμή η οποία είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Με βάση το γεγονός ότι η συνδιακύμανση αποτελεί ένα μέτρο που εκφράζει τη σχέση μεταξύ των δεδομένων δύο περιοχών, παρατηρούμε ότι οι τιμές της είναι πολύ κοντά στο μηδέν, σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Άρα, η σχέση μεταξύ απόστασης των σταθμών και τιμών ετήσιας ολικής (Σχήμα 5.20) και μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας Ιανουαρίου (Σχήμα 5.21) και Ιουλίου (Σχήμα 5.22), ουσιαστικά δεν ορίζεται.

Τέλος, ολοκληρώνοντας τη χωρική ανάλυση, εξετάζεται η χωρική αυτοσυσχέτιση των τιμών ηλιακής ενέργειας των σταθμών. Για την αξιολόγηση της χωρικής αυτοσυσχέτισης βάσει της θέσης των σταθμών στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης I του Moran (Moran 1948), ο οποίος αποτελεί μέτρο της αυτοσυχέτισης μιας μεταβλητής στο χώρο και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(H_{(i)} - \bar{H}\right)\cdot\left(H_{(j)} - \bar{H}\right)}{W \cdot \sum_{i=1}^{n}\left(H_{(i)} - \bar{H}\right)} \quad (5.3)$$

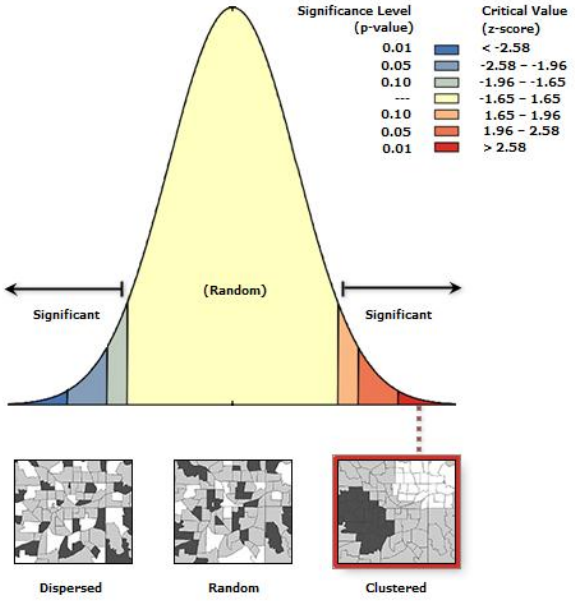
όπου: n, ο αριθμός των σταθμών,

H, η τιμή της ηλιακής ενέργειας στις θέσεις (i) και (j),

$\bar{H}$, η μέση τιμή της ηλιακής ενέργειας, και

W, το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας που εξαρτώνται από την απόσταση των σταθμών (i) και (j) $\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\right)$. Ο υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας w_{ij} πραγματοποιείται με τη συνάρτηση αντίστροφης απόστασης των θέσεων.

Οι τιμές του δείκτη I του Moran κυμαίνονται μεταξύ του -1 και του 1. Οι θετικές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν ένα ομαδοποιημένο πρότυπο (pattern), ενώ οι αρνητικές ένα διασκορπισμένο/τυχαίο. Τέλος, τιμές του δείκτη κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν απουσία χωρικής αυτοσυσχέτισης. Για την αξιολόγηση των τιμών του δείκτη I του Moran υπολογίζονται το επίπεδο σημαντικότητας p και η τιμή της ανηγμένης μεταβλητής z. Η μεταβλητή αυτή ονομάζεται ανηγμένη διότι τις διαφορές της μεταβλητής x από τη μέση τιμή της, τις ανάγουμε σε μονάδες τυπικής απόκλισης της ίδιας μεταβλητής. Η τιμή της z βοηθά στη λήψη της απόφασης για το αν θα πρέπει να παραλειφθεί η εξεταζόμενη τιμή. Ως κρίσιμη τιμή της z θεωρείται η τιμή 1,96 (Σχήμα 5.23) σε επίπεδο σημαντικότητας $p = 0{,}05$ ή επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



***Σχήμα** 5.23: **Επεξηγηματικό διάγραμμα κατανομής τιμών συντελεστή I του** Moran*

Στον Πίνακα 5.II παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη I του Moran, για κάθε μήνα αλλά και το σύνολο του έτους. Οι τιμές ηλιακής ενέργειας των σταθμών διαπιστώνεται ότι αποτελούν ένα σχετικά ομαδοποιημένο πρότυπο, καθώς οι τιμές του δείκτη είναι στατιστικά διαφορετικές από το μηδέν και, επομένως, η τιμή ηλιακής ενέργειας ενός σταθμού δεν είναι τυχαία, αλλά συσχετίζεται με την τιμή των γειτονικών της σταθμών (Σχήμα 5.23). Οι τιμές z είναι μεγαλύτερες από 2,58 και το επίπεδο σημαντικότητας p μικρότερο από 0,0004, οδηγώντας με μεγάλη βεβαιότητα ($1 - p >$ 99%) στην απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης της ανάλυσης χωρικών προτύπων, δηλαδή ότι το υπό μελέτη χωρικό πρότυπο έχει προέλθει από τυχαία διαδικασία.

Πίνακας** 5.II: **Τιμές του δείκτη** Moran's I **των μηνιαίων και ετήσιων τιμών ολικής ηλιακής ενέργειας των** 39 **υπό μελέτη μετεωρολογικών σταθμών

Περίοδος	Moran's I	z	p
Ιαν	0,29	3,55	$4 \cdot 10^{-4}$
Φεβ	0,38	4,59	$4 \cdot 10^{-6}$
Μαρ	0,27	3,32	$9 \cdot 10^{-4}$
Απρ	0,43	5,14	0
Μαϊ	0,46	5,49	0
Ιουν	0,32	3,94	$8 \cdot 10^{-5}$
Ιουλ	0,34	4,20	$3 \cdot 10^{-5}$
Αυγ	0,38	4,53	$6 \cdot 10^{-6}$
Σεπ	0,46	5,42	0
Οκτ	0,47	5,62	0
Νοε	0,55	6,49	0
Δεκ	0,46	5,45	0
Έτος	*0,48*	*5,65*	*0*

Συνοψίζοντας, από τη χωρική ανάλυση των δεδομένων των μηνιαίων και ετήσιων τιμών ηλιακής ενέργειας, προκύπτει ότι τα δεδομένα συσχετίζονται χωρικά, σε επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο του 95%, καθιστώντας αξιόπιστη την εφαρμογή μοντέλων χωρικής παρεμβολής. Από την ανάλυση τάσης των δεδομένων προέκυψε ότι οι τιμές ηλιακής ενέργειας μπορούν να περιγραφούν από συναρτήσεις τρίτου βαθμού (Σχήμα 5.10) κατά τη διεύθυνση ΝΝΑ-ΒΒΔ. Αυτό αποτελεί χρήσιμο στοιχείο για την παραμετροποίηση των μοντέλων χωρικής παρεμβολής, καθώς δίνεται η δυνατότητα καθοδήγησης των μεθόδων στην απόδοση μεγαλύτερης βαρύτητας σε γειτονικούς σταθμούς που βρίσκονται στη συγκεκριμένη διεύθυνση κατά τη δημιουργία των μοντέλων χωρικής παρεμβολής. Επίσης, η χωρική ανάλυση έδειξε ότι οι τιμές της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα παρουσιάζουν ομαλή χωρική μεταβολή χωρίς έντονες διακυμάνσεις μεταξύ γειτονικών περιοχών, ενώ το δείγμα των τιμών ηλιακής ενέργειας εμφανίζει σχεδόν κανονική κατανομή. Συμπερασματικά, οι προτάσεις που διατυπώνονται παραπάνω, αποτελούν βασικές παραδοχές που συμβάλλουν σημαντικά στην εφαρμογή της χωρικής παρεμβολής.

5.3 Χωρική παρεμβολή

Η χωρική παρεμβολή αποτελεί θεμελιώδη μέθοδο αντιμετώπισης των συνεχών κατανομών επιφανειών, καθιστώντας δυνατή τη δημιουργία μιας συνεχούς επιφάνειας από ένα σύνολο δεδομένων σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής ενδιαφέροντος. Με τον όρο χωρική παρεμβολή ορίζεται η διαδικασία εκτίμησης της τιμής μιας μεταβλητής σε θέσεις στο χώρο όπου δεν υφίστανται μετρήσεις. Η εκτίμηση των άγνωστων τιμών βασίζεται στις γνωστές τιμές της μεταβλητής σε άλλες θέσεις, εντός της περιοχής μελέτης, ούτως ώστε από τα σημειακά δεδομένα να παραχθούν δεδομένα σε συνεχή επιφάνεια (Burrough & McDonnell 1998). Πρακτικά, καθορίζεται μια μαθηματική σχέση, η οποία περιγράφει την υπό μελέτη παράμετρο με ανεξάρτητες μεταβλητές τις χωρικές συντεταγμένες. Βασική αρχή της χωρικής παρεμβολής αποτελεί ο 1^{ος} νόμος της Γεωγραφίας (Waldo Tobler's First Law of Geography) σύμφωνα με τον οποίο τα χωρικά δεδομένα σχετίζονται μεταξύ τους, αλλά τα δεδομένα κοντινών μεταξύ τους αποστάσεων σχετίζονται περισσότερο σε

σχέση με τα δεδομένα μακρινών μεταξύ τους αποστάσεων (Tobler 1970). Απώτερος σκοπός της διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός χάρτη με ισοπληθείς καμπύλες οι οποίες, για την περίπτωση των μετεωρολογικών δεδομένων, ονομάζονται ισόθερμες, όταν απεικονίζουν μεταβολή θερμοκρασίας, ισοϋέτιες, όταν απεικονίζουν μεταβολές του ύψους της βροχής, ισοβαρείς, όταν απεικονίζουν μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης, ή ισοήλιες, όταν απεικονίζουν μεταβολές τιμών ηλιοφάνειας ή ηλιακής ενέργειας. Μια μέθοδος χωρικής παρεμβολής θα πρέπει να εξασφαλίζει αμερόληπτη εκτίμηση σε κάθε σημείο του χώρου και με ελάχιστο μέσο σφάλμα πρόβλεψης, κριτήρια που αποτελούν βασική προϋπόθεση για την επιλογή της.

Η πρώτη προσπάθεια παρεμβολής μετεωρολογικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε από τον Panofsky (1949) και βασίστηκε στην πολυωνυμική μέθοδο, εισάγοντας σε κάθε παρατήρηση ένα σταθμικό συντελεστή ανάλογο του βαθμού αξιοπιστίας της παρατήρησης. Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσάρμοσε στις παρατηρήσεις ένα πολυώνυμο τρίτου βαθμού, με το οποίο υπολόγισε τις τιμές των παραμέτρων στα σημεία του πλέγματος. Το βασικό πρόβλημα, που αντιμετώπιζε η μέθοδος αυτή, ήταν οι ασυνέχειες που παρατηρήθηκαν μεταξύ των περιοχών εφαρμογής των πολυωνύμων. Οι Gilchrist & Cressman (1954) παρουσίασαν μια βελτίωση της μεθόδου με συστηματοποίηση των συντελεστών βαρύτητας στο πολυώνυμο παρεμβολής.

Οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες (Dobesch et al. 2013, Tveito et al. 2008). Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις προσδιοριστικές ή αιτιοκρατικές (deterministic) μεθόδους, η δεύτερη τις στοχαστικές (stochastic) ή αλλιώς γεωστατιστικές (geostatistical) μεθόδους και η τρίτη κατηγορία τις συνδυαστικές ή εμπειρικές μεθόδους. Οι προσδιοριστικές μέθοδοι παράγουν μια συνεχή επιφάνεια χρησιμοποιώντας μόνο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σημειακών μετρήσεων. Παρουσιάζουν μια σειρά από μειονεκτήματα, με κυριότερα τη μη γνωστοποίηση της εκτιμώμενης αβεβαιότητας πρόβλεψης που σχετίζεται με τις εκτιμηθείσες τιμές, στις άγνωστες περιοχές και τη μη αξιοποίηση της χωρικής συσχέτισης-εξάρτησης της διασποράς της υπό μελέτη παραμέτρου από τη μέση τιμή. Το στοιχείο αυτό αποτελεί βασικό στοιχείο της χωρικής ανάλυσης και κατ' επέκταση της διαδικασίας της χωρικής παρεμβολής. Οι γεωστατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τη διακύμανση των τιμών των δεδομένων και παρέχουν το επίπεδο εμπιστοσύνης της παρεμβολής. Τέλος, οι εμπειρικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί ως συνδυασμός προσδιοριστικών και γεωστατιστικών μεθόδων προκειμένου να εφαρμοστούν σε δεδομένα με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Στον Πίνακα 5.III γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης των κυριότερων μεθόδων χαρτογράφησης, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς που εμφανίζει η κάθε μέθοδος.

Πίνακας** 5.III: **Συνοπτικός πίνακας κατάλληλων μεθόδων χωρικής παρεμβολής για περιβαλλοντικές εφαρμογές

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	ΑΝΑΦΟΡΕΣ
Συναρτήσεις αντίστροφης απόστασης	Προσδιοριστική	Απλότητα και ταχύτητα στην εφαρμογή. Βελτίωση μεθόδου με θεώρηση δευτερεύουσας μεταβλητής. Αποδέσμευση από περιορισμούς λόγω συσσωρεμένων δεδομένων. Δυνατότητα επέκτασης εκτιμήσεων εκτός της ελάχιστης και μέγιστης τιμής των δεδομένων.	Ευαισθησία στις υποκειμενικές επιλογές παραμέτρων. Ευαισθησία σε συσσωρεμένα δεδομένα. Ευαισθησία σε ακραίες τιμές και σε ομαδοποιημένα δεδομένα. Δεν υπάρχει εκτίμηση του σφάλματος.	Isaaks & Srivastava (1989), Tabios & Salas (1985), Leenaers et al. (1990), Dubois & Tomczak (2000), Zimmerman et al. (1999), Lam (1983), Bartier & Keller (1996), Watson & Philip (1984)

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	ΑΝΑΦΟΡΕΣ
			Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το μέγεθος της επιφάνειας επιρροής και την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας.	
Γραμμική παλινδρόμηση με δευτερεύουσες μεταβλητές	Προσδιοριστική	Εφαρμογή ακόμα και για μικρό πλήθος δεδομένων. Δεν απαιτείται χωρική αυτοσυσχέτιση. Δυνατότητα επέκτασης εκτιμήσεων εκτός της ελάχιστης και μέγιστης τιμής των δεδομένων. Απλή αριθμητική μοντελοποίηση όταν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα μεγάλου πλήθους δεδομένων.	Έντονες απαιτήσεις σε δεδομένα. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την προσαρμογή του μοντέλου παλινδρόμησης αλλά και την ποιότητα και το επίπεδο λεπτομέρειας των εισαγόμενων επιφανειών. Η εκτίμηση του σφάλματος είναι δυνατή εφόσον είναι γνωστά τα σφάλματα των εισαγόμενων δεδομένων.	Briggs et al. (1997), Briggs et al. (2000), Diem & Comrie (2002)
Πολύγωνα επιρροής	Προσδιοριστική	Αντικειμενικότητα μεθόδου. Μοναδική λύση.	Δεν υπάρχει εκτίμηση του σφάλματος, παρά μόνο ένα σημείο δεδομένων ανά πολύγωνο. Ασυνέχεια εκτιμήσεων στα όρια των πολυγώνων. Το μοτίβο της ψηφιδοποίησης εξαρτάται από την κατανομή των δεδομένων. Χρησιμοποιείται σπάνια για κλιματικά δεδομένα, λόγω γενικευμένων αποτελεσμάτων.	Okabe et al. (2008)
Τριγωνισμός	Προσδιοριστική	Αντικειμενικότητα μεθόδου. Δεν υφίσταται πρόβλημα ασυνέχειας τιμών. Έλεγχος σφαλμάτων στα σημεία μέτρησης. Καλή εφαρμογή σε περιπτώσεις που η χωρική κατανομή δίνει ισομεγέθη τρίγωνα, χωρίς μεγάλες πλευρές και οξείες γωνίες.	Αδυναμία εκτίμησης τιμών εκτός της κλειστής καμπύλης που ορίζεται από τα εξωτερικά σημεία των δεδομένων.	Jones & Nelson (1992), Watson & Philip (1984)

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	ΑΝΑΦΟΡΕΣ
Πολυωνυμικές συναρτήσεις	Προσδιοριστική	Εφαρμογή κυρίως για προσδιορισμό γενικών τάσεων. Προτιμάται για δεδομένα με ομαλή μεταβολή.	Υποκειμενική επιλογή του βαθμού της πολυωνυμικής συνάρτησης. Δυσκολία προσαρμογής πολυωνύμου σε μεγάλο αριθμό μετρήσεων. Ισχυρή εξομάλυνση εκτιμήσεων. Παρουσιάζει ευαισθησία σε ακραίες τιμές.	Venables & Ripley (1997), Myers (2000)
Kriging	Γεωστατιστική	Θεώρηση χωρικής συσχέτισης δεδομένων. Ελαχιστοποίηση σφάλματος εκτιμήσεων. Αυτόματη αποσσυσώρευση δεδομένων. Προσαρμογή σε διαφορετικούς τύπους δεδομένων (θεώρηση στασιμότητας ή μη, ύπαρξη πρόσθετης πληροφορίας, μη συμμετρική κατανομή). Όταν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για τον υπολογισμό των βαριογραμμάτων, η μέθοδος παρέχει μεγάλη ακρίβεια για σποραδικά δεδομένα. Με τη μέθοδο co-kriging, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη χωρική παρεμβολή δεδομένα πολλών μεταβλητών.	Εξομάλυνση εκτιμήσεων. Δυσκολία προσαρμογής βαριογραμμάτων σε δεδομένα. Δυσκολία επαλήθευσης αρχικών υποθέσεων. Απαιτείται λεπτομερής ανάλυση δεδομένων. Η εκτίμηση του σφάλματος εξαρτάται από το βαριόγραμμα, την κατανομή των δεδομένων και το μέγεθος των επιφανειών παρεμβολής. Απαιτείται προσοχή κατά τη μοντελοποίηση των δομών χωρικής συσχέτισης.	Cressie (1990), Goovaerts (1997), Goovaerts & Van Meirvenne (2001), Journel & Rossi (1989), Myers (2000), Deutsch & Journel (1992), Isaaks & Srivastava (1989)
Γεωστατιστική προσομοίωση	Γεωστατιστική	Μη εξομάλυνση εκτιμήσεων. Απεικόνιση «φυσικής» διακύμανσης μετρήσεων.	Μεγάλοι χρόνοι υπολογισμού. Δυσκολία σύνθεσης και ερμηνείας μεγάλης έκτασης χαρτών. Προβλήματα λόγω αλγορίθμων δημιουργίας τυχαίων αριθμών.	Deutsch & Journel (1992), Gotway & Rutherford (1996), Myers (2000), Goovaerts (1997)
Νευρωνικά δίκτυα	Γεωστατιστική	Εύρεση δεσμών και αποκάλυψη δομών στα δεδομένα. Ανεξαρτησία από μοντέλα πιθανότητας, υποθέσεις κανονικότητας, γραμμικότητας, χωρικής συσχέτισης.	Αδυναμία εφαρμογής σε μικρό όγκο δεδομένων.	Cherkassky & Mulier (2007), Cheng & Titterington (1994), Lees (1996), Clarici (1995), De Bollivier et al. (1997), Kanevsky et al. (1996)

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	ΑΝΑΦΟΡΕΣ
		Αυτοματοποίηση χαρτογράφησης για επείγουσες περιστάσεις. Χειρισμός μεγάλου πλήθους μεταβλητών ή ετερογενών δεδομένων.		

Από τις μεθόδους χωρικής παρεμβολής επιλέχθηκαν μόνο οι μέθοδοι οι οποίες παρουσίασαν αξιόπιστα αποτελέσματα και κρίθηκαν οι καταλληλότερες για την τελική επιλογή της βέλτιστης μεθόδου. Οι μέθοδοι αυτές είναι: η μέθοδος της αντίστροφης σταθμισμένης απόστασης, η τοπική πολυωνυμική παρεμβολή, η συνήθης kriging και η εμπειρική κατά Bayes μέθοδος kriging.

5.3.1 Μέθοδος της αντίστροφης σταθμισμένης απόστασης

Η μέθοδος είναι γνωστή με το όνομα Inverse Distance Weighted (IDW) και ανήκει στην οικογένεια των προσδιοριστικών μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Οι άγνωστες τιμές ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια μελέτης εκτιμώνται με ένα σταθμισμένο συνδυασμό των τιμών ηλιακής ενέργειας γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών, βασισμένο στην αρχή ότι οι τιμές στις γειτονικές περιοχές είναι αντιπροσωπευτικότερες σε σχέση με τις απομακρυσμένες. Η ηλιακή ενέργεια $\widehat{H}_{(0)}$ στη θέση (0), υπολογίζεται ως:

$$\widehat{H}_{(0)} = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot H_{(i)} \tag{5.4}$$

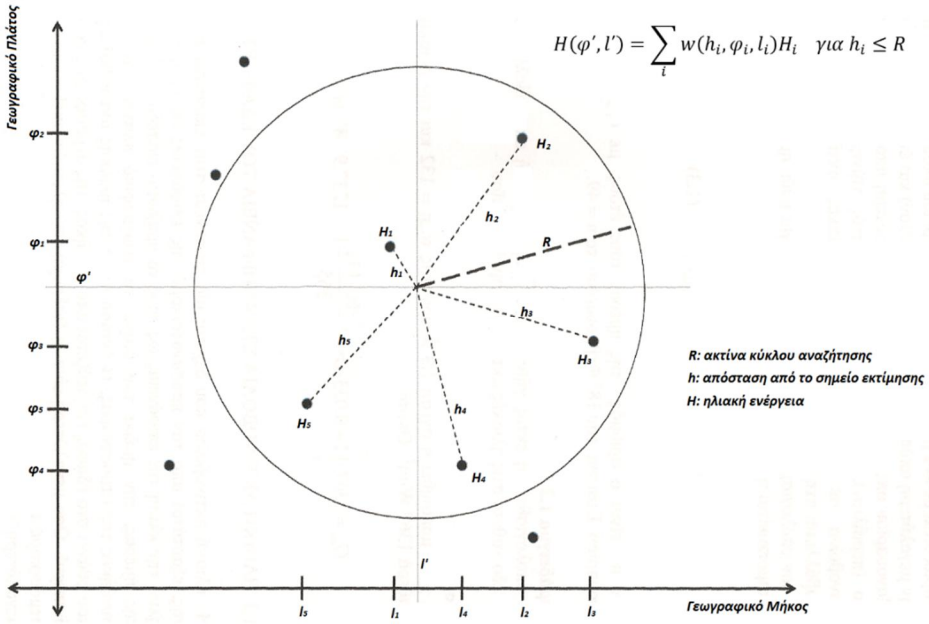
όπου: $H_{(i)}$, η τιμή της ηλιακής ενέργειας του γειτονικού μετεωρολογικού σταθμού στη θέση (i), w_i, σταθμικός συντελεστής, η τιμή του οποίου υπολογίζεται ως:

$$w_i = \frac{d_{(i)(0)}^{-k}}{\sum_{i=1}^{n} d_{(i)(0)}^{-k}} \tag{5.5}$$

όπου: $d_{(i)(0)}$, η απόσταση μεταξύ των θέσεων (0) και (i) και k, παράμετρος η οποία καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ των θέσεων (0) και (i), μειώνοντας εκθετικά την τιμή του σταθμικού συντελεστή w_i με την αύξηση της απόστασης. Η βέλτιστη τιμή του k επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση του RMSE κατόπιν δοκιμών. Στην περίπτωση όπου εφαρμόζεται η τιμή 2, τότε η μέθοδος ονομάζεται αντίστροφη τετραγωνική σταθμισμένη απόσταση (inverse distance squared weighted).

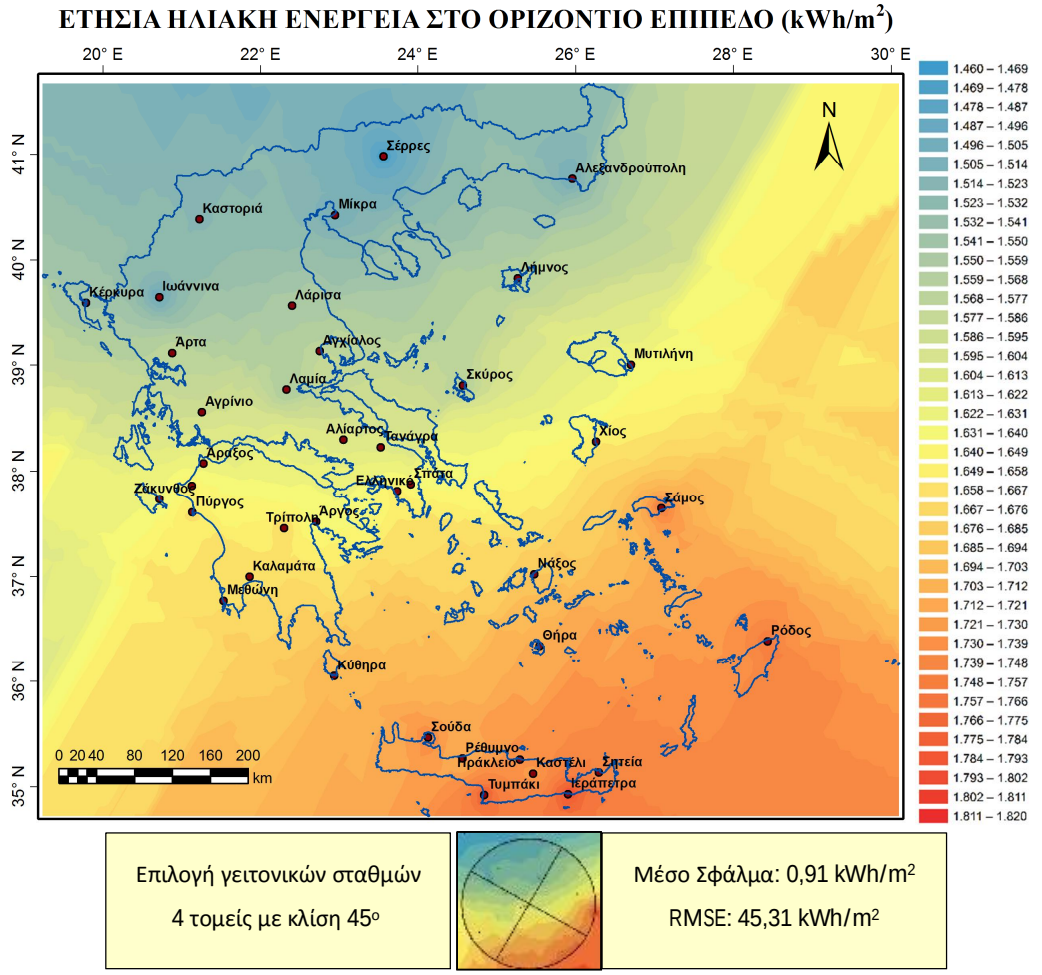
Είναι προφανές ότι το άθροισμα των σταθμικών συντελεστών $\sum_{i=1}^{n} w_i$ είναι ίσο με τη μονάδα.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ο ελάχιστος αριθμός των γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στη θέση ενδιαφέροντος ήταν 16, η επιλογή των οποίων προκύπτει με κυκλική ανεύρεσή τους γύρω από το σημείο εκτίμησης, σε ακτίνα 247 km. Στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζεται ένα επεξηγηματικό διάγραμμα σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας των μεθόδων χωρικής παρεμβολής κατά την αναζήτηση γειτονικών θέσεων προκειμένου να δημιουργήσουν τις συναρτήσεις παρεμβολής.



***Σχήμα** 5.24: **Επεξηγηματικό διάγραμμα λειτουργίας των μεθόδων χωρικής παρεμβολής κατά την αναζήτηση γειτόνων για τη δημιουργία συναρτήσεων εκτίμησης της παραμέτρου H στη θέση** (**φ**', **l**')*

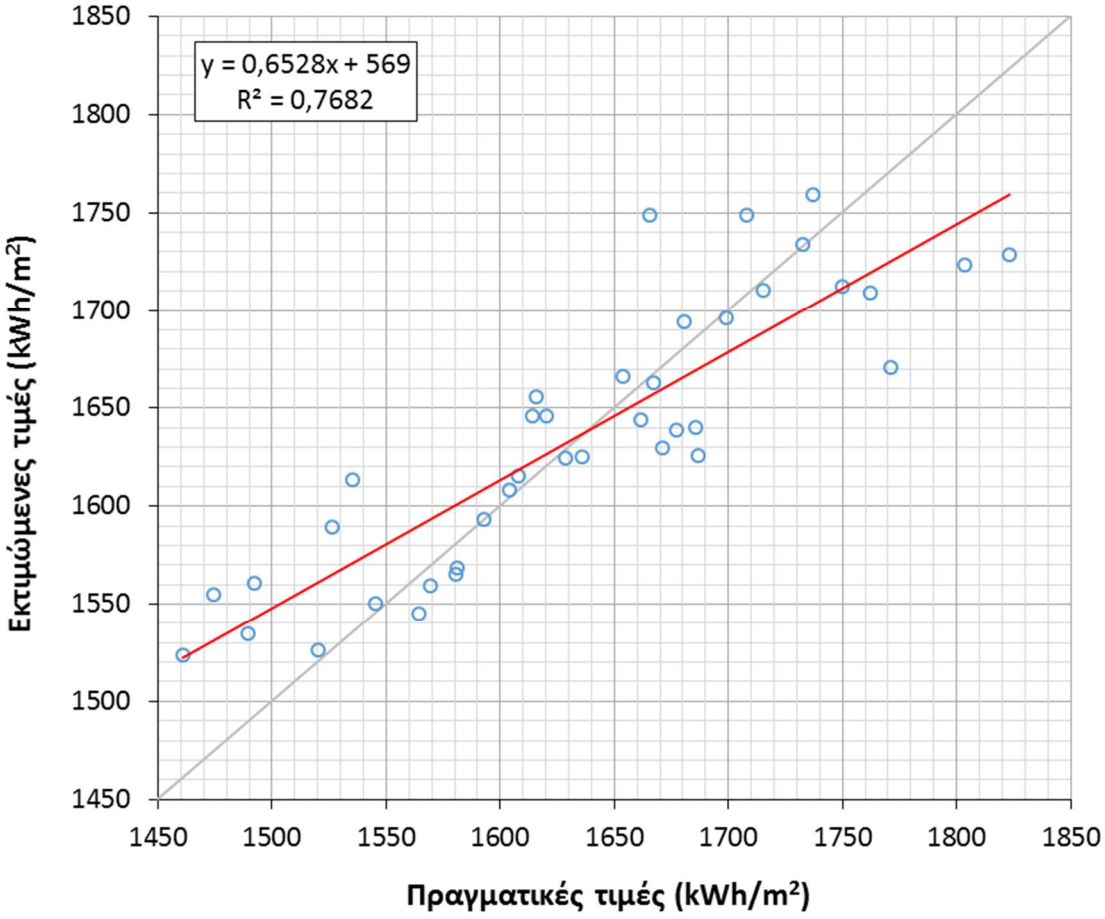
Στη συγκεκριμένη μέθοδο, ο κύκλος επιλογής των γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών χωρίζεται σε τέσσερεις τομείς με κλίση 45° και από κάθε τομέα αναζητούνται οι 4 πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί. Για την παράμετρο k επιλέχθηκε η τιμή 1, καθώς παρουσίασε τη βέλτιστη ακρίβεια εκτίμησης. Για τον υπολογισμό των σταθμικών συντελεστών λήφθηκε υπόψη η συσχέτιση των μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται κατά μήκος της διεύθυνσης των 75° δεξιόστροφα του βορρά. Με την εφαρμογή της μεθόδου της IDW στις ετήσιες τιμές ηλιακής ενέργειας, δημιουργήθηκε ο ηλιακής χάρτης που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.25. Το μέσο σφάλμα εκτίμησης είναι 0,91 kWh/m^2 και το RMSE 45,31 kWh/m^2, αποτελέσματα που υποδεικνύουν ότι το μοντέλο μπορεί να προβλέψει την ετήσια ηλιακή ενέργεια με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση των μοντέλων βασίζεται στη σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών με τις πραγματικές τιμές ηλιακής ενέργειας στους 39 επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς.



Σχήμα** 5.25: **Χάρτης ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με εφαρμογή της** IDW **σε δεδομένα** 39 **μετεωρολογικών σταθμών

Παρατηρώντας το χάρτη που παράγει το μοντέλο (Σχήμα 5.25), διακρίνεται η επίδραση των μετεωρολογικών σταθμών της Σκύρου και της Ρόδου στη διαμόρφωση της ζώνης ηλιακής ενέργειας στην οποία ανήκουν, καθώς εμφανίζουν τιμές που δεν ακολουθούν την τάση των γειτονικών τους μετεωρολογικών σταθμών.

Από τη συνάρτηση παλινδρόμησης του διαγράμματος διασποράς των εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών (Σχήμα 5.26), διαπιστώνεται μέτρια συσχέτιση. Συγκρίνοντας τη βέλτιστη ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης (κόκκινη γραμμή) με την ευθεία $y = x$ (γκρι γραμμή) του διαγράμματος, διαπιστώνεται ότι το μοντέλο υπερεκτιμά τις χαμηλότερες τιμές ηλιακής ενέργειας, ενώ αντίστοιχα υποεκτιμά τις υψηλότερες τιμές. Επίσης, φαίνεται ότι το μοντέλο μπόρεσε να εκτιμήσει, με ακρίβεια μεγαλύτερη του 99%, τις τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε 15 από τους 39 επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς.



Σχήμα** 5.26: **Διάγραμμα διασποράς εκτιμώμενων, με τη μέθοδο** IDW, **τιμών με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους** 39 **επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς

Ο Πίνακας 5.IV παρουσιάζει τους 10 μετεωρολογικούς σταθμούς που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας. Η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται στο μετεωρολογικό σταθμό της Σάμου, όπου, ενώ η πραγματική τιμή της ετήσιας ηλιακής ενέργειας, σύμφωνα με το ΤΜΕ είναι 1770 kWh/m^2, το μοντέλο εκτίμησε την τιμή σε 1670 kWh/m^2.

Οι σταθμοί, στους οποίους το μοντέλο παρουσιάζει αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας, δεν παρουσιάζουν κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό καθώς είναι διάσπαρτοι σε όλη την επιφάνεια μελέτης, προέρχονται από διάφορα υψόμετρα και περιέχονται σε αυτούς τόσο ηπειρωτικοί, όσο και νησιωτικοί μετεωρολογικοί σταθμοί.

***Πίνακας** 5.IV: **Μέγιστα σφάλματα εκτίμησης της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας με τη μέθοδο της** IDW*

Μετεωρολογικός Σταθμός	MBE (kWh/m^2)	**Σχετικό** MBE (%)
Σάμος	-100,54	-6,0%
Ιεράπετρα	-94,62	-5,5%
Τυμπάκι	-80,15	-4,7%
Ελληνικό	-61,08	-3,8%
Λαμία	62,76	3,9%
Σέρρες	63,09	4,1%
Αλεξανδρούπολη	68,11	4,4%

Σκύρος	78,26	4,8%
Ιωάννινα	80,41	5,2%
Ρέθυμνο	83,10	4,8%

5.3.2 Τοπική πολυωνυμική παρεμβολή

Η τοπική πολυωνυμική παρεμβολή, ανήκει επίσης στην κατηγορία των προσδιοριστικών μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Είναι γνωστή ως Local Polynomial Interpolation (LPI) και αποτελεί μία τροποποίηση της γενικής πολυωνυμικής παρεμβολής (Global Polynomial Interpolation). Στη γενική πολυωνυμική παρεμβολή πραγματοποιείται προσαρμογή μιας επιφάνειας στο σύνολο της υπό μελέτη περιοχής, ενώ στην LPI, η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε υποπεριοχές και το πολυώνυμο παρεμβολής υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές (Thiebaux & Pedder 1987). Καθώς η γενική πολυωνυμική παρεμβολή παρουσιάζει προβλήματα κατά την προσαρμογή του πολυωνύμου σε μεγάλης έκτασης περιοχές, επιλέχθηκε η εφαρμογή της LPI. Η τελευταία παράγει την επιφάνεια πρόβλεψης της υπό μελέτη παραμέτρου (στη συγκεκριμένη περίπτωση τις τιμές ηλιακής ενέργειας), χρησιμοποιώντας πολυωνυμικές συναρτήσεις πρώτου ή μεγαλύτερου βαθμού. Η πολυωνυμική συνάρτηση, η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της τιμής της ηλιακής ενέργειας σε μια άγνωστη περιοχή, προκύπτει από την αναζήτηση της βέλτιστης πολυωνυμικής συνάρτησης που περιγράφει τις τιμές των γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών με τη μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, ελαχιστοποιώντας τη σχέση:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \left(H_{(i)} - \widehat{H}_{(i)}\right)^2 \tag{5.6}$$

όπου: n, ο αριθμός των μετεωρολογικών σταθμών που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση
$H_{(i)}$, η τιμή της ηλιακής ενέργειας στη θέση (i),
$\widehat{H}_{(i)}$, η εκτιμώμενη τιμή της ηλιακής ενέργειας στη θέση (i), και
w_i , ο εκθετικός συντελεστής βαρύτητας, μειούμενος με την αύξηση της απόστασης ανάμεσα σε δύο σημεία, σύμφωνα με τη σχέση:

$$w_i = \exp\left(-\frac{3 \cdot h_{(i)(0)}}{k}\right) \tag{5.7}$$

όπου: $h_{(i)(0)}$, η απόσταση μεταξύ της θέσης (i) και του κέντρου της γειτονιάς (0) και
k, η παράμετρος που καθορίζει το ρυθμό μείωσης του συντελεστή βαρύτητας σαν συνάρτηση της απόστασης.

Η τιμή της ηλιακής ενέργειας, που προκύπτει από την πολυωνυμική συνάρτηση, βρίσκεται στο κέντρο της εκάστοτε γειτονιάς. Προκειμένου να παραχθεί η συνεχής επιφάνεια πρόβλεψης απαιτείται επικάλυψη των υποπεριοχών.

Κατά την εφαρμογή της LPI, χρησιμοποιήθηκαν ως συναρτήσεις πυρήνα (kernel functions), η εκθετική, η πολυωνυμική 5ου βαθμού, η Gaussian και η συνάρτηση Epanechnikov (Epanechnikov 1969). Για τον υπολογισμό των τιμών ηλιακής ενέργειας αναζητήθηκαν οι βέλτιστες πολυωνυμικές εξισώσεις 1ου βαθμού που συνδέουν κάθε φορά τη θέση εκτίμησης με τους γειτονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Η επιλογή των μετεωρολογικών σταθμών πραγματοποιήθηκε με κυκλική ανεύρεσή τους γύρω από το σημείο εκτίμησης σε κύκλο ακτίνας 632 km, ενώ η βέλτιστη πολυωνυμική συνάρτηση δύναται να περιλαμβάνει ακόμη και το σύνολο των μετεωρολογικών σταθμών

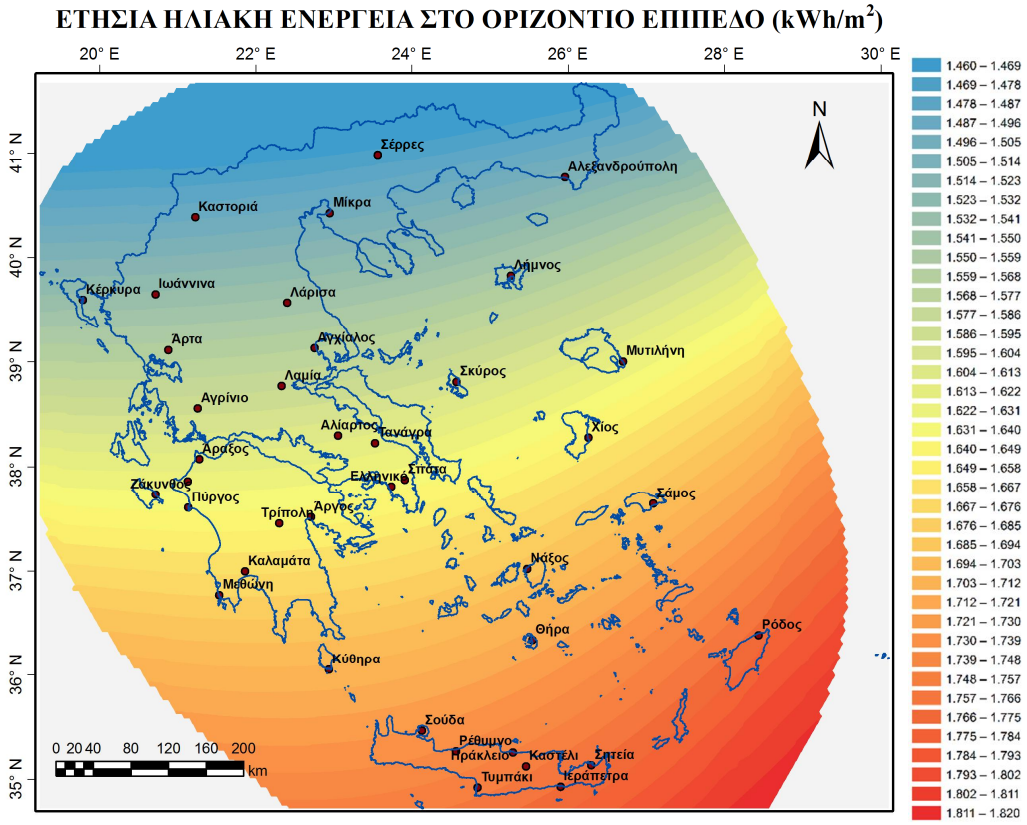
που περιέχονται εντός του κύκλου αναζήτησης, καθώς δεν τέθηκε περιορισμός στο μέγιστο αριθμό των μετεωρολογικών σταθμών που θα αποτελέσουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές των πολυωνυμικών συναρτήσεων. Στον Πίνακας 5.V παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αξιολόγησης από την εφαρμογή της LPI με τη χρήση των διαφορετικών συναρτήσεων πυρήνα.

Πίνακας** 5.V: **Αξιολόγηση των τεσσάρων συναρτήσεων πυρήνα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της** LPI **στις ετήσιες τιμές ολικής ηλιακής ενέργειας των** 39 **επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών

Συνάρτηση πυρήνα	MBE (kWh/m^2)	RMSE (kWh/m^2)
Epanechnikov	1,21	40,24
Πολυωνυμική	1,07	41,52
Εκθετική	0,31	40,58
Gaussian	-0,21	38,84

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του Πίνακας 5.V, το μοντέλο που παρέχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης είναι αυτό στο οποίο χρησιμοποιείται η Gaussian εξίσωση πυρήνα. Έχοντας καθορίσει τη συνάρτηση πυρήνα, που θα χρησιμοποιηθεί κατά την εφαρμογή της LPI, παράγεται ο χάρτης πρόβλεψης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας (Σχήμα 5.27).

Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 5.27, ο ηλιακός χάρτης, που παράγεται με τη μέθοδο LPI, χωρίζει την περιοχή μελέτης σε ομοιόμορφα κατανεμημένες ζώνες, τα όρια των οποίων αποτελούν ομαλές καμπύλες, με μορφή που καθορίζεται από τη συνάρτηση πυρήνα που χρησιμοποιείται. Το μέσο σφάλμα εκτίμησης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας, που προέκυψε με την εφαρμογή της LPI, είναι ίσο με $-0{,}21\ kWh/m^2$ και η τιμή του RMSE ίση με $38{,}84\ kWh/m^2$. Διαπιστώνεται ότι το μοντέλο παράγει τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας με ικανοποιητική ακρίβεια, λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμηθείσες τιμές στις 39 θέσεις των επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών. Η απόδοση του μοντέλου επιβεβαιώνεται και από τους υπόλοιπους στατιστικούς δείκτες (Σχήμα 5.27), καθώς το μέσο τυποποιημένο σφάλμα (mean standardized error) είναι σχεδόν ίσο με το μηδέν και το τυποποιημένο RMSE (RMSSE) πλησιάζει τη μονάδα. Το γεγονός ότι $RMSSE = 0{,}994$ σημαίνει ότι οι προβλέψεις των τιμών της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών είναι έγκυρες, με πολύ μικρή μεταβλητότητα.



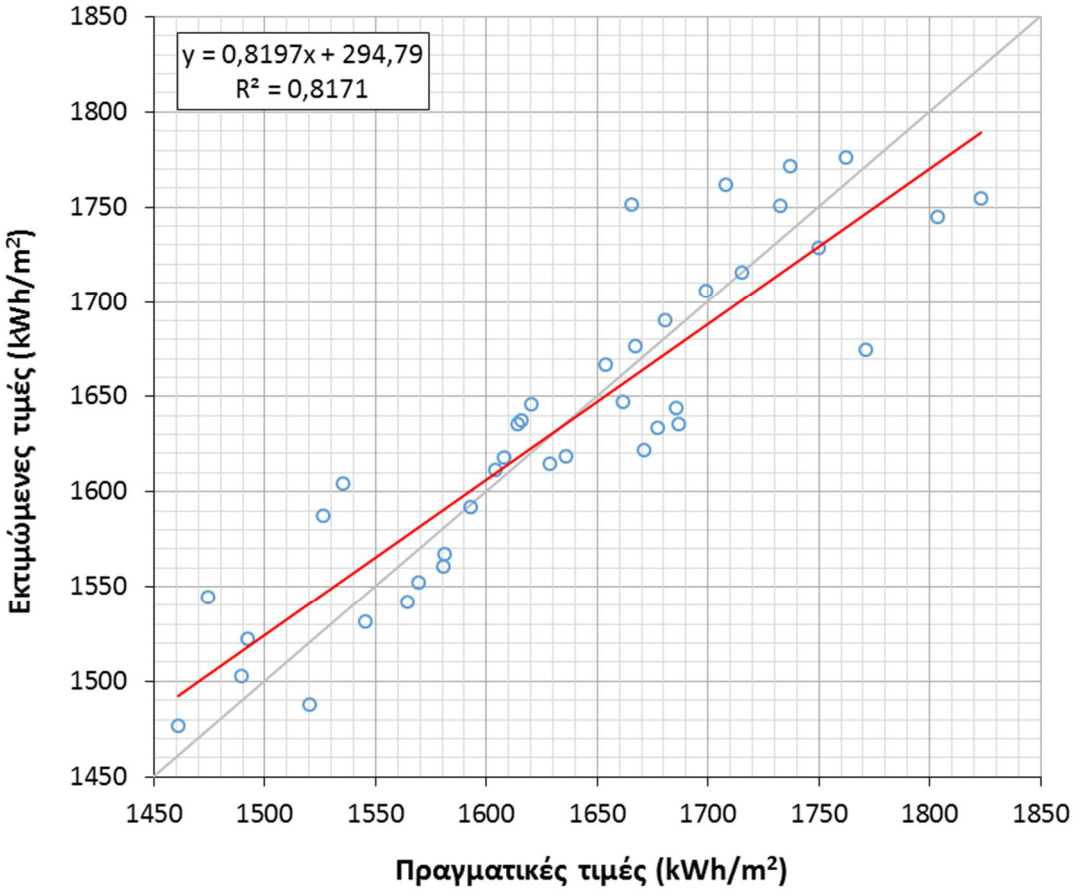
Μέσο Σφάλμα: -0,21 kWh/m²

RMSE: 38,84 kWh/m²

Τυποποιημένο RMSE: 0,994

Σχήμα** 5.27: **Χάρτης πρόβλεψης ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με εφαρμογή της** LPI **σε δεδομένα** 39 **μετεωρολογικών σταθμών

Από το διάγραμμα διασποράς των εκτιμώμενων τιμών σε σχέση με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές (Σχήμα 5.28) διαπιστώνεται πολύ καλή προσαρμογή της ευθείας παλινδρόμησης καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι μεγαλύτερος του 80%. Ειδικότερα, από το Σχήμα 5.28 προκύπτει ότι το μοντέλο παρουσιάζει μικρή ακρίβεια κατά την εκτίμηση των χαμηλότερων και υψηλότερων τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας, ήτοι στις περιοχές από 1450 έως 1550 kWh/m^2 και 1700 έως 1850 kWh/m^2, αντίστοιχα. Το μοντέλο παρουσιάζει, σύμφωνα με τα αποτελέσματα αξιολόγησής του, ικανότητα εκτίμησης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας με ακρίβεια μεγαλύτερη του 99% σε 15 μετεωρολογικούς σταθμούς. Η μέγιστες διαφορές μεταξύ εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών που εμφανίζονται είναι μικρότερες των 100 kWh/m^2 με την πλειοψηφία των αποκλίσεων να βρίσκονται σε τιμές μικρότερες των 50 kWh/m^2 (Σχήμα 5.28).



Σχήμα** 5.28: **Διάγραμμα διασποράς εκτιμώμενων, με τη μέθοδο της** LPI, **τιμών προς τις αντίστοιχες τιμές της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους** 39 **επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς

Ο Πίνακας 5.VI παρουσιάζει τους 10 μετεωρολογικούς σταθμούς με το μεγαλύτερο σφάλμα εκτίμησης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας. Η πλειοψηφία των μετεωρολογικών σταθμών, που περιέχονται στον Πίνακα, βρίσκονται στην Κεντρική και Νότια Ελλάδα, ενώ από τη Βόρεια Ελλάδα μόνο ο μετεωρολογικός σταθμός των Ιωαννίνων παρουσιάζει αυξημένη τιμή σφάλματος.

***Πίνακας** 5.VI: **Μετεωρολογικοί σταθμοί με τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας που προέκυψαν με τη μέθοδο της** LPI*

Σταθμός	MBE (kWh/m^2)	**Σχετικό** MBE (%)
Σάμος	-96,20	-5,43%
Ιεράπετρα	-68,41	-3,75%
Τυμπάκι	-58,73	-3,26%
Ελληνικό	-51,44	-3,05%
Ανδραβίδα	-49,70	-2,97%
Καστέλι	53,78	3,15%
Λαμία	61,13	4,00%
Σκύρος	69,13	4,50%
Ιωάννινα	69,64	4,72%

Σταθμός	MBE (kWh/m^2)	**Σχετικό** MBE (%)
Ρέθυμνο	85,79	5,15%

5.3.3 Μέθοδος kriging

Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής kriging κατατάσσεται στις γεωστατιστικές μεθόδους χωρικής παρεμβολής, οι οποίες αξιοποιούν την πληροφορία της χωρικής συσχέτισης των δεδομένων, αντιμετωπίζοντας τις αδυναμίες των προσδιοριστικών μεθόδων. Η ονομασία "kriging" (le krigeage) προέρχεται από τον D. G. Krige, ο οποίος τη δεκαετία του '50 πρωτοπόρησε στη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων για την εκτίμηση των αποθεμάτων ορυκτών στη Νότια Αφρική (Krige 1952) και αναπτύχθηκε από τους Gandin (1959) και Matheron (1962). Σύμφωνα με τους Papoulis & Pillai (2002) και Webster & Oliver (2001) η μέθοδος είναι ευρύτερα γνωστή και ως αλγόριθμος των Yule-Walker και ικανοποιεί τις απαιτήσεις για το χαρακτηρισμό της ως αμερόληπτης γραμμικής εκτιμήτριας της μέσης τιμής ενός τυχαίου πεδίου σε ένα υποσύνολο του πεδίου ορισμού του, καθώς το αναμενόμενο μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της εκτιμώμενης και της πραγματικής τιμής είναι ελάχιστο και η εκτίμηση προκύπτει ως γραμμική συνάρτηση των υφιστάμενων τιμών. Η εκτίμηση των τιμών μιας μεταβλητής σε θέσεις, όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις, επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση των δεδομένων και των πληροφοριών του αντίστοιχου βαριογράμματος (Burrough & McDonnell 1998).

Βάσει της μεθόδου kriging, η επιφάνεια εκτίμησης θεωρείται ως μία τοπικά μεταβαλλόμενη μεταβλητή με συγκεκριμένο βαθμό συνέχειας. Η θεωρία, που περιγράφει τις τοπικά μεταβαλλόμενες μεταβλητές, προϋποθέτει μια σταθερή τοπικά μέση τιμή και μία στατική διακύμανση των διαφορών ανάμεσα στις θέσεις που απέχουν συγκεκριμένη απόσταση και βρίσκονται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ισχύει ότι:

- Η προσδοκώμενη διαφορά ανάμεσα σε δύο μετεωρολογικούς σταθμούς (i) και $(i+h)$ που απέχουν μεταξύ τους απόσταση που ορίζεται από το άνυσμα h είναι μηδέν:

$$E\left[H_{(i)} - H_{(i+h)}\right] = 0 \tag{5.8}$$

- Η μεταβολή των διαφορών εξαρτάται μόνο από την απόσταση h ανάμεσα στους σταθμούς, σε τρόπον ώστε:

$$var\left(H_{(i)} - H_{(i+h)}\right) = E\left(H_{(i)} - H_{(i+h)}\right)^2 = 2 \cdot \gamma(h) \tag{5.9}$$

όπου $\gamma(h)$ η συνάρτηση ημιδιακύμανσης (σχέση 5.1).

Το βαριόγραμμα που απεικονίζει τη μεταβολή της ημιδιακύμανσης σε συνάρτηση με την απόσταση (Σχήμα 5.13), εμπεριέχει όλη τη χρήσιμη πληροφορία για τη χωρική μεταβολή της ηλιακής ενέργειας, συνοψίζοντας τη γενική μορφή της μεταβολής, το μέγεθός της και τη χωρική κλίμακα στην οποία λαμβάνει χώρα. Για να είναι το βαριόγραμμα χρήσιμο στη μέθοδο kriging, απαιτείται η προσομοίωσή του με ένα προσαρμοσμένο ή θεωρητικό γράφημα διακύμανσης. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα, είναι το γραμμικό:

$$\gamma(h) = C_0 + b \cdot h \tag{5.10}$$

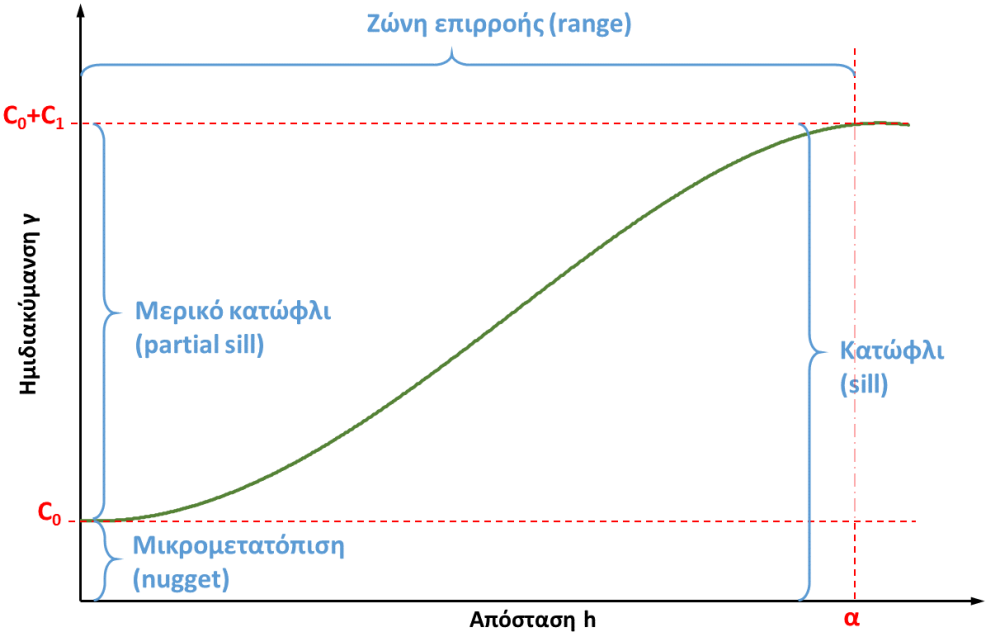
το σφαιρικό:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \cdot \left(\frac{3 \cdot h}{2 \cdot a} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & h < a \\ C_0 + C_1 & h \geq a \end{cases} \quad (5.11)$$

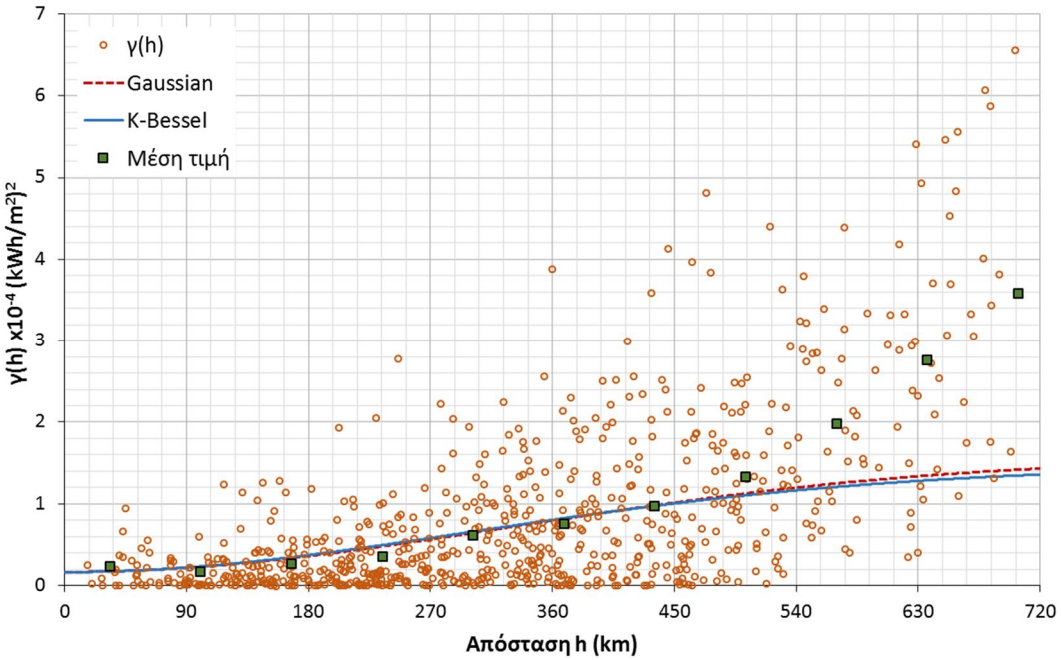
και αυτό που ακολουθεί την κανονική κατανομή:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{h}{a} \right)^2} \right) \quad (5.12)$$

όπου: b η κλίση της ευθείας, α η ζώνη επιρροής, C_0 η διακύμανση που αντιστοιχεί στο σημείο τομής με τον κατακόρυφο άξονα (δηλαδή $h = 0$) και $C_0 + C_1$ το ανώτατο όριο (κατώφλι) στο οποίο οι τιμές $\gamma(h)$ τείνουν ασυμπτωτικά όταν η απόσταση h γίνει μεγαλύτερη από τη ζώνη επιρροής α (Σχήμα 5.29).



Σχήμα** 5.29: **Επεξηγηματικό διάγραμμα χαρακτηριστικών περιοχών ενός βαριογράμματος. Στο σχήμα δίνονται σε παρένθεση οι αντίστοιχοι καθιερωμένοι στη διεθνή βιβλιογραφία όροι



Σχήμα** 5.30: **Θεωρητική προσομοίωση του νέφους βαριογράμματος των τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας των** 39 **επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών

Όπως διαπιστώνεται και από το Σχήμα 5.30, η μεταβολή της ημιδιακύμανσης δεν ακολουθεί γραμμική μεταβολή ή μεταβολή που θα μπορούσε να περιγραφεί από το σφαιρικό μοντέλο. Ως εκ τούτου, επιλέγεται η εφαρμογή της κανονικής κατανομής, η οποία συγκρίνεται με τις τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel δευτέρου είδους ή k-Bessel (Abramowitz 1988).

Αφού έχει καθοριστεί η συνάρτηση προσομοίωσης του πειραματικού βαριογράμματος, η τιμή της ηλιακής ενέργειας $\widehat{H}_{(0)}$ στη θέση (0), υπολογίζεται ως:

$$\widehat{H}_{(0)} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot \mathrm{H}_{(\mathrm{i})} \qquad (5.13)$$

όπου $H_{(i)}$ οι τιμές ηλιακής ενέργειας των γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών στις θέσεις (i), και λ_i οι σταθμικοί συντελεστές που αποδίδονται σε κάθε ένα σταθμό, ώστε να γίνει δυνατή η παρεμβολή. Οι σταθμικοί συντελεστές προσδιορίζονται με τη μορφή του γραφήματος διακύμανσης και επιλέγονται έτσι, ώστε η διακύμανση της εκτίμησης της ηλιακής ενέργειας στη θέση (0) να είναι η ελάχιστη δυνατή.

Βάσει του γενικού πλαισίου της μεθόδου παρεμβολής kriging, έχουν δημιουργηθεί διάφορες παραλλαγές, όπως η συνήθης (ordinary) kriging, η καθολική (universal) kriging, η εμπειρική κατά Bayes (empirical Bayesian) kriging, η block kriging, η μη-γραμμική kriging, η co-kriging, η πολυμεταβλητή (multivariate) kriging κ.λπ. Η διαφορά μεταξύ των παραλλαγών, έγκειται στον τρόπο που αυτές αντιμετωπίζουν τη συνιστώσα της τάσης, την ανισοτροπία των τιμών στα σημεία ελέγχου, στο αν επιχειρείται υπολογισμός της παραμέτρου σε σημείο ή πολύγωνο, καθώς και αν επιχειρείται συνυπολογισμός παραπάνω της μιας περιφερειοποιημένης μεταβλητής. Η γενική σχέση, που εκφράζει τις παραλλαγές της μεθόδου kriging, είναι η:

$$H_{(i)} = \mu_{(i)} + \varepsilon_{(i)} \qquad (5.14)$$

σύμφωνα με την οποία, η εξεταζόμενη παράμετρος αναλύεται στην προσδιοριστική μέση τιμή ή τάση $\mu_{(i)}$ και στα τυχαία αυτοσυσχετιζόμενα σφάλματα $\varepsilon_{(i)}$ στη θέση (i).

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της συνήθους kriging και της εμπειρικής κατά Bayes μεθόδου kriging. Οι δύο αυτές γεωστατιστικές μέθοδοι παρουσίασαν μεγάλη ακρίβεια πρόβλεψης τιμών της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των 39 επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών.

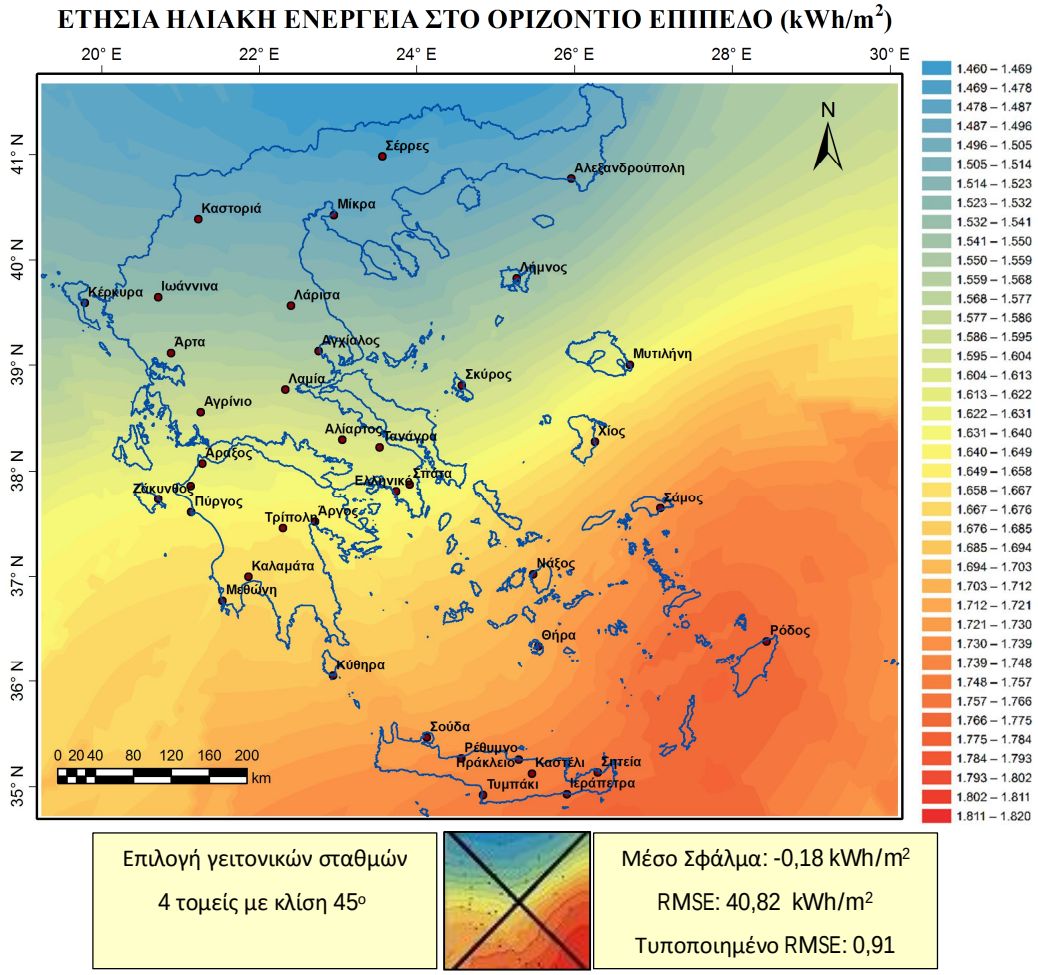
Συνήθης μέθοδος kriging

Η συνήθης μέθοδος kriging (Ordinary Kriging (OK)) αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη παραλλαγή μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Η εκτίμηση της ηλιακής ενέργειας σε ένα σημείο επιτυγχάνεται ως γραμμικός συνδυασμός των τιμών ηλιακής ενέργειας των γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών, οι οποίοι εξαρτώνται από τη χωρική συσχέτιση των δεδομένων. Οι σταθμικοί συντελεστές επιλέγονται έτσι, ώστε η εκτίμηση να τηρεί τον όρο της μη προκατάληψης και η εκτιμηθείσα διακύμανση να είναι μικρότερη από κάθε άλλο γραμμικό συνδυασμό των μετρήσεων. Στη μέθοδο OK η μέση τιμή της σχέσης 5.14 θεωρείται σταθερή αλλά άγνωστη και δεν απαιτείται ο υπολογισμός της από τις τιμές ηλιακής ενέργειας των δεδομένων.

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου, ο ελάχιστος αριθμός γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών που απαιτήθηκε για την εκτίμηση της ηλιακής ενέργειας ήταν 8 και ο μέγιστος 20. Η επιλογή των γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών προέκυψε με κυκλική ανεύρεσή τους γύρω από το σημείο εκτίμησης, σε ακτίνα 658 km. Για το σκοπό αυτό, ο κύκλος επιλογής των γειτονικών σταθμών, χωρίζεται σε τέσσερεις τομείς με κλίση 45^{o}. Από κάθε τομέα αναζητούνται οι 2 έως 5 πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί, ο συνδυασμός των οποίων θα δώσει το μικρότερο σφάλμα εκτίμησης.

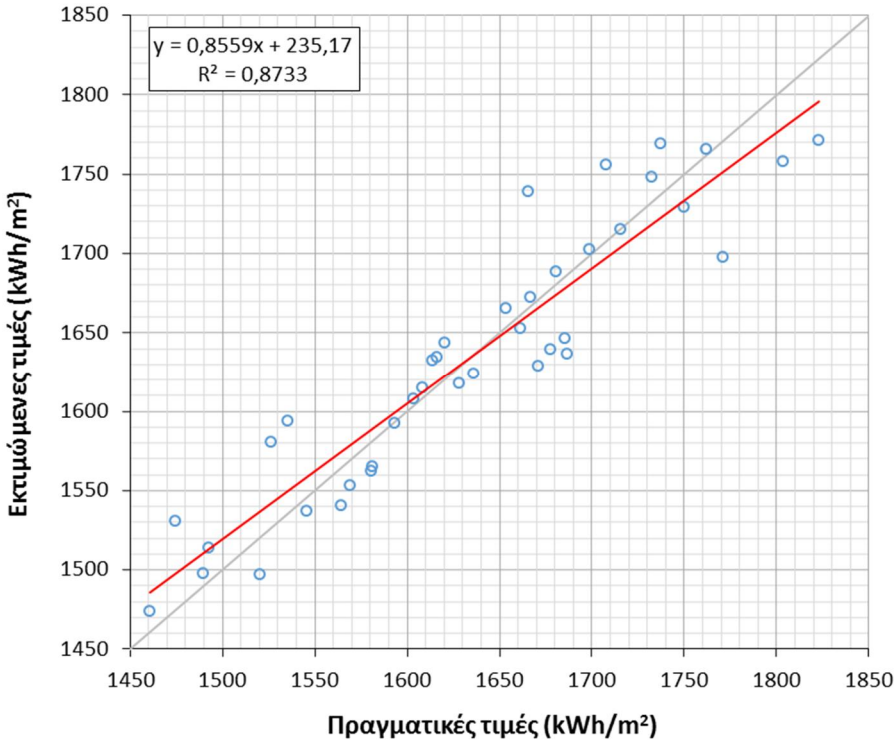
Ο χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας που δημιουργήθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου OK παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.31. Παρατηρώντας το χάρτη διαπιστώνεται ότι οι ζώνες ετήσιας ηλιακής ενέργειας, που δημιουργεί το μοντέλο, αποκτούν σταδιακά μεγαλύτερη απόκλιση από τις γραμμές του γεωγραφικού πλάτους, όσο μεταβάλλεται η θέση του σταθμού, με κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι περιοχές της Δυτικής Ελλάδας να εμφανίζουν μικρότερες τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε σχέση με τις περιοχές της Ανατολικής Ελλάδας, σε αντίστοιχα γεωγραφικά πλάτη. Η διαφοροποίηση των τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας μεταξύ Δυτικής και Ανατολικής Ελλάδας, γίνεται εντονότερη στις νότιες περιοχές.

Το μέσο σφάλμα εκτίμησης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας είναι ίσο με -0,18 kWh/m^2 και η τιμή του RMSE με 40,82 kWh/m^2 καθιστώντας το μοντέλο ιδιαίτερα αξιόπιστο στην εκτίμηση των τιμών της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των 39 μετεωρολογικών σταθμών (Σχήμα 5.31).



Σχήμα** 5.31: **Χάρτης πρόβλεψης ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο με την εφαρμογή της μεθόδου** ΟΚ **σε δεδομένα** 39 **μετεωρολογικών σταθμών

Η τιμή του μέσου τυποποιημένου σφάλματος πλησιάζει το μηδέν (-0,01) και η τυποποιημένη τιμή του RMSE είναι ίση με 0,91, αρκετά κοντά στη μονάδα. Ωστόσο, οι δύο αυτοί δείκτες αξιολόγησης υπολείπονται σημαντικά των αντίστοιχων της μεθόδου τοπικής πολυωνυμικής παρεμβολής (Σχήμα 5.27).



***Σχήμα** 5.32: **Διάγραμμα διασποράς εκτιμώμενων τιμών προς τις αντίστοιχες τιμές ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους** 39 **επιλεγμένους μετεωρολογικούς σταθμούς με την εφαρμογή της μεθόδου** OK*

***Πίνακας** 5.VII: **Μετεωρολογικοί σταθμοί με τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας που προέκυψαν με τη μέθοδο** OK*

Σταθμός	MBE (kWh/m^2)	**Σχετικό** MBE (%)
Ιεράπετρα	-79,02	-4,53%
Σάμος	-71,92	-4,23%
Τυμπάκι	-69,30	-4,00%
Ελληνικό	-62,75	-3,86%
Ανδραβίδα	-45,74	-2,81%
Καστέλι	46,82	2,67%
Λαμία	64,14	4,03%
Σκύρος	68,20	4,25%
Ιωάννινα	77,17	4,97%
Ρέθυμνο	79,15	4,54%

Στο Σχήμα 5.32 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των εκτιμούμενων τιμών ηλιακής ενέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές στις θέσεις των 39 επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών. Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα, το μοντέλο έχει την τάση να υπερεκτιμάει τις μεγαλύτερες τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας και να υποεκτιμάει τις μεγαλύτερες τιμές. Πλησίον της ευθείας y=x (γκρι γραμμή) βρίσκονται 12 μετεωρολογικοί σταθμοί στους οποίους η εκτίμηση της ετήσιας ηλιακής ενέργειας επετεύχθει με ακρίβεια μεγαλύτερη από 99%.
Οι μετεωρολογικοί σταθμοί με τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης καταγράφονται στον Πίνακα 5.VII. Συγκρίνοντας τους Πίνακες 5.VI και 5.VII, διαπιστώνεται ότι οι συγκεκριμένοι μετεωρολογικοί

σταθμοί εμφανίζουν υψηλές αποκλίσεις τόσο κατά την εφαρμογή της τοπικής πολυωνυμικής παρεμβολής όσο και της μεθόδου OK.

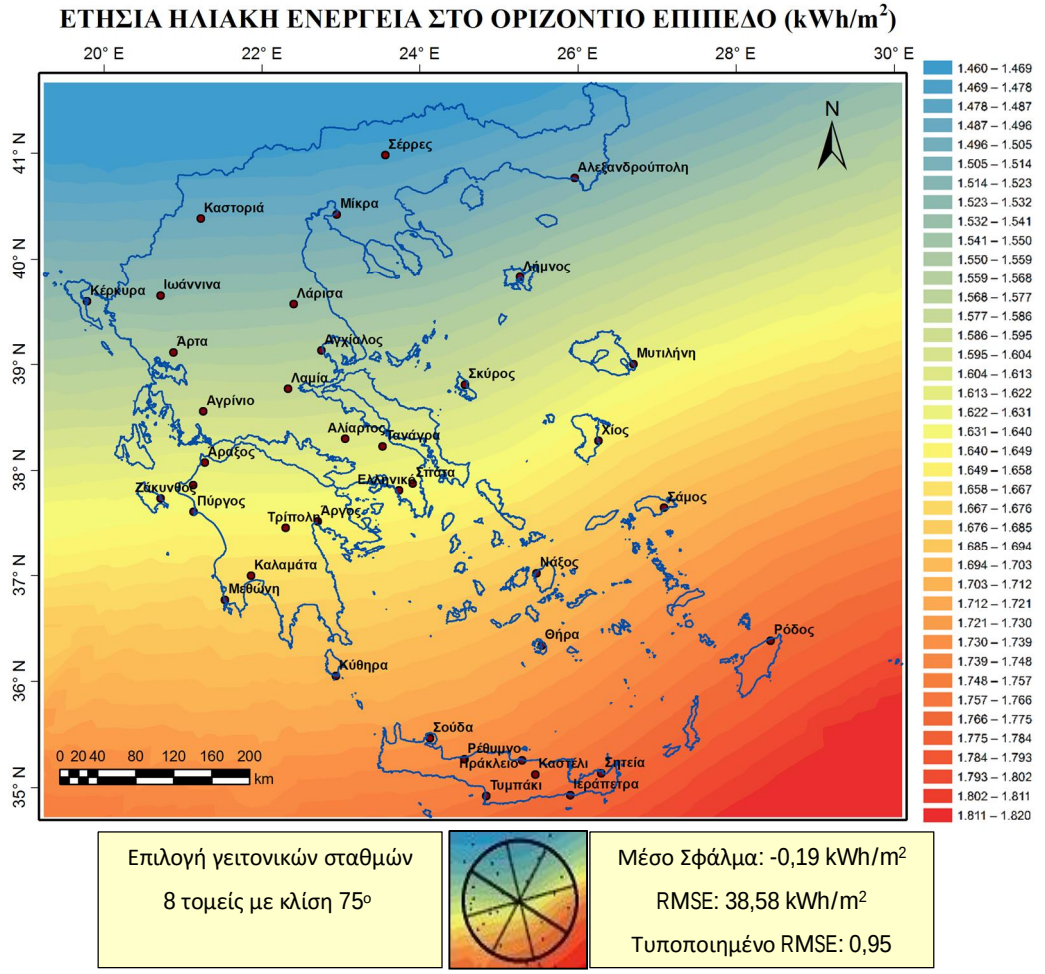
Εμπειρική κατά Bayes μέθοδος kriging

Η εμπειρική κατά Bayes μέθοδος kriging είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως Empirical Bayesian Kriging (EBK). Η μέθοδος αυτή διαφέρει από τις υπόλοιπες παραλλαγές διότι λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα στην εκτίμηση του βαριογράμματος. Τα υπόλοιπα μοντέλα αυτής της κατηγορίας υποεκτιμούν το τυποποιημένο σφάλμα εκτίμησης αγνοώντας την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τη μοντελοποίηση του βαριογράμματος. Συγκεκριμένα, η EBK εκτιμάει το εν λόγω σφάλμα υπολογίζοντας νέο βαριόγραμμα, ενώ οι υπόλοιπες παραλλαγές της μεθόδου kriging υπολογίζουν ένα μόνο βαριόγραμμα στην εκάστοτε θέση εκτίμησης. Η δημιουργία πολλαπλών βαριογραμμάτων επιτυγχάνεται με τη δημιουργία νέου βαριογράμματος από τις εκτιμώμενες τιμές στις θέσεις των δεδομένων, που προκύπτουν από τη χρήση του προηγούμενου βαριογράμματος. Για κάθε δημιουργούμενο βαριόγραμμα υπολογίζεται ένας σταθμικός συντελεστής σύμφωνα με τον κανόνα του Bayes, που ορίζει ότι οι προγενέστερες πιθανότητες και οι νέες πληροφορίες οδηγούν στις μεταγενέστερες πιθανότητες (Bayes 1963). Τα εκτιμώμενα σφάλματα της μεθόδου είναι ακριβή, καθιστώντας τη μέθοδο αποδοτικότερη συγκριτικά με άλλες, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μικρό δείγμα δεδομένων, επιτρέποντας ακριβέστερες εκτιμήσεις σε ελαφρώς μη στάσιμο δείγμα.

Αρχικά εξετάστηκε η ακρίβεια εκτίμησης τιμών ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των 39 επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών, εξετάζοντας δύο περιπτώσεις θεωρητικής προσομοίωσης του βαριογράμματος, με την κατανομή Gauss και με τις συναρτήσεις k-Bessel. Οι δύο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της θεωρητικής συνάρτησης που περιγράφει τη μεταβολή της ημιδιακύμανσης, σύμφωνα με το νέφος βαριογράμματος των πραγματικών τιμών της ετήσιας ηλιακής ενέργειας. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η χρήση της k-Bessel παράγει μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς το μέσο σφάλμα εκτίμησης μειώθηκε από 0,5 kWh/m^2 στην περίπτωση χρήσης της κατανομής Gauss σε $-0{,}09\ kWh/m^2$.

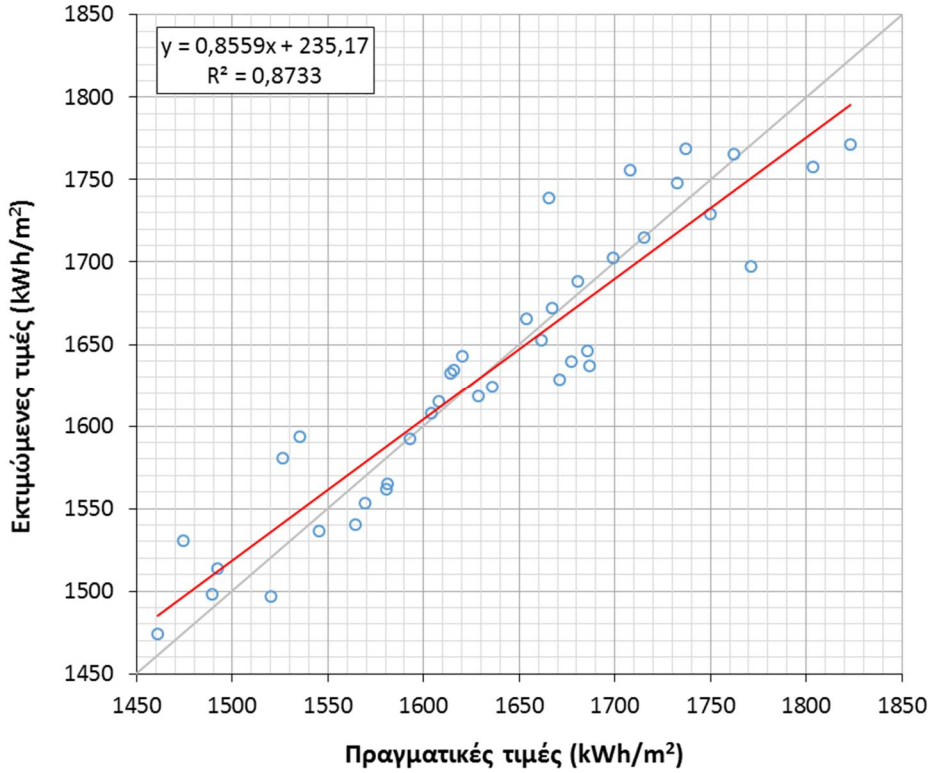
Για την αναζήτηση γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών, που θα αποτελέσουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές για τον υπολογισμό της ηλιακής ενέργειας στα σημεία εκτίμησης, χρησιμοποιήθηκαν 8 μετεωρολογικοί σταθμοί από κάθε τομέα, των οποίων η επιλογή προκύπτει με κυκλική αναζήτησή τους γύρω από το σημείο εκτίμησης, σε ακτίνα 247 km. Ο κύκλος επιλογής των γειτονικών μετεωρολογικών σταθμών χωρίστηκε σε 8 τομείς. Για τον υπολογισμό των σταθμικών συντελεστών λήφθηκε επίσης υπόψη η συσχέτιση των μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται κατά μήκος της διεύθυνσης των 75° δεξιόστροφα του βορρά.

Ο χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας, που δημιουργήθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου EBK, εμφανίζεται στο Σχήμα 5.33. Παρατηρώντας το χάρτη, διαπιστώνεται ότι το μοντέλο παράγει ομοιόμορφα κατανεμημένες ζώνες ετήσιας ηλιακής ενέργειας, οι οποίες έχουν κατεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ με αποτέλεσμα οι τιμές της ηλιακής ενέργειας να παρουσιάζουν την εντονότερη μεταβολή κατά τη διεύθυνση ΝΝΑ προς ΒΒΔ. Και στο συγκεκριμένο χάρτη παρατηρούνται μικρότερες τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας στις περιοχές της Δυτικής Ελλάδας σε σχέση με τις αντίστοιχες περιοχές της Ανατολικής Ελλάδας. Το μέσο σφάλμα εκτίμησης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας που προέκυψε με την εφαρμογή της EBK, είναι ίσο με $-0{,}09\ kWh/m^2$ και η τιμή του RMSE ίση με 38,30 kWh/m^2, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του μοντέλου. Η απόδοση του μοντέλου επιβεβαιώνεται και από τους υπόλοιπους στατιστικούς δείκτες (Σχήμα 5.33), καθώς το μέσο τυποποιημένο σφάλμα είναι πρακτικά ίσο με το μηδέν (-0,005) και το τυποποιημένο RMSE πλησιάζει τη μονάδα (0,92).



Σχήμα** 5.33: **Χάρτης πρόβλεψης της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο**, **με εφαρμογή της μεθόδου** EBK **σε δεδομένα** 39 **μετεωρολογικών σταθμών

Από το διάγραμμα διασποράς των εκτιμώμενων σε σχέση με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας (Σχήμα 5.34) προκύπτει πολύ καλή προσαρμογή της ευθείας παλινδρόμησης, καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι 87,33%. Η εκτίμηση της ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε 17 μετεωρολογικούς σταθμούς ξεπέρασε σε ακρίβεια το 99%. Οι μέγιστες διαφορές μεταξύ εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών που εμφανίζονται είναι μικρότερες των 70 kWh/m^2 με την πλειοψηφία των αποκλίσεων να βρίσκονται σε τιμές μικρότερες των 50 kWh/m^2 (Σχήμα 5.34).



Σχήμα** 5.34: **Διάγραμμα διασποράς εκτιμώμενων, με τη μέθοδο** EBK, **τιμών προς τις αντίστοιχες τιμές ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας στους** 39 **επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς

Ο Πίνακας 5.VIII παρουσιάζει τους 10 μετεωρολογικούς σταθμούς με το μεγαλύτερο σφάλμα εκτίμησης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας. Σύμφωνα με τον Πίνακα, η μέγιστη απόκλιση της εκτιμώμενης από την πραγματική τιμή ετήσιας ηλιακής ενέργειας παρατηρείται στο μετεωρολογικό σταθμό της Σάμου όπου καταγράφεται διαφορά ίση με -73,42 kWh/m^2.

***Πίνακας** 5.VIII: **Μετεωρολογικοί σταθμοί με τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης τιμών ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου** EBK*

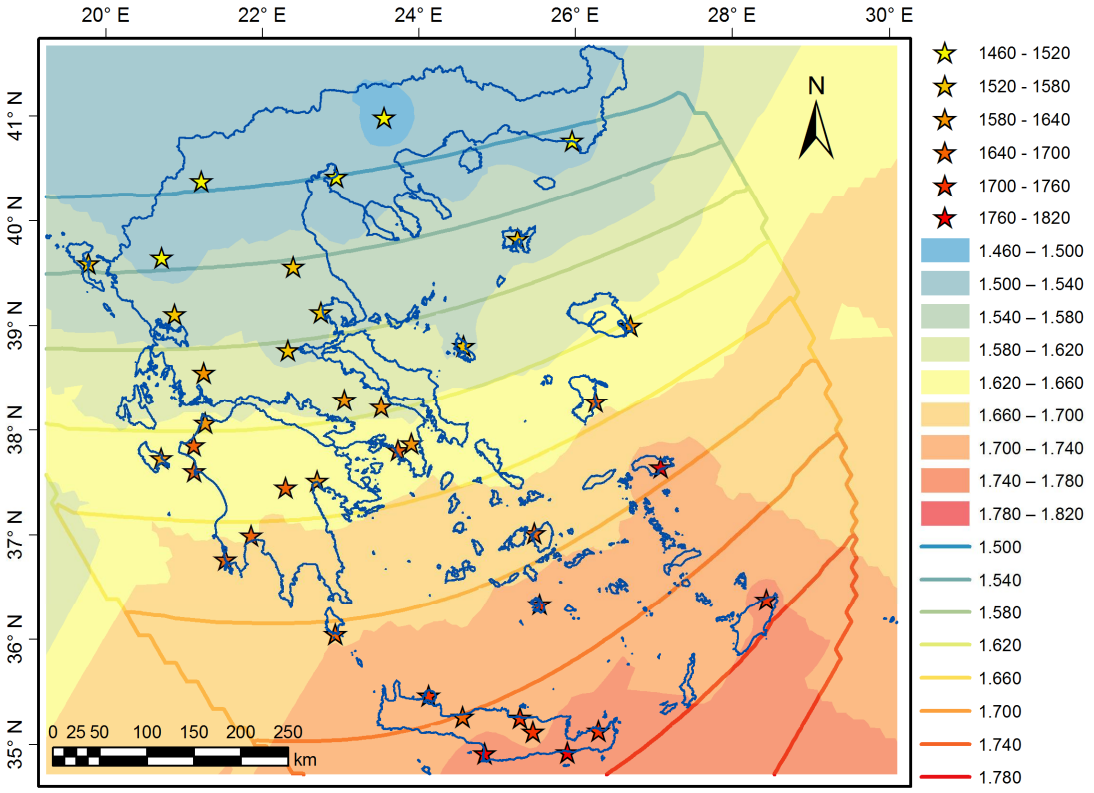
Σταθμός	MBE (kWh/m^2)	**Σχετικό** MBE (%)
Σάμος	-73,42	-4,32%
Ιεράπετρα	-51,59	-2,91%
Ελληνικό	-50,12	-3,06%
Τυμπάκι	-45,67	-2,60%
Ανδραβίδα	-42,83	-2,63%
Καστέλι	47,88	2,73%
Λαμία	54,27	3,43%
Ιωάννινα	55,74	3,64%
Σκύρος	58,15	3,65%
Ρέθυμνο	72,91	4,19%

5.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων χωρικής παρεμβολής

Έχοντας εφαρμόσει τις δύο μεθόδους χωρικής παρεμβολής με τη μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας, από τις δύο κυριότερες κατηγορίες μοντέλων χωρικής

παρεμβολής, στη συνέχεια επιλέγεται η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία των ετήσιων και μηνιαίων ηλιακών χαρτών.

Στο Σχήμα 5.35 παρουσιάζεται ο χάρτης με τα αποτελέσματα των δύο προσδιοριστικών μεθόδων. Οι ισοήλιες της μεθόδου IDW εμφανίζονται με ζώνες ίδιου χρώματος και της LPI με γραμμές. Οι θέσεις των επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών απεικονίζονται με χρωματικές αποχρώσεις που αντιστοιχούν στον χρωματικό κώδικα της ζώνης ηλιακής ενέργειας σύμφωνα με την πραγματική του θέση.

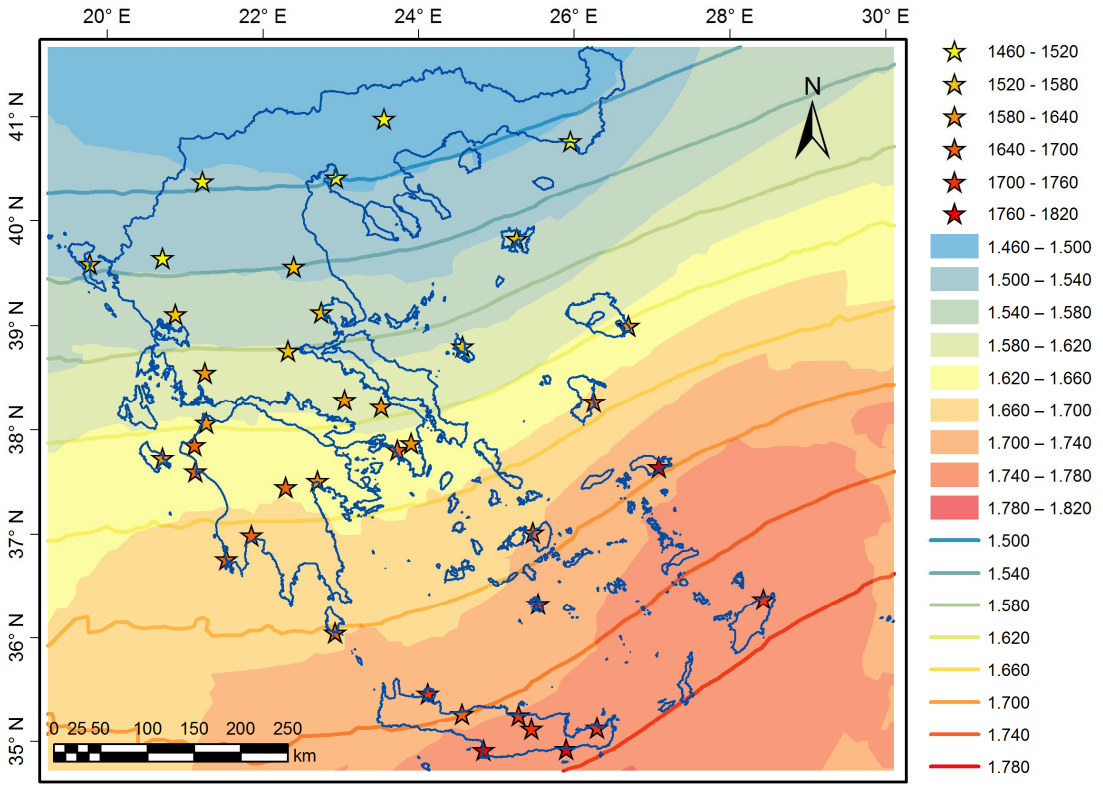


Σχήμα** 5.35: **Χάρτης σύγκρισης των αποτελεσμάτων της** IDW **(χρωματικές ζώνες) και της** LPI **(ισοήλιες γραμμές)

Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των δύο αυτών διαφορετικών προσεγγίσεων παρατηρούνται στις περιοχές υψηλών και χαμηλών τιμών ηλιακής ενέργειας. Στις μέσες τιμές ηλιακής ενέργειας, ήτοι στη ζώνη 1580-1700 kWh/m^2, τα δύο μοντέλα εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα. Το μοντέλο της IDW, στην προσπάθειά του να εκτιμήσει τιμές ηλιακής ενέργειας πέρα από τα σημεία όπου περιβάλλονται από μετεωρολογικούς σταθμούς (π.χ. ανατολικότερα της Σάμου και της Ρόδου ή δυτικότερα της Μεθώνης), παράγει έντονα ασύμμετρες ζώνες οι οποίες δεν μπορούν να εξηγηθούν από την κλιματολογία των περιοχών αυτών.

Στο Σχήμα 5.36 συγκρίνονται οι δύο παραλλαγές της μεθόδου kriging που χρησιμοποιήθηκαν, η OK και η EBK. Η πρώτη, στο βορειότερο τμήμα της Ελλάδας, δημιουργεί ζώνες οι οποίες τείνουν να γίνουν ομόκεντρες με τα κέντρα τους να βρίσκονται εκτός της υπό μελέτη επιφάνειας. Αντίστοιχα, στο νοτιοανατολικό τμήμα του χάρτη, η ζώνη των 1740-1780 kWh/m^2 φαίνεται να περιβάλλει τη ζώνη των 1780-1820 kWh/m^2, γεγονός που καταδεικνύει την αδυναμία της μεθόδου για επιτυχή εκτίμηση των τιμών εκτός της επιφάνειας που περιβάλλεται από τους επιλεγέντες μετεωρολογικούς σταθμούς. Αντίθετα, η EBK παράγει πιο ομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ενέργειας

η οποία ακολουθεί την εντός των ορίων των μετεωρολογικών σταθμών κατανομή, αποτρέποντας εσφαλμένα συμπεράσματα για την υπόλοιπη επιφάνεια.



Σχήμα** 5.36: **Χάρτης σύγκρισης των αποτελεσμάτων της μεθόδου** OK **(χρωματικές ζώνες) και της** EBK **(ισοήλιες γραμμές)

Οι σταθμοί που εμφάνισαν τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στη θέση όπου βρίσκονται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.IX. Οι τιμές με γαλάζιο χρώμα συμπληρώθηκαν για λόγους πληρότητας καθώς οι συγκεκριμένοι μετεωρολογικοί σταθμοί δεν συμπεριλαμβανόταν στη δεκάδα της αντίστοιχης μεθόδου. Όπως διαπιστώνεται από τον Πίνακα, η πλειοψηφία των σταθμών είναι κοινή για όλες τις χωρικές μεθόδους. Οι βορειότεροι μετεωρολογικοί σταθμοί των Σερρών και της Αλεξανδρούπολης παρουσιάζουν υψηλές τιμές απόκλισης μόνο κατά την εφαρμογή της αντίστροφης σταθμισμένης απόστασης. Οι μεγαλύτερες κατά μέσο όρο αποκλίσεις παρουσιάζονται στο μετεωρολογικό σταθμό της Σάμου, του Ρεθύμνου, των Ιωαννίνων και της Σκύρου.

Πίνακας** 5.IX: **Συγκεντρωτικός πίνακας μετεωρολογικών σταθμών που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα σφάλματα εκτίμησης (επί τοις εκατό) στην εφαρμογή των μεθόδων χωρικής παρεμβολής

Σταθμός	IDW	LPI	OK	EBK	**Μέσος όρος**
Σάμος	-6,00%	-5,43%	-4,23%	-4,32%	-5,00%
Ιεράπετρα	-5,50%	-3,75%	-4,53%	-2,91%	-4,17%
Τυμπάκι	-4,70%	-3,26%	-4,00%	-2,60%	-3,64%
Ελληνικό	-3,80%	-3,05%	-3,86%	-3,06%	-3,44%
Ανδραβίδα	-2,50%	-2,97%	-2,81%	-2,63%	-2,73%
Σέρρες	4,10%	1,10%	2,25%	0,90%	2,09%
Αλεξανδρούπολη	4,40%	2,00%	2,87%	1,40%	2,67%
Καστέλι	2,30%	3,15%	2,67%	2,73%	2,71%

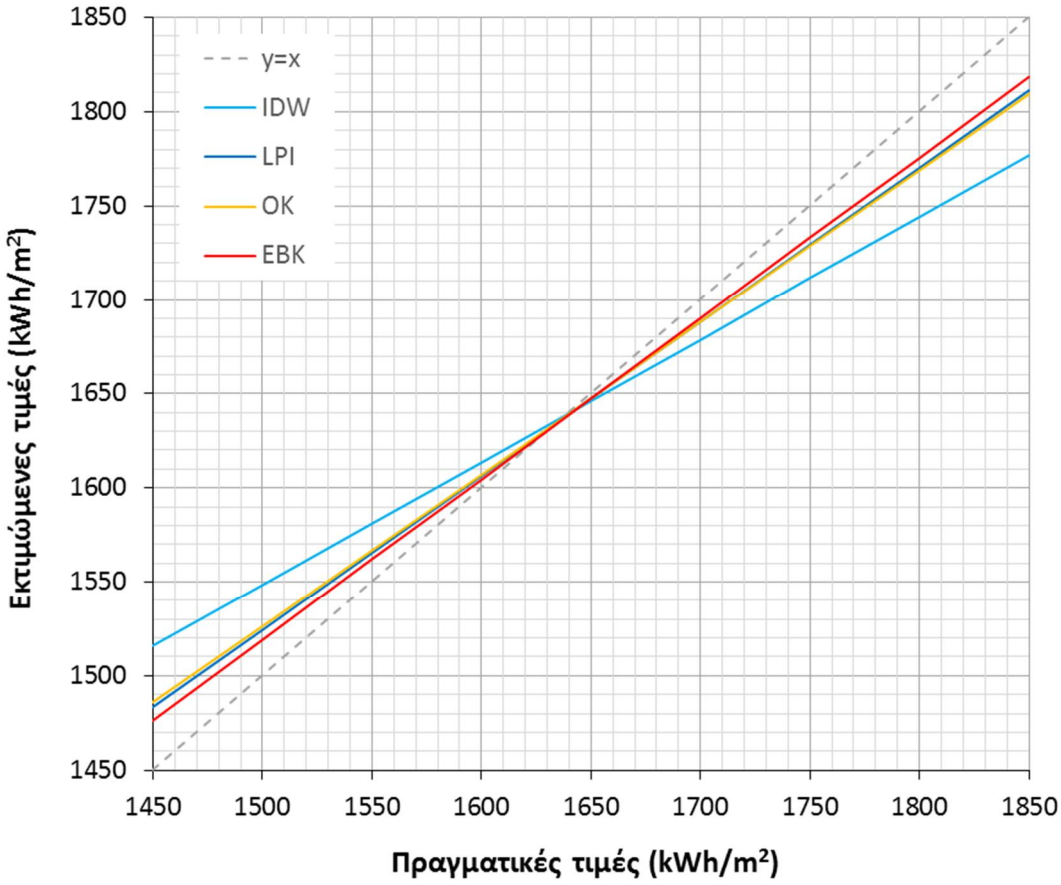
Λαμία	3,90%	4,00%	4,03%	3,43%	3,84%
Σκύρος	4,80%	4,50%	4,25%	3,65%	4,30%
Ιωάννινα	5,20%	4,72%	4,97%	3,64%	4,63%
Ρέθυμνο	4,80%	5,15%	4,54%	4,19%	4,67%

Εξετάζοντας τους δείκτες αξιολόγησης των διαφορετικών μεθόδων (Πίνακας 5.Χ) προκύπτει ότι παρόλη τη διαφορετικότητα των ισοηλίων γραμμών που παράγουν οι παραπάνω μέθοδοι χωρικής παρεμβολής, παρουσιάζουν στο σύνολό τους μικρές τιμές μέσου σφάλματος εκτίμησης. Το μικρότερο σφάλμα εκτίμησης επιτεύχθηκε με τη μέθοδο EBK, η οποία παρουσίασε σφάλμα τουλάχιστον 50% μικρότερο από την αμέσως επόμενη καλύτερη. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή μέσου σφάλματος και RMSE καθώς επίσης και ελάχιστη τιμή μέσου τυποποιημένου σφάλματος.

Πίνακας** 5.Χ: **Συγκεντρωτικός πίνακας δεικτών αξιολόγησης της ικανότητας των μοντέλων χωρικής παρεμβολής στην εκτίμηση τιμών ετήσιας ηλιακής ενέργειας στις θέσεις των** 39 **επιλεγέντων μετεωρολογικών σταθμών

Μέθοδος χωρικής παρεμβολής	MBE (kWh/m^2)	RMSE (kWh/m^2)	**Τυποποιημένη τιμή** MBE	**Τυποποιημένη τιμή** RMSE
IDW	0,91	45,3		
LPI	-0,21	38,8	-0,005	0,99
OK	-0,18	4,1	-0,01	0,91
EBK	-0,09	38,3	-0,005	0,92

Στο Σχήμα 5.37 συγκρίνονται οι ευθείες παλινδρόμησης που προέκυψαν από τα διαγράμματα διασποράς των εκτιμώμενων από τα μοντέλα τιμών με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας των 39 μετεωρολογικών σταθμών. Σύμφωνα με το διάγραμμα, η μέθοδος IDW έχει τη μεγαλύτερη απόκλιση από την ευθεία απόλυτης ταύτισης εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών y=x. Οι μέθοδοι LPI και OK παρέχουν εκτιμήσεις παρόμοιας αξιοπιστίας, ενώ ξεχωρίζει η EBK καθώς η ευθεία παλινδρόμησης πλησιάζει περισσότερο προς την y=x. Επίσης, στο διάγραμμα γίνεται φανερό ότι όλες οι μέθοδοι χωρικής παρεμβολής υποεκτιμούν τις υψηλές τιμές ηλιακής ενέργειας, ενώ αντίθετα υπερεκτιμούν τις χαμηλότερες, στοιχείο το οποίο αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό των μεθόδων αυτών.



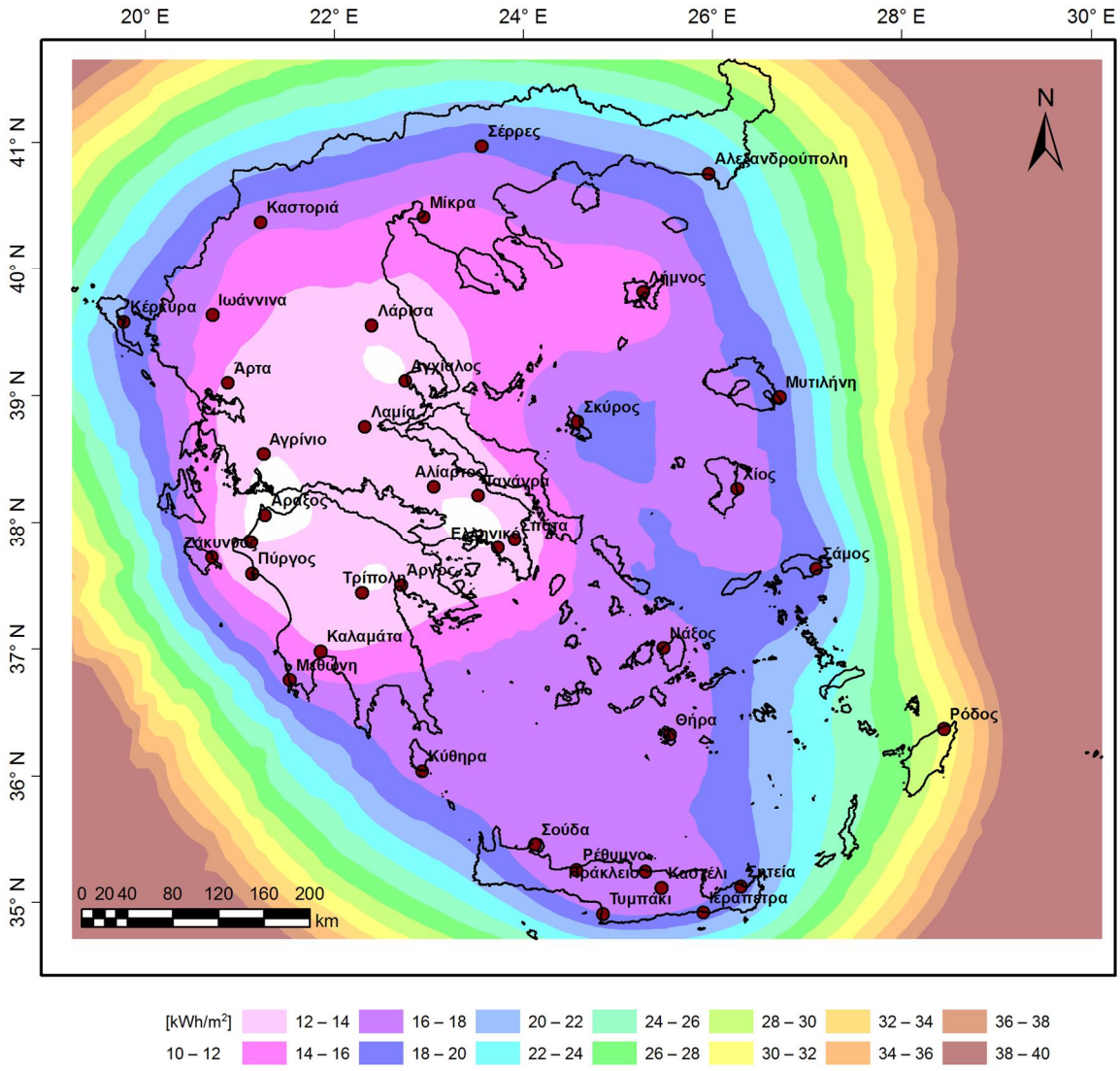
Σχήμα** 5.37: **Σύγκριση των βέλτιστων ευθειών παλινδρόμησης των μοντέλων χωρικής παρεμβολής

Συνοψίζοντας, τα χρησιμοποιηθέντα μοντέλα παρέχουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις με οριακά πιο βελτιωμένα σφάλματα εκτίμησης στην περίπτωση των μεθόδων LPI και EBK. Μεταξύ των δύο προσδιοριστικών μεθόδων, φανερά πιο αξιόπιστος εκτιμητής για τη συγκεκριμένη βάση δεδομένων αποδείχθηκε η μέθοδος LPI. Μεταξύ των στοχαστικών μεθόδων, επικράτησε η EBK καθότι αποδείχθηκε πιο συνεπής στην πρόβλεψη του ηλιακού δυναμικού στην περιοχή μελέτης.

Όλα τα μοντέλα παρουσίασαν αδυναμία στην πρόβλεψη των περιοχών γύρω από τα Ιωάννινα, τη Λαμία, τη Σκύρο, τη Σάμο, την Ιεράπετρα, το Ρέθυμνο, το Τυμπάκι και το Καστέλλι. Όπως είναι φανερό, πρόκειται για αδυναμία του δικτύου των μετεωρολογικών σταθμών, η οποία, προκειμένου να εξαληφθεί, απαιτεί πύκνωση του δικτύου με περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς.

Τέλος, όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα κριτήρια αξιολόγησης υπέδειξαν τόσο τη μέθοδο LPI, όσο και την EBK εξίσου σταθερές και αμερόληπτες. Ωστόσο, επιλέχθηκε η EBK ως η πιο αξιόπιστη για την παραγωγή των ετήσιων, αλλά και των μηνιαίων ηλιακών χαρτών της Ελλάδος.

Στο Σχήμα 5.38 παρουσιάζεται ο χάρτης τυποποιημένου σφάλματος εκτίμησης της ετήσια ηλιακής ενέργειας με την εφαρμογή της μεθόδου EBK. Στα σημεία όπου το δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών είναι πυκνότερο εμφανίζονται μειωμένες τιμές σφαλμάτων, ενώ μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται σε απομακρυσμένες από τους μετεωρολογικούς σταθμούς περιοχές. Το μεγαλύτερο μέρος της χερσαίας επιφάνειας του χάρτη παρουσιάζει τιμές τυποποιημένου σφάλματος μικρότερες των 17 kWh/m^2, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του χρησιμοποιούμενου μοντέλου. Με τη βοήθεια του χάρτη κατανομής των τυποποιημένων σφαλμάτων, σε συνδυασμό με τον ηλιακό χάρτη, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να λαμβάνει, εκτός από την τιμή της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στη θέση εκτίμησης, το αντίστοιχο τυποποιημένο σφάλμα.



***Σχήμα** 5.38: **Χάρτης τυποποιημένου σφάλματος εκτίμησης της ετήσιας ολικής ηλιακής ενέργειας με τη μέθοδο** EBK*

5.5 Δημιουργία μηνιαίων ηλιακών χαρτών

Η EBK χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των μηνιαίων χαρτών ετήσιας ηλιακής ενέργειας, με μικρές τροποποιήσεις κατά την παραμετροποίηση της μεθόδου, προκειμένου να βελτιστοποιηθούν τα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 5.XI παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αξιολόγησης της μεθόδου για όλη τη χώρα, για κάθε μήνα του έτους.

Πίνακας** 5.XI: **Αξιολόγηση της εκτίμησης τιμών μηνιαίας ηλιακής ενέργειας με την εφαρμογή της** EBK **στις τιμές των** 39 **επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών

Μήνας	**Μέση τιμή** (kWh/m²)	MBE (kWh/m²)	RMSE (kWh/m²)	**Τυποποιημένη τιμή** MBE	**Τυποποιημένη τιμή** RMSE
Ιανουάριος	61,32	0,06	4,1	0,010	0,93
Φεβρουάριος	79,71	0,04	4,6	0,006	1,00
Μάρτιος	122,70	-0,03	5,2	-0,002	0,95

Απρίλιος	159,37	0,14	6,5	0,008	0,98
Μάιος	194,36	-0,13	5,3	-0,009	0,99
Ιούνιος	216,63	0,22	4,9	0,019	0,95
Ιούλιος	222,97	-0,13	6,0	-0,021	0,94
Αύγουστος	201,37	0,06	5,1	0,005	0,95
Σεπτέμβριος	152,67	-0,09	5,0	-0,018	1,00
Οκτώβριος	106,57	0,13	5,1	0,021	1,00
Νοέμβριος	66,25	0,05	3,3	0,012	0,99
Δεκέμβριος	52,29	0,01	2,9	0,012	0,98

Από τον Πίνακα 5.XI διαπιστώνεται ότι ο Ιούνιος αποτελεί το μήνα με το υψηλότερο μέσο σφάλμα εκτίμησης. Επίσης, στους ενδιάμεσους, μεταξύ της χειμερινής και θερινής περιόδου μήνες, Απρίλιο και Οκτώβριο, το μοντέλο παρουσιάζει μικρότερη ακρίβεια εκτίμησης των μηναίων τιμών. Παρόλα αυτά, τα σφάλματα βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, ενώ η αξιοπιστία του μοντέλου επιβεβαιώνεται και από τις τιμές του μέσου τυποποιημένου σφάλματος που βρίσκονται πάρα πολύ κοντά στο μηδέν. Παρόμοια συμπεριφορά έχει και η τυποποιημένη τιμή RMSE, η οποία είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη από 0,9 και πλησιάζει, με μικρές αποκλίσεις, τη μονάδα. Στη συνέχεια ακολουθούν οι ηλιακοί χάρτες για κάθε μήνα του έτους όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου EBK (Σχήματα 5.39 έως 5.50). Σημειώνεται ότι η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιείται δεν είναι κοινή σε όλους τους χάρτες λόγω των μεγάλων διαφορών που παρατηρούνται στις τιμές της ηλιακής ενέργειας από μήνα σε μήνα. Κατ' αυτόν τον τρόπο υπάρχει κάποια δυσκολία στη μελέτη της από μήνα σε μήνα μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας, διευκολύνεται όμως η ανά μήνα μελέτη της χωρικής κατανομής της.

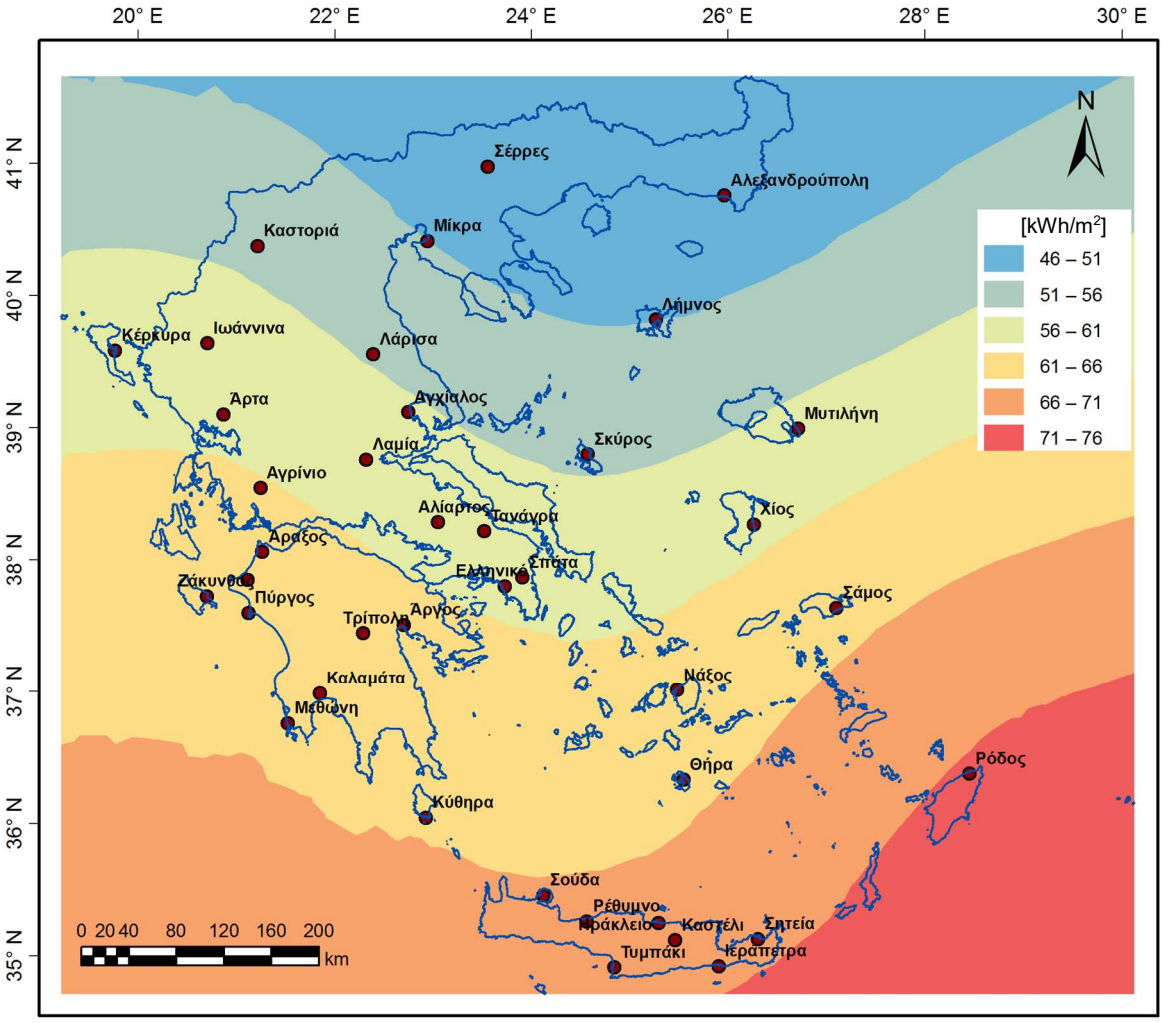
Παρατηρώντας τους μηνιαίους χάρτες, διαπιστώνεται ότι κατά τους μήνες της ψυχρής περιόδου του έτους (Οκτώβριος-Μάρτιος), εντοπίζονται ελάχιστες τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας στη Βόρεια Ελλάδα και μέγιστες στην νοτιοανατολική. Παρατηρείται επίσης ότι τα ελάχιστα σημειώνονται μάλλον στη Μακεδονία, τη Θράκη και το Βόρειο Αιγαίο παρά στην Ήπειρο και το Βόρειο Ιόνιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάπτυξη νεφώσεων στο Βόρειο Αιγαίο προκαλείται τόσο από ανέμους βορείου τομέως (κυρίως βορειοανατολικούς) όσο και από ανέμους νοτίου τομέως, οι οποίοι, μεταφέροντας υγρές μάζες αέρα, εμπλουτιζόμενες σε υδρατμούς κατά τη διέλευσή τους πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος, αυξάνουν την ορογραφικού κυρίως τύπου νέφωση. Το ελάχιστο της ηλιακής ακτινοβολίας στο Βόρειο Αιγαίο κατά τους χειμερινούς μήνες, συμφωνεί και με τα ευρήματα της Κοτίνη-Ζαμπάκα (1983) και των Lolis et al. (1999), σύμφωνα με τα οποία το μέγιστο της νεφοκάλυψης κατά την ίδια περίοδο παρατηρείται πάνω από το Βόρειο Αιγαίο. Αντιθέτως, στη Βορειοδυτική Ελλάδα, λόγω του προσανατολισμού της οροσειράς της Πίνδου, από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά, οι βορειοανατολικοί άνεμοι είναι ξηροί καταβατικοί προκαλώντας νεφοδιάλυση και αιθρία ενώ η ανάπτυξη νεφώσεων παρατηρείται μόνο με ανέμους του νοτίου τομέως. Το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας στα Δωδεκάνησα κατά το χειμώνα, είναι επίσης σε συμφωνία με τα ευρήματα της Κοτίνη-Ζαμπάκα (1983) αφού στην ίδια περιοχή εντοπίζει ελάχιστα νεφοκάλυψης.

Κατά τον Απρίλιο, το ελάχιστο της ηλιακής ακτινοβολίας μετατοπίζεται προς τα δυτικά με κέντρο πάνω από την Ήπειρο και τη βορειοδυτική Μακεδονία. Αυτό οφείλεται στη μετατόπιση των τροχιών των υφέσεων, οι οποίες στη Μεσόγειο συνήθως κινούνται από τα δυτικά προς τα ανατολικά, από τα νοτιότερα σε βορειότερα γεωγραφικά πλάτη καθώς τελειώνει ο χειμώνας και αρχίζει η άνοιξη (Alpert et al. 1990). Το Μάιο, εκτός από τις τροχιές των υφέσεων, στην εμφάνιση του ελαχίστου συμβάλει και η εμφάνιση της στατικής αστάθειας στα ηπειρωτικά. Η ίδια εικόνα παρατηρείται και κατά το Σεπτέμβριο όταν οι τροχιές των υφέσεων αρχίζουν να μετακινούνται σταδιακά

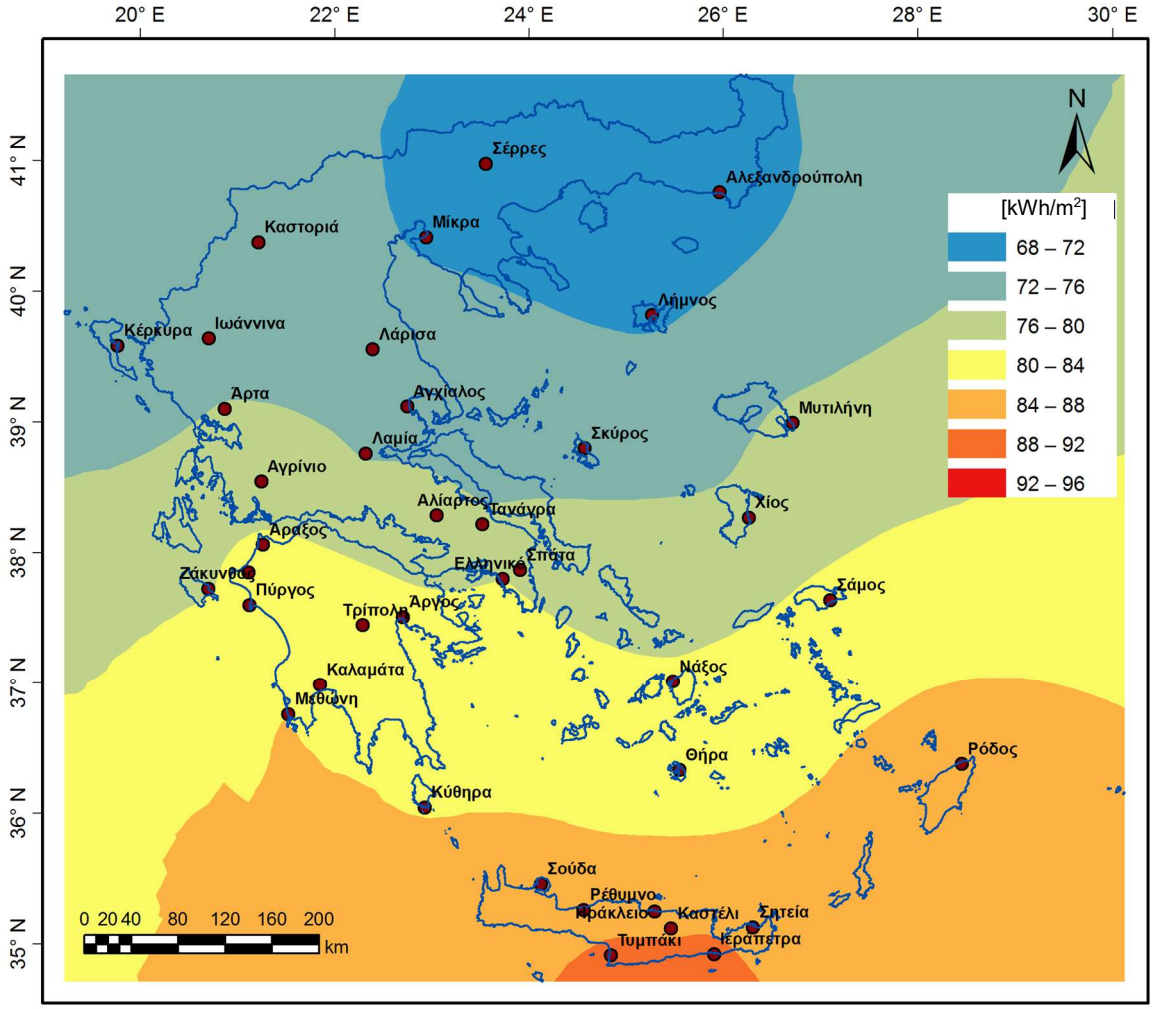
σε πιο μικρά γεωγραφικά πλάτη. Σύμφωνα με τους Bartzokas et al. (2003), τους μήνες αυτούς τα μέγιστα των βροχοπτώσεων σημειώνονται μόνο στη βορειοδυτική Ελλάδα αφού οι υφέσεις που φθάνουν στην Ήπειρο από το Ιόνιο Πέλαγος, συνεχίζουν την πορεία τους προς τα βορειοανατολικά και όχι προς τα ανατολικά (Alpert et al. 1990).

Κατά την περίοδο των θερινών μηνών, το νοτιοανατολικό άκρο της Ελλάδας εμφανίζει τη μέγιστη ετήσια ηλιακή ενέργεια. Η παραπάνω διαπίστωση βρίσκεται σε συμφωνία με την αντίστοιχη κατανομή της νέφωσης που παρουσιάζουν στην εργασίας τους οι Lolis et al. (1999) για την ίδια περίοδο. Ο συνδυασμός της στατικής αστάθειας της ατμόσφαιρας με τη θέρμανση της ξηράς, που παρατηρείται κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών πάνω από την ηπειρωτική χώρα, δημιουργεί το τοπικό ελάχιστο της ηλιακής ενέργειας πάνω από την περιοχή, λόγω της αυξημένης νέφωσης τις θερμές ώρες της ημέρας. Ωστόσο, η μικρή πυκνότητα των διαθέσιμων σταθμών στην περιοχή της βόρειας ηπειρωτικής χώρας δεν βοηθάει για τον ακριβή εντοπισμό του κέντρου των ελαχίστων τιμών.

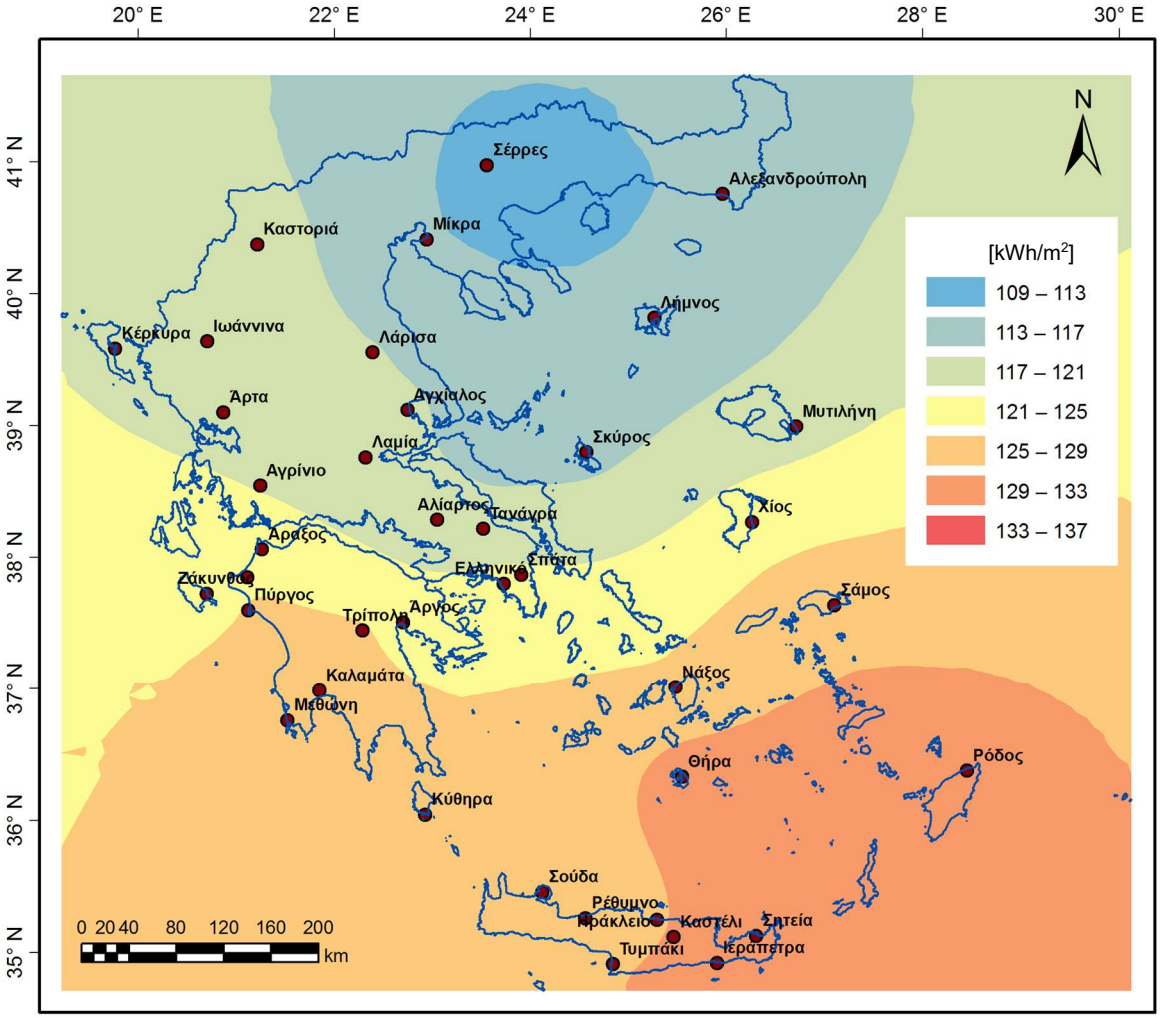
Θα πρέπει να τονισθεί ότι οι ζώνες ηλιακής ενέργειας που παράγονται με τη μέθοδο της χωρικής παρεμβολής δε μπορούν να αποδώσουν λεπτομερή, παρά μόνο γενικά, συμπεράσματα σχετικά με τη χωρική κατανομή του υπό μελέτη μεγέθους, αφού, η μορφή των ισοήλιων καμπυλών εξαρτάται από τις τιμές των διαθέσιμων σταθμών. Σημειώνεται ότι για τη χάραξη των ισοπληθών καμπυλών όλοι οι σταθμοί συμμετέχουν με την ίδια βαρύτητα, ανεξάρτητα από τη γεωμορφολογία της περιοχής στην οποία βρίσκονται.



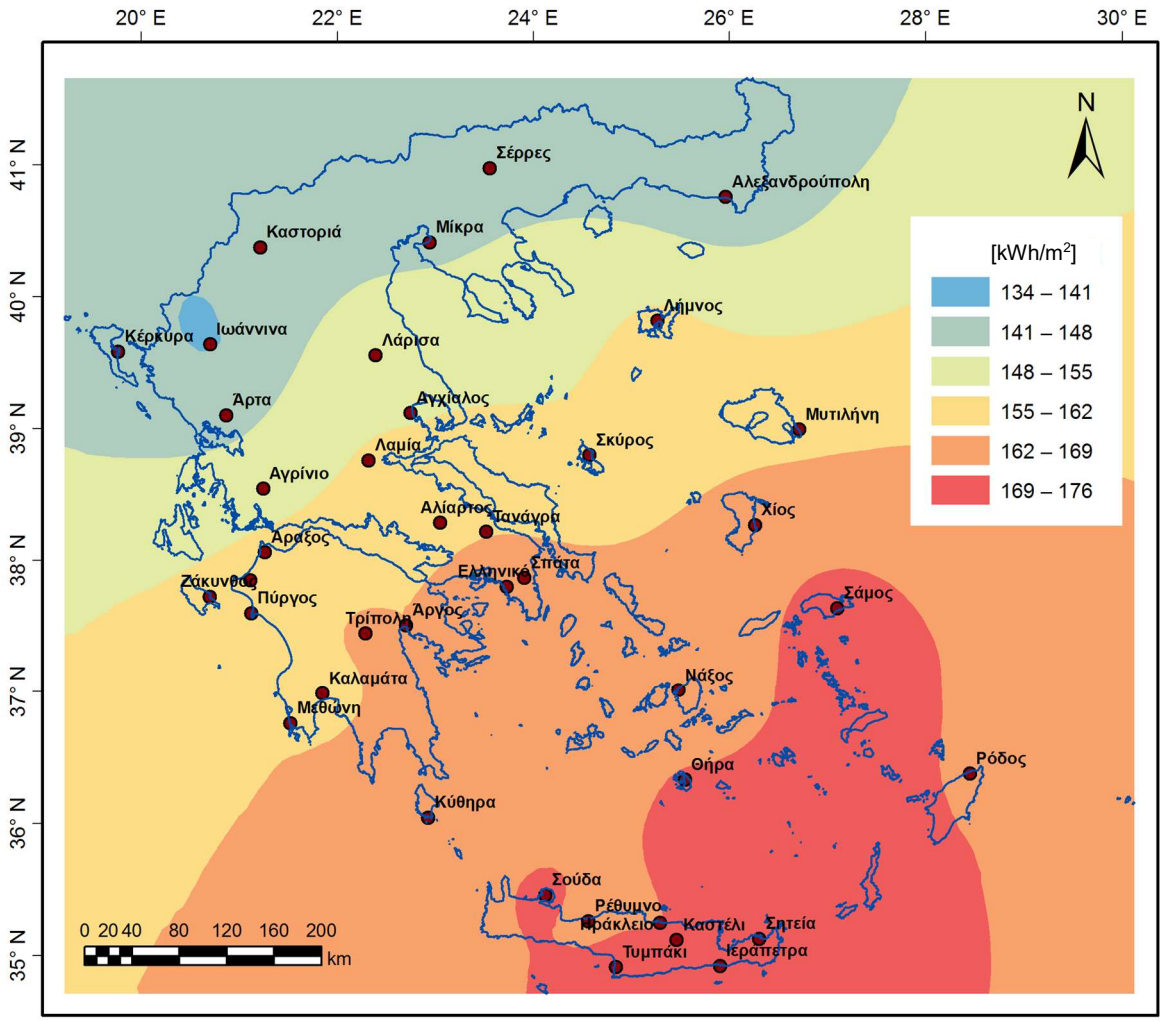
Σχήμα 5.39: Χάρτης πρόβλεψης της μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο, τον Ιανουάριο, με εφαρμογή της μεθόδου ΕΒΚ σε δεδομένα 39 μετεωρολογικών σταθμών



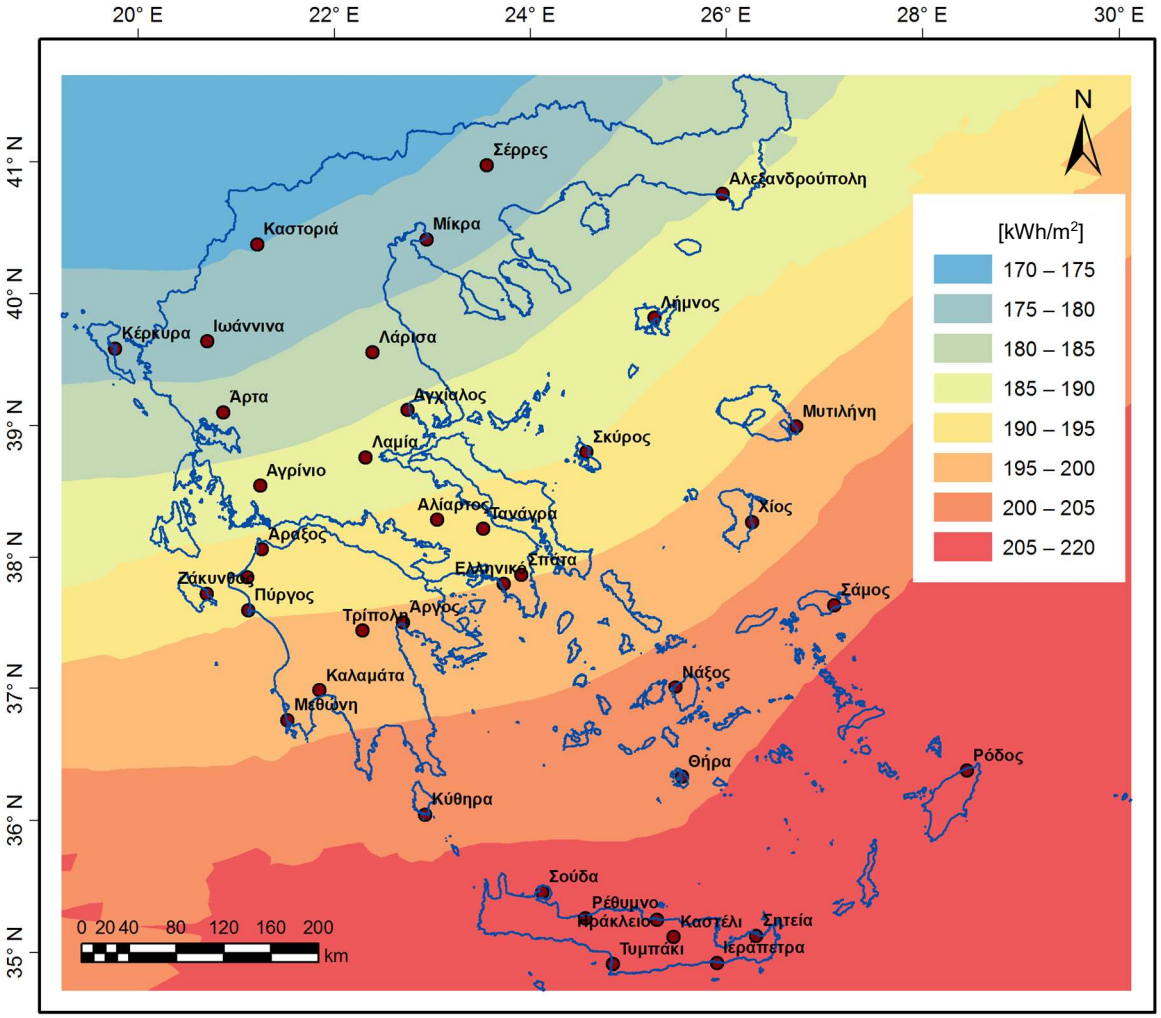
Σχήμα 5.40: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Φεβρουάριο



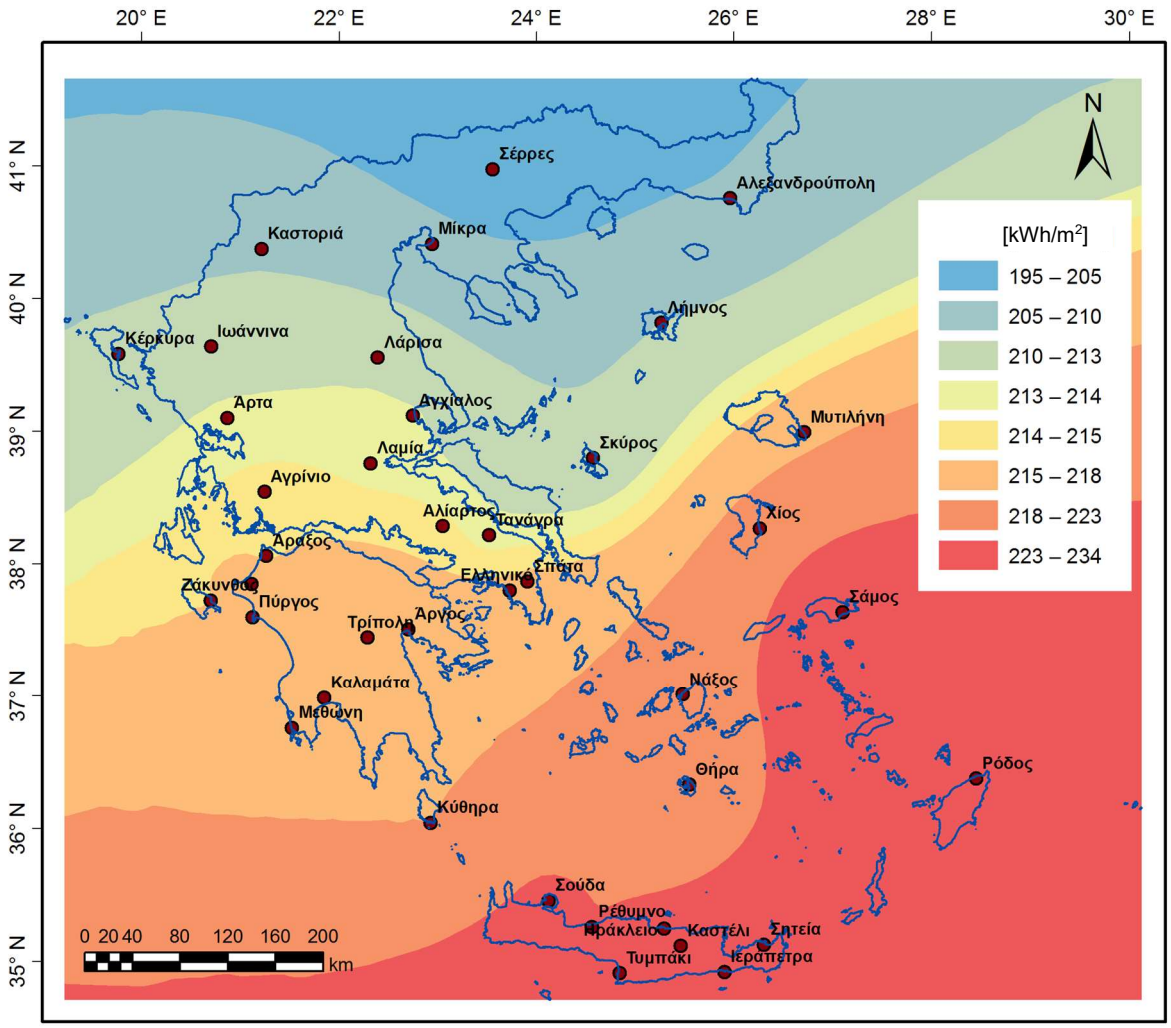
Σχήμα 5.41: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Μάρτιο



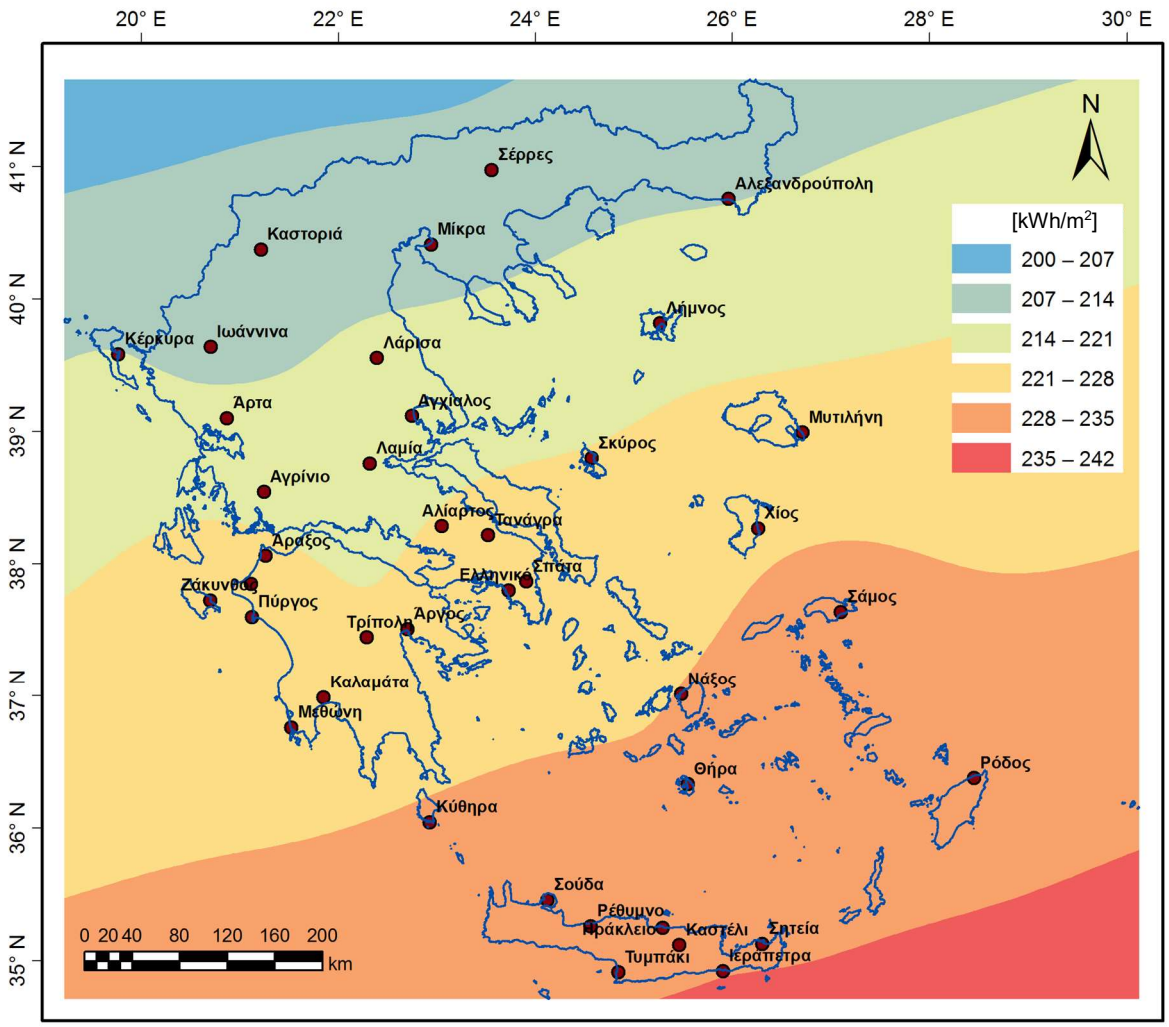
Σχήμα 5.42: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Απρίλιο



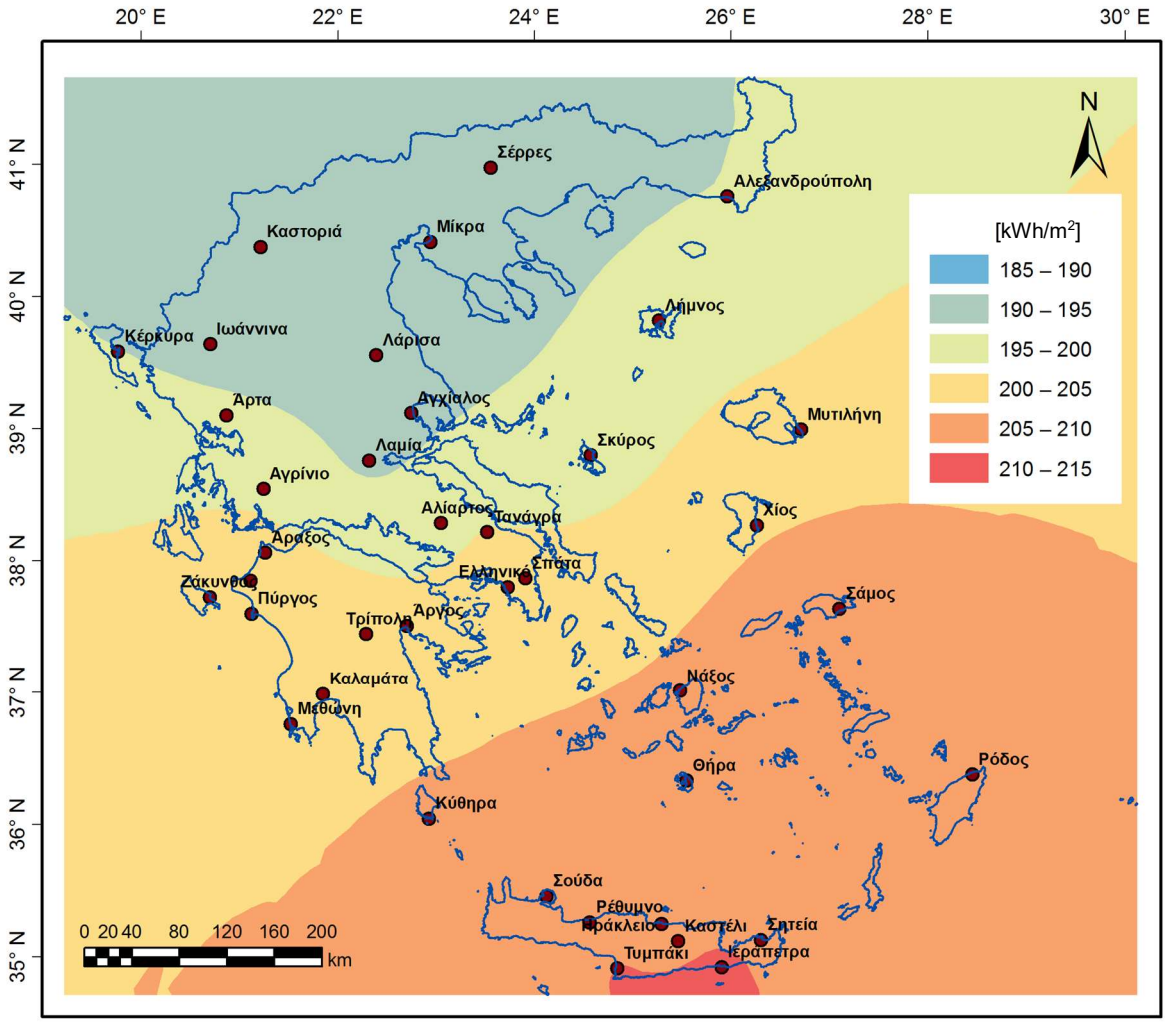
Σχήμα 5.43: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Μάιο



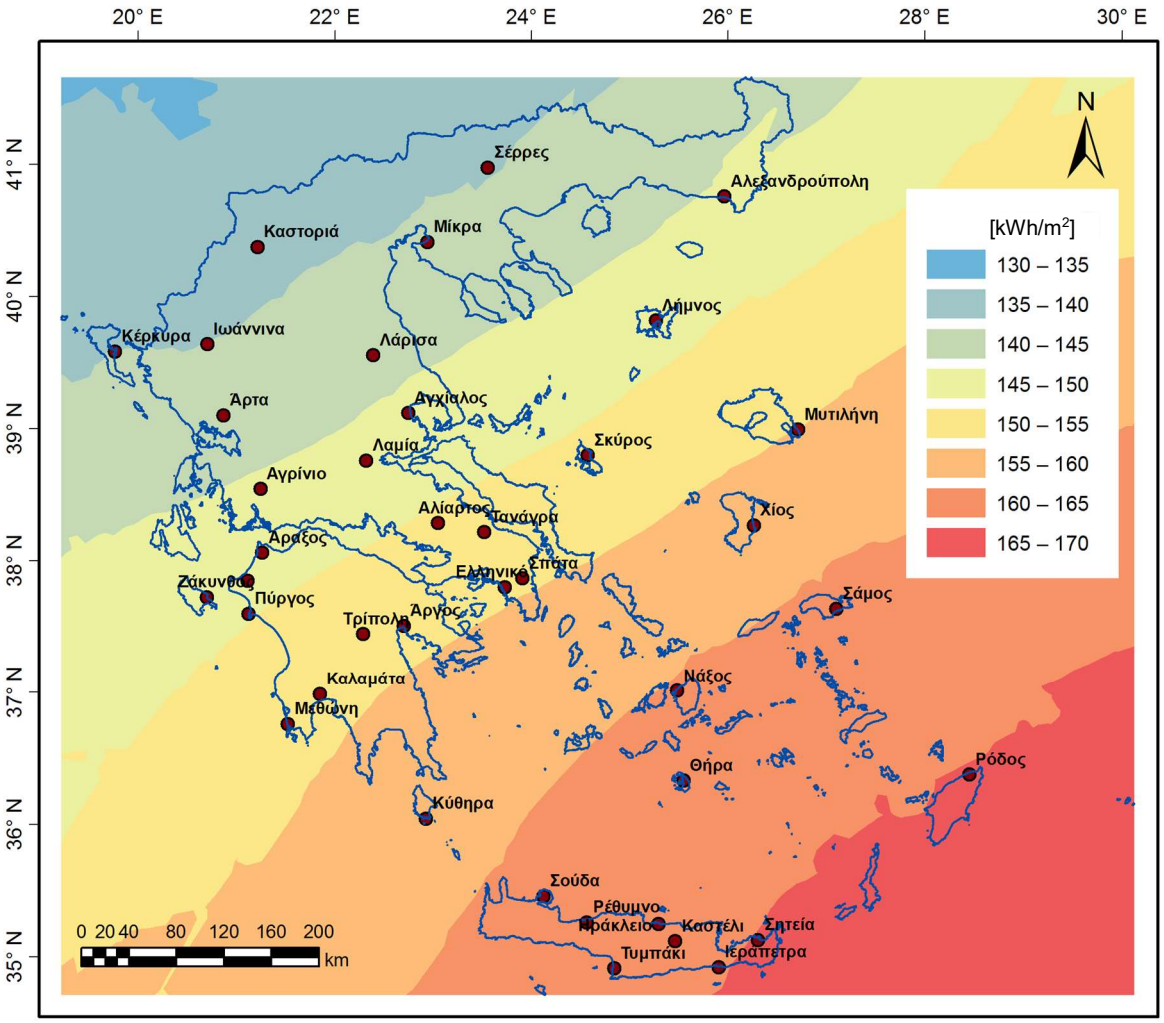
Σχήμα 5.44: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Ιούνιο



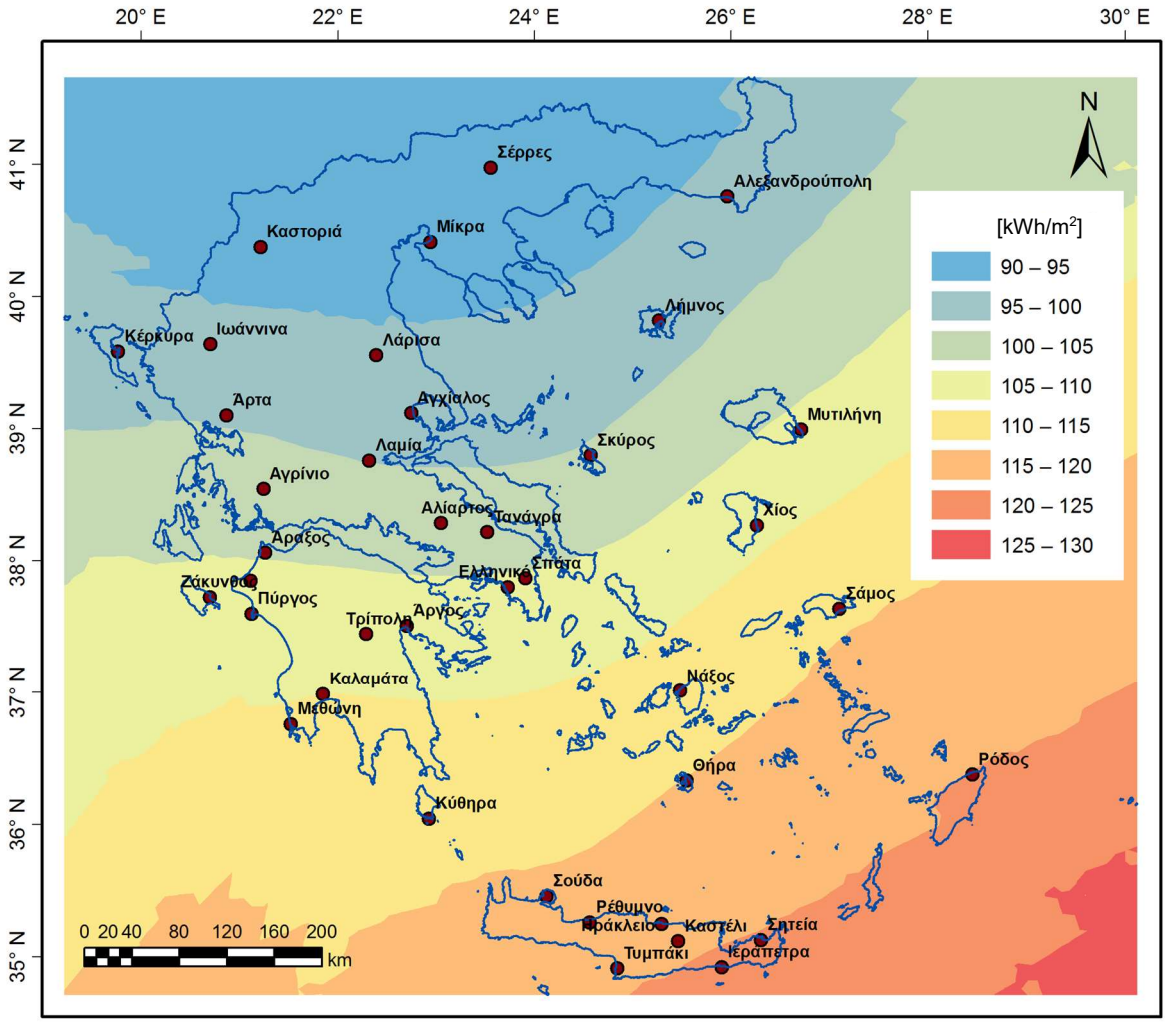
Σχήμα 5.45: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Ιούλιο



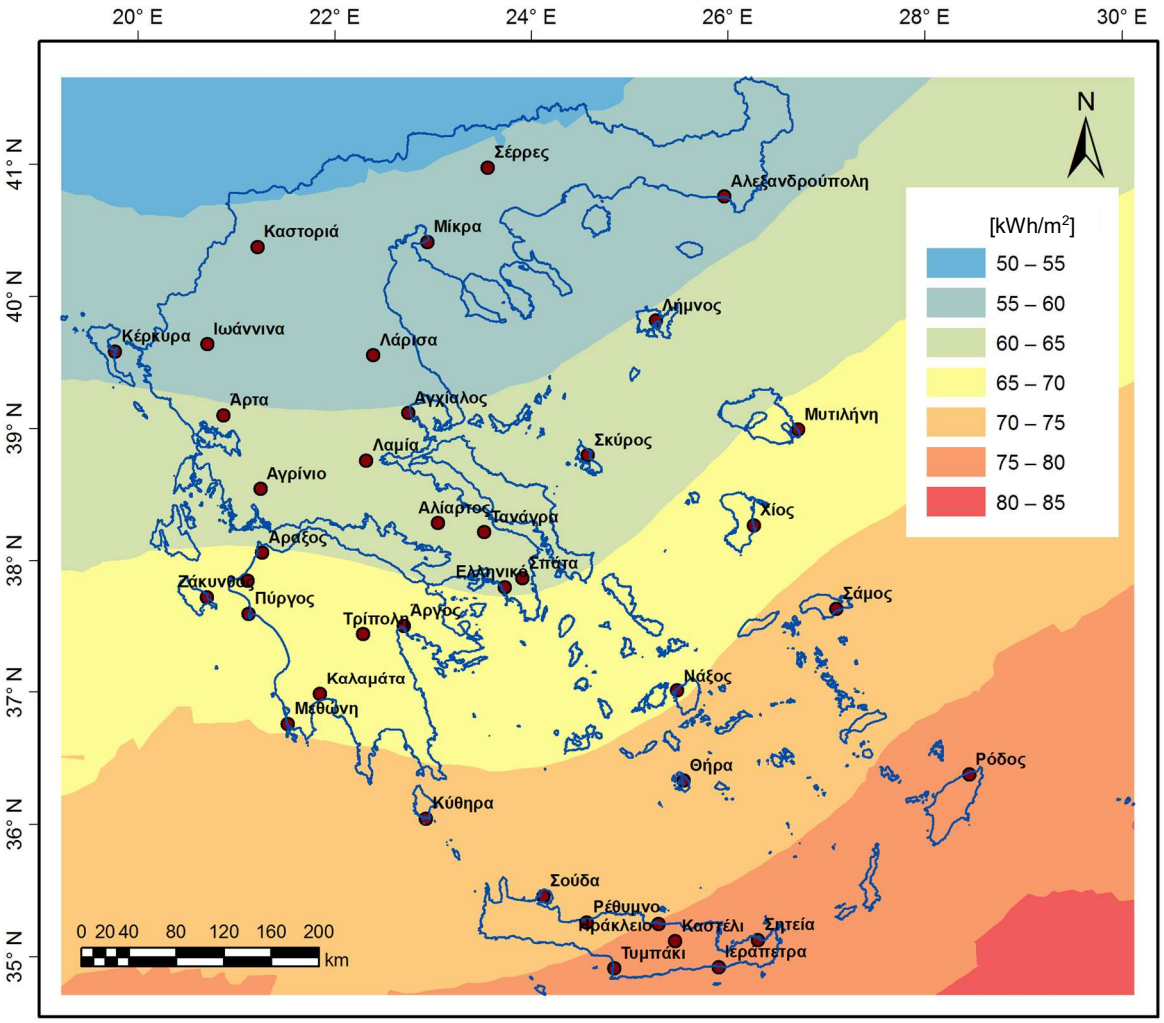
Σχήμα 5.46: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Αύγουστο



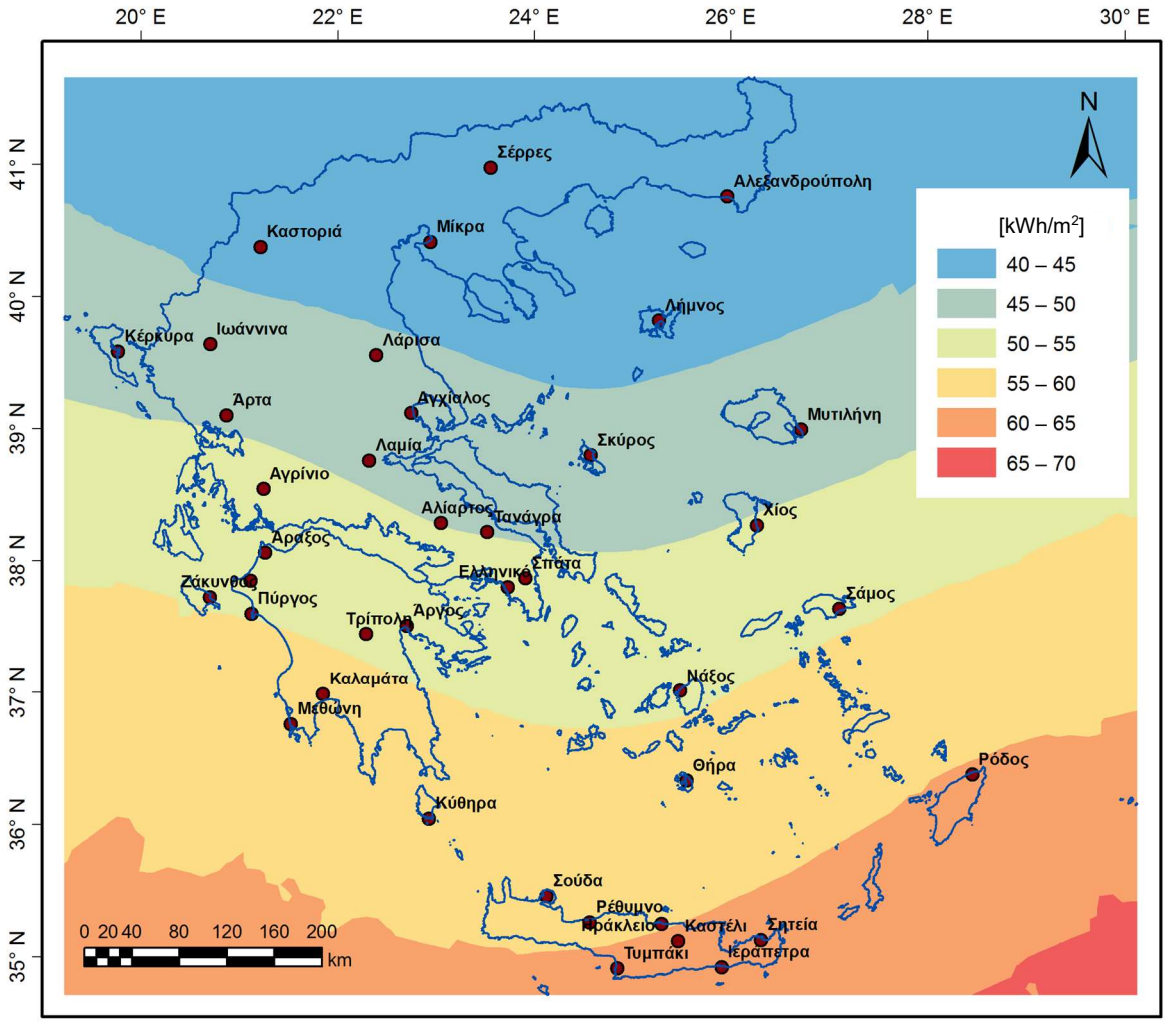
Σχήμα 5.47: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Σεπτέμβριο



Σχήμα 5.48: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά τον Οκτώβριο



Σχήμα 5.49: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Νοέμβριο



Σχήμα 5.50: Όπως στο Σχήμα 5.39, αλλά το Δεκέμβριο

Βιβλιογραφία

Abramowitz, M., 1988. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables. *American Journal of Physics*, 56(10), p.958.

Alpert, P., Neeman, B.U., Shay-El Y., 1990. Intermonthly variability of cyclone tracks in the Mediterranean. Journal of Climate, 3, 1474-1478.

Alsamamra, H., Ruiz-Arias, J.A., Pozo-Vázquez, D. & Tovar-Pescador, J., 2009. A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, pp.1343–1357.

Ångström, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, pp.121–126.

Axaopoulos, P.J., 2011. *Solar thermal conversion* P. J. Axaopoulos, ed., Athens, Greece: Simmetria Publications.

Bartier, P.M. & Keller, C.P., 1996. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). *Computers and Geosciences*, 22(7), pp.795–799.

Bartzokas, A., Lolis, C.J., Metaxas, D.A., 2003. A study on the intra-annual variation and the spatial distribution of precipitation amount and duration over Greece on a 10-day basis. International Journal of Climatology, 23, 207-222.

Bayes, T., 1963. An essay toward solving a problem in the doctrine of chances. Reprinted in facsimiles of two papers by Bayes.

Benavides, R., Montes, F., Rubio, A. & Osoro, K., 2007. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146, pp.173–188.

De Bollivier, M., Dubois, G., Maignan, M. & Kanevsky, M., 1997. Modified multilayer perceptron with local constraint: Artificial Neural Networks as an emerging method in spatial data analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 389, pp.226–229.

Briggs, D.J., Collins, S., Elliott, P., Fischer, P., Kingham, S., Lebret, E., Pryl, K., Van Reeuwijk, H., Smallbone, K. & Van Der Veen, A., 1997. Mapping urban air pollution using GIS: a regression-based approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(7), pp.699–718.

Briggs, D.J., De Hoogh, C., Gulliver, J., Wills, J., Elliott, P., Kingham, S. & Smallbone, K., 2000. A regression-based method for mapping traffic-related air pollution: Application and testing in four contrasting urban environments. *Science of the Total Environment*, 253(1-3), pp.151–167.

Burrough, P.A. & McDonnell, R.A., 1998. Principles of GIS. *Oxford University Press, London*.

Cheng, B. & Titterington, D.M., 1994. Neural Networks: A Review from a Statistical Perspective. *Statistical Sciences*, 9(1), pp.2–30.

Cherkassky, V. & Mulier, F.M., 2007. *Learning from data. Concepts, theory and methods* 2nd ed., Wiley.

Clarici, E., 1995. *Modelling of environmental data using artificial neural networks*. Imperial College of Science , Technology & Medicine, Royal School of Mines, Dept. of Mineral Resources Engineering.

Cressie, N., 1993. *Statistics for spatial data, revised edition*, Wiley.

Cressie, N., 1990. The origin of kriging. *Mathematical Geology*, 22(3), pp.239–252.

Deutsch, C. V & Journel, A.G., 1992. *Geostatistical software library and user's guide*, New York: Oxford University Press.

Diabate, L., Blanc, P. & Wald, L., 2004. Solar radiation climate in Africa. *Solar energy*, 76(6), pp.733–744.

Diem, J.E. & Comrie, A.C., 2002. Predictive mapping of air pollution involving sparse spatial observations. *Environmental Pollution*, 119(1), pp.99–117.

Dobesch, H., Dumolard, P. & Dyras, I., 2013. *Spatial interpolation for climate data: the use of GIS in climatology and meteorology*, John Wiley & Sons.

Dubois, G. & Tomczak, M., 2000. Cartographie de la radioactivité dans l'environnement suite à un accident nucléaire: approche automatisée ou expert dépendante. *Actes du 5ème colloque transfrontalier Cluse. Risques majeurs, perception, globalisation et management*.

Eldeiry, A. & Garcia, L., 2010. Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(970), pp.355–364.

Epanechnikov, V.A., 1969. Non-parametric estimation of a multivariate probability density. *Theory of Probability & Its Applications*, 14(1), pp.153–158.

Ertekin, C. & Evrendilek, F., 2007. Spatio-temporal modeling of global solar radiation dynamics as a function of sunshine duration for Turkey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145, pp.36–47.

Erxleben, J., Elder, K. & Davis, R., 2002. Comparison of spatial interpolation methods for estimating snow distribution in the Colorado Rocky Mountains. *Hydrological Processes*, 16(August), pp.3627–3649.

Flocas, A.A., 1980. Estimation and prediction of global solar radiation over Greece. *Solar Energy*, 24(1), pp.63–70.

Gandin, L.S., 1959. The problem on optimal interpolation. *Trudy GGO*, 99, pp.67–75.

Ghasemi, A. & Zahediasl, S., 2012. Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), pp.486–489.

Gilchrist, B. & Cressman, G.P., 1954. An experiment in objective analysis. *Tellus A*, 6(4).

Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*, Oxford University Press.

Goovaerts, P. & Van Meirvenne, M., 2001. Accounting for measurement and interpolation errors in soil contaminant mapping and decisionmaking. *Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, Cancún, Mexico*.

Gotway, C. & Rutherford, B., 1996. *The components of geostatistical simulation*, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).

Hofierka, J., Suri, M. & Šúri, M., 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference*. Trento, Italy, pp. 11–13.

Huld, T., Müller, R. & Gambardella, A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86, pp.1803–1815.

Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M., 1989. *An introduction to applied geostatistics*, New Yord: Oxford University Press.

Jones, N.L. & Nelson, J., 1992. Geoscientific modeling with TINs. *Geobyte*, 7, pp.44–49.

Journel, A.G. & Rossi, M.E., 1989. When do we need a trend model in kriging? *Mathematical Geology*, 21(7), pp.715–739.

Kambezidis, H.D., Larissi, I.K., Nastos, P.T. & Paliatsos, A.G., 2010. Spatial variability and trends of the rain intensity over Greece. *Advances in Geosciences*, 26, pp.65–69.

Kanevsky, M., Arutyunyan, R., Bolshov, L., Demianov, V. & Maignan, M., 1996. Artificial Neural Networks and spatial estimation of Chernobyl fallout. *Geoinformatics*, 7(1-2), pp.5–11.

Kavadias, K.A., Gitersos, C., Zafirakis, D. & Kaldellis, J.K., 2011. Optimum photovoltaic angle estimation for stand-alone installations of south Europe on the basis of experimental measurements. In *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2011)*. Ischia, Italy.

Kavadias, K.A., Spilios, E., Zafirakis, D. & Kaldellis, J.K., 2010. A revised integrated computational algorithm for the optimum sizing of stand-alone hybrid energy systems. In *5th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2010)*. Berlin, Germany.

Kebaili Bargaoui, Z. & Chebbi, A., 2009. Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall. *Journal of Hydrology*, 365(1-2), pp.56–73.

Kotinis-Zambakas, S.R., Angouridakis, V.E. & Zambakas, J.D., 1984. A criterion for defining transitional zones between humid continental and mediterranean climates in the region of Greece. *Journal of Climatology*, 4(1), pp.99–104.

Krige, D.G., 1952. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, pp.201–215.

Lam, N.S.-N., 1983. Spatial interpolation methods: A Review. *The American Cartographer*, 10(2), pp.129–150.

Leenaers, H., Okx, J.P. & Burrough, P.A., 1990. Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution. *CATENA*, 17(6), pp.535–550.

Lees, B.G., 1996. Neural network applications in the geosciences: an introduction. *Computers & Geosciences*, 22(9), pp.955–957.

Lolis, C.J., Bartzokas, A. & Metaxas, D.A., 1999. Spatial covariability of the climatic parameters in the Greek area. *International Journal of Climatology*, 19(2), pp.185–196.

Madhlopa, A., 2006. Solar radiation climate in Malawi. *Solar Energy*, 80(8), pp.1055–1057.

Matheron, G., 1962. *Traité de géostatistique appliquée*, Editions Technip.

Meteonorm, 2015. Meteonorm: Features. Available at: http://meteonorm.com/en/features [Accessed July 25, 2015].

Moran, P.A.P., 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 10(2), pp.243–251.

Myers, R.H., 2000. *Classical and modern regression with applications*, Boston, MA: Duxbury Press.

Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., Chiu, S.N. & Kendall, D.G., 2008. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*, Wiley.

Panofsky, R.A., 1949. Objective Weather-Map Analysis. *Journal of Meteorology*, 6(6), pp.386–392.

Papoulis, A. & Pillai, S.U., 2002. *Probability, random variables, and stochastic processes*, Tata McGraw-Hill Education.

Rehman, S. & Ghori, S.G., 2000. Spatial estimation of global solar radiation using geostatistics. *Renewable Energy*, 21, pp.583–605.

Ruiz-Arias, J.A., Pozo-Vázquez, D., Lara-Fanego, V., Santos-Alamillos, F.J. & Tovar-Pescador, J., 2011. A high-resolution topographic correction method for clear-sky solar irradiance derived with a numerical weather prediction model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(Ineichen 2008), pp.2460–2472.

Scharmer, K. & Greif, J., 2000. *The European Solar Radiation Atlas. Volume 1*, Ecole des Mines de Paris.

Šúri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D. & Ossenbrink, H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81, pp.1295–1305.

Tabios, G.Q. & Salas, J.D., 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*, 21(3), pp.365–380.

Thiebaux, H.J. & Pedder, M.A., 1987. *Spatial objective analysis with applications in atmospheric science*, London: Academic Press, 1987.

Thiessen, A.H., 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, 39(7), pp.1082–1089.

Thompson, R.D. & Perry, A.H., 1997. *Applied climatology: Principles and practice* 1st ed., Routledge.

Tobler, W.R., 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(2), pp.234–240.

Tveito, O.E., Wegehenkel, M. & Wel, F. van der, 2008. The use of geographic information systems in climatology and meteorology.

Venables, W.N. & Ripley, B.D., 1997. *Modern Applied Statistics with S-PLUS* 2nd ed., New York: Springer .

Watson, D.F. & Philip, G.M., 1984. Triangle based interpolation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16(8), pp.779–795.

Webster, R. & Oliver, M.A., 2001. Geostatistics for environmental scientists (Statistics in Practice).

Zelenka, A., Czeplak, G., D'Agostino, V., Josefsson, W., Maxwell, E.L., Perez, R., Noai, M., Ratto, C. & Festa, R., 1992. *Techniques for supplementing solar radiation network data, vol 2. A report IEA task 9. Report no. IEA-SHCP-9D-1*,

Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A. & Armstrong, M.P., 1999. An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*, 31(4), pp.375–390.

Κοτίνη-Ζαμπάκα, Σ.Ι., 1983. Συμβολή στην μελέτη του κλίματος της Ελλάδας. Κανονικός καιρός κατά μήνα. Ακαδημία Αθηνών, Κέντρο Ερεύνης Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Κλιματολογίας, Δημοσίευμα 8, σελίδες 248.

Κουτσόπουλος, Κ.Χ., 2002. *Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Στάθης, Δ., 2004. Ακραία γεγονότα βροχής και πλημυρογένηση στην Ελλάδα. *7ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο*. Μυτιλήνη: Ελληνική Γεωγραφική Εταιρία.

Φωτιάδη, Α.Κ., Μεταξάς, Δ.Α. & Μπαρτζώκας, Α., 1996. Στατιστική μελέτη του καθεστώτος της βροχής στην Βορειοδυτική Ελλάδα. *3ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο, Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας, Φυσικής της Ατμόσφαιρας*. Αθήνα, pp. 52–61.

6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Υβριδικά Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

6.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί, για τη σύγχρονη κοινωνία, ένα από τα βασικότερα αγαθά κατατάσσοντάς την, στις ανεπτυγμένες κοινωνίες του πλανήτη, στην ίδια θέση αναγκαιότητας με εκείνη για την πρόσβαση σε καθαρό νερό και αέρα. Παρ' όλα αυτά, το αγαθό αυτό, το οποίο θεωρείται δεδομένο στις ανεπτυγμένες περιοχές του πλανήτη, το στερείται πάνω από το 20% του πληθυσμού της Γης (Takada & Fracchia 2007). Ειδικότερα, σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών, 1,3 δισεκατομμύρια κάτοικοι του πλανήτη στερούνται πρόσβασης σε ηλεκτρική ενέργεια, εκ των οποίων το 95% βρίσκονται στην υποσαχάρια Αφρική και την Ασία, ενώ το 85% σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές. Το πρόβλημα της πρόσβασης σε ηλεκτρική ενέργεια αντιμετωπίζεται ακόμη και στις ανεπτυγμένες κοινωνίες, όπου σε απομακρυσμένες από το ηλεκτρικό δίκτυο περιοχές οι κάτοικοι είτε δεν έχουν τη δυνατότητα διασύνδεσης, είτε το κόστος είναι απαγορευτικό (Legros et al. 2009). Μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 500.000 κάτοικοι στερούνται άμεσης πρόσβασης σε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και είναι υποχρεωμένοι να χρησιμοποιούν ρυπογόνα καύσιμα όπως κηροζίνη, πετρέλαιο, ξύλο κ.α. για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το μέγεθος των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών είναι τεράστιο αν αναλογισθεί κανείς ότι η ελάχιστη απαιτούμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται κατ' άτομο από 250 έως 500 kWh ετησίως (IEA 2011). Το νούμερο αυτό, συγκριτικά με τη μέση κατά κεφαλήν ηλεκτρική κατανάλωση στον οικιακό τομέα στα ανεπτυγμένα κράτη, η οποία κυμαίνεται από 1600 kWh (ευρωπαϊκός μέσος όρος) έως 4500 kWh (μέσος όρος ΗΠΑ), αποτελεί την ελάχιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των βασικών αναγκών μιας κατοικίας. Για την εξάλειψη της έλλειψης πρόσβασης σε ηλεκτρική ενέργεια απαιτείται αύξηση της ετήσιας παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 2,5% και επενδύσεις που ξεπερνούν τα 600 δις ευρώ (IEA 2011).

Η διεθνής κοινότητα έχει πλέον συνειδητοποιήσει ότι θα πρέπει να αρθούν οι ανισότητες που παρατηρούνται σε διεθνές επίπεδο μεταξύ των χωρών που ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) και των αναπτυσσόμενων χωρών, σχετικά με την πρόσβαση στην ενέργεια. Η ετήσια αναφορά του Διεθνούς Γραφείου Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) που δημοσιεύτηκε το 2010 (IEA 2009) προέβλεπε ότι μέχρι το 2030 το 60% των νέων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και το 63% των επενδύσεων στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας θα αφορούν αυτόνομες ή μη διασυνδεδεμένες ηλεκτρικές μονάδες παραγωγής. Ο στόχος αυτός αναδεικνύει

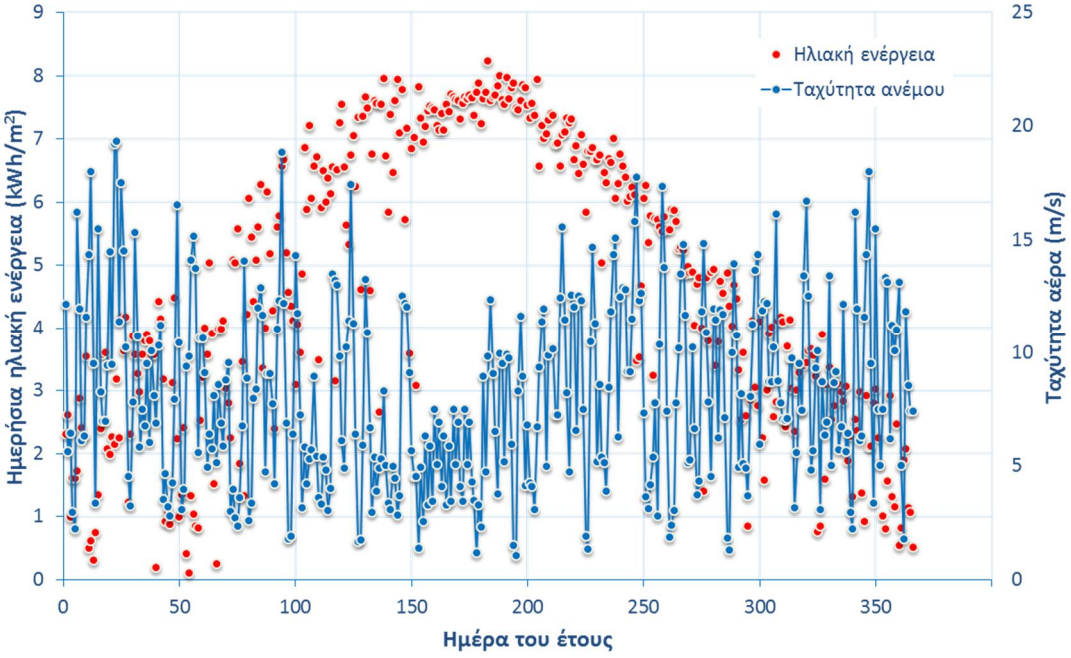
τη σημασία των αυτόνομων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως τη βασικότερη λύση για τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και της κοινωνικο-οικονομικής ανάπτυξης των μικρών απομονωμένων κοινοτήτων, όπως μικρά νησιά και απομακρυσμένα χωριά. Στις απομακρυσμένες περιοχές χωρίς πρόσβαση σε ηλεκτρικό δίκτυο, το ενεργειακό κόστος ξεπερνάει, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, το 20% των συνολικών εξόδων μιας οικογένειας, ένα κόστος το οποίο, πολλές φορές, υπόκειται σε ανεξέλεγκτες διακυμάνσεις, ανάλογα με τις διακυμάνσεις των τιμών του πετρελαίου.

Μετά τη βιομηχανική επανάσταση, όταν ο άνθρωπος επιδόθηκε σε εκτεταμένη χρήση της ενέργειας, οι παγκόσμιες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια άρχισαν να καλύπτονται κυρίως από ορυκτά καύσιμα -άνθρακα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο- λόγω του υψηλού ενεργειακού τους περιεχομένου, της ευκολίας χρήσης αλλά και της φαινομενικής, αρχικά, αφθονίας τους. Αυτές οι ενεργειακές επιλογές είχαν ως αποτέλεσμα, με την εντατικοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, να αμφισβητείται η αφθονία τους πλέον, με εκτιμήσεις να θέτουν το χρονικό ορίζοντα εξάντλησης των αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, εντός του προσδόκιμου ζωής του ανθρώπου (35 και 37 χρόνια αντίστοιχα και 107 χρόνια για το λιγνίτη). Παράλληλα, τις τελευταίες δεκαετίες έχει αποτελέσει συνείδηση τόσο η διαταραχή της θερμοκρασιακής ισορροπίας του πλανήτη, όσο και η αλυσίδα των αρνητικών συνεπειών που την ακολουθεί (μαζικές εξαφανίσεις ζωϊκών ειδών, αύξηση της στάθμης των θαλασσών, μείωση των υδάτινων πόρων, μείωση της αγροτικά αξιοποιήσιμης γης κ.λπ.). Σύμφωνα με ολοένα αυξανόμενες ενδείξεις, φαίνεται ότι υπάρχει άμεση σχέση της κλιματικής αλλαγής με τις εκπομπές μιας συγκεκριμένης ομάδας αερίων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και τη συνεπαγόμενη αθροιστική συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της εξέλιξης του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου. Το 65% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών CO_2 προέρχεται από την παραγωγή ενέργειας, με το αντίστοιχο ποσοστό στις ανεπτυγμένες χώρες να φθάνει το 83%. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας προέρχεται από το πετρέλαιο, τον άνθρακα και το φυσικό αέριο, γίνεται ξεκάθαρο το γεγονός ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι αποτέλεσμα της επικράτησης και διατήρησης ενός ενεργειακού μοντέλου που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ενεργειακή αγορά βρίσκεται σε ένα κρίσιμο ιστορικά σημείο, καθιστώντας αναγκαία τη μεταστροφή του συμβατικού ενεργειακού μοντέλου προς καθαρές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Με τον όρο ΑΠΕ χαρακτηρίζονται οι πηγές ενέργειας οι οποίες, στην πλειοψηφία τους, τροφοδοτούνται συνεχώς με ενέργεια. Σε αυτές ανήκουν: ο ίδιος ο ήλιος (ηλιακή ενέργεια), ο άνεμος (αιολική ενέργεια), οι υδατοπτώσεις (υδροηλεκτρική ενέργεια), η ενέργεια των κυμάτων, ρευμάτων και ωκεανών (κυματική ενέργεια) και η ενέργεια βιομάζας. Στις ΑΠΕ ανήκει επίσης η γεωθερμική ενέργεια, που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και σχετίζεται με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τις ειδικές γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, καθώς επίσης και η παλιρροϊκή ενέργεια που οφείλεται στην βαρυτική έλξη μεταξύ Σελήνης και Γης. Οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από την αφθονία της πρώτης ύλης καθώς δεν έχουν πεπερασμένα αποθέματα, ενώ οι πηγές (ήλιος, άνεμος κ.λπ.) είναι άμεσα διαθέσιμες σχεδόν σε όλες τις περιοχές του πλανήτη, οπότε η απειλή της εξάντλησης και η περιορισμένη προσφορά, που κλιμακώνουν τις τιμές των ορυκτών καυσίμων και αποσταθεροποιούν την παγκόσμια οικονομία, δεν υφίστανται στην περίπτωσή τους. Παράλληλα, με εξαίρεση κάποιες χρήσεις της βιομάζας, οι ΑΠΕ έχουν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κι έτσι οι περιβαλλοντικές πολιτικές που ακολουθούνται, όπως το πρωτόκολλο του Κιότο, δίδουν θετική ώθηση προς την επέκταση της αξιοποίησής τους. Με τα πλεονεκτήματα αυτά, οι ΑΠΕ γνωρίζουν ταχεία ανάπτυξη, κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με μέση ετήσια αύξηση 3% η οποία ξεπερνάει την αύξηση του φυσικού αερίου (2,6%), της πυρηνικής ενέργειας (2,4%) αλλά και του άνθρακα (1,9%),

καθώς υποστηρίζονται από κυβερνητικές πολιτικές και επενδυτικά κίνητρα. Συγκεκριμένα, η αιολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 25,8% και η ηλιακή κατά 86,3% τα έτη 2010-2011, ενώ την περίοδο 2000-2010 η αγορά φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων ήταν η ταχύτερα επεκτεινόμενη αγορά ηλεκτροπαραγωγού τεχνολογίας παγκοσμίως, με εγκατεστημένη ισχύ 40 GW στο τέλος του 2010, από 1,5 GW που ήταν το 2000.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ εξαρτάται από μια σειρά κλιματολογικών, γεωλογικών και εν γένει φυσικών παραγόντων που ο άνθρωπος δεν μπορεί να ελέγξει στο βαθμό που τον ικανοποιεί (ταχύτητα ανέμου, παροχή ποταμού, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας κ.λπ.). Το μειονέκτημα αυτό παρουσιάζεται έντονα σε μικρά ηλεκτρικά δίκτυα ή αυτόνομους καταναλωτές, όπου η διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να προβλεφθεί σε ικανοποιητικό μελλοντικό χρονικό ορίζοντα, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται αδιάλειπτη ηλεκτροδότηση. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι ο περιορισμός της συμμετοχής των ΑΠΕ στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, καθώς, σε περίπτωση απότομης διακοπής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και τη διατήρηση συνεχούς παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προς το ηλεκτρικό δίκτυο, απαιτείται η διατήρηση συμβατικών συστημάτων παραγωγής σε εφεδρεία, με συνέπεια τη διατήρηση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής σε υψηλά επίπεδα. Μια από τις βασικότερες λύσεις για την αντιμετώπιση της διαλειπτόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο συνδυασμός περισσότερων της μιας τεχνολογιών ΑΠΕ (π.χ. ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά) ή ο συνδυασμός μονάδων ΑΠΕ με συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας, με στόχο την άρση των περιορισμών που διέπουν τη λειτουργία της κάθε μιας μονάδας χωριστά, όπου η μία πηγή ενέργειας συμπληρώνει την έλλειψη διαθεσιμότητας της άλλης (Σχήμα 6.1).



Σχήμα** 6.1: **Ημερήσια ηλιακή ενέργεια και μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου στην Κρήτη (Kaldellis et al. 2009)

Τα υβριδικά συστήματα ενέργειας αποτελούν συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν πολλαπλές διατάξεις ενεργειακής μετατροπής ή περισσότερες της μιας πηγές ενέργειας, προκειμένου να καλύψουν τις απαιτήσεις του καταναλωτή σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο όρος «υβριδικά συστήματα ενέργειας», θα μπορούσε να αφορά ακόμη και συνδυασμό αποκλειστικά συμβατικών μονάδων η-

λεκτροπαραγωγής, οι οποίες χρησιμοποιούν δύο διαφορετικά καύσιμα ως πηγή ενέργειας. Εν τούτοις καθιερώθηκε για συστήματα ηλεκτροπαραγωγής στα οποία περιλαμβάνεται μία, τουλάχιστον, μορφή ΑΠΕ. Το έτος 2006, στο Νόμο 3468, αναφέρεται για πρώτη φορά η έννοια του υβριδικού σταθμού, ορίζοντας ότι ως ένας υβριδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι εκείνος που χρησιμοποιεί μία τουλάχιστον μορφή ΑΠΕ, καθορίζοντας παράλληλα την ελάχιστη ενέργεια, που θα πρέπει να παράγεται σε ετήσια βάση από ΑΠΕ για να διατηρεί ο σταθμός το χαρακτηρισμό αυτό. Οι πιο διαδομένοι συνδυασμοί μονάδων ΑΠΕ σε υβριδικά συστήματα είναι αυτοί των ανεμογεννητριών-φωτοβολταϊκών πλαισίων και των ανεμογεννητριών-μονάδας υδροστροβίλου.

Τα υβριδικά συστήματα βρίσκουν ευρεία εφαρμογή, τόσο σε κεντρικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας για την ενίσχυση της διεσπαρμένης παραγωγής, όσο και σε αυτόνομα ηλεκτρικά δίκτυα. Ειδικότερα, τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδότηση απομονωμένων ή νησιωτικών περιοχών που δεν είναι διασυνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτούνται διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας καθώς επίσης και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης του φορτίου. Παρόμοιες απαιτήσεις έχουν και τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων (π.χ. μιας κατοικίας), ή φορτίων ειδικού σκοπού, όπως για παράδειγμα οι ηλεκτρικοί φάροι, ο φωτισμός σήμανσης των αυτοκινητοδρόμων, η άντληση νερού, τα συστήματα αφαλάτωσης κ.ά.

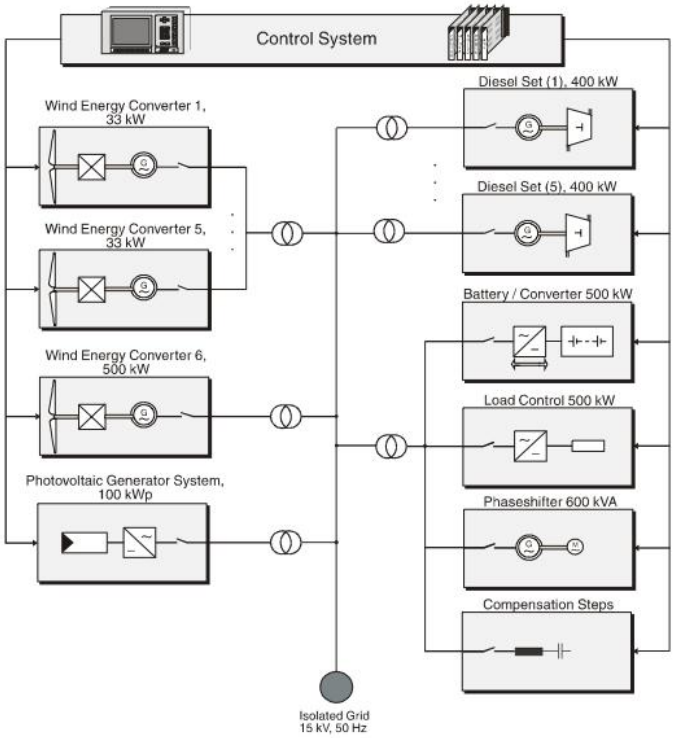
Τα υβριδικά συστήματα ΑΠΕ έχουν ευρεία εφαρμογή στη δημιουργία αυτόνομων ηλεκτρικών δικτύων, τα οποία καλύπτουν έως και το 100% της ενεργειακής ζήτησης από ΑΠΕ. Ανάλογα δίκτυα έχουν εγκατασταθεί σε πολλές περιοχές του πλανήτη, ενώ βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε μη διασυνδεδεμένα νησιωτικά ηλεκτρικά δίκτυα. Σύμφωνα με την εργασία των Neves et al. (2014), στην οποία αναφέρονται εφαρμογές αυτόνομων υβριδικών συστημάτων από τη διεθνή βιβλιογραφία, προκύπτει ότι τα υβριδικά συστήματα, που βασίζονται στο συνδυασμό ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών πλαισίων, έχουν ευρεία εφαρμογή κυρίως σε απομακρυσμένες περιοχές έως και 3.000 κατοίκων.

Στη χώρα μας, η οποία περιλαμβάνει 6.000 νησιά και νησίδες διάσπαρτα στα πελάγη του Αιγαίου και του Ιονίου, εκ των οποίων τα 227 είναι κατοικημένα, τα υβριδικά συστήματα αποτελούσαν και αποτελούν ελκυστική λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των νησιών. Ιδιαίτερα, στην περιοχή του Αιγαίου, πολλά από τα νησιά διαθέτουν υψηλό αιολικό δυναμικό, με μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου να φτάνει μέχρι και τα 11 m/s (Kaldellis & Kavadias 2001). Παράλληλα, το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας χαρακτηρίζεται από υψηλές ετήσιες τιμές που κυμαίνονται από 1.400 έως και 1.800 kWh/m^2 (Kavadias et al. 2011). Ο συνδυασμός υψηλού ηλιακού δυναμικού και αξιόλογου αιολικού δυναμικού, καθιστά τα υβριδικά συστήματα ΑΠΕ μια από τις βέλτιστες λύσεις κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των μη διασυνδεδεμένων στο ηπειρωτικό ηλεκτρικό δίκτυο νησιών του Αιγαίου.

Το ενδιαφέρον ανάπτυξης υβριδικών συστημάτων στη χώρα μας ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του ’80, αμέσως μετά την εγκατάσταση του πρώτου αιολικού πάρκου από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), στο νησί της Κύθνου. Η εκτενής αναφορά στη συγκεκριμένη μονάδα χρήζει ιδιαίτερου ενδιαφέροντος καθώς αποτελεί, αφενός το πρώτο υβριδικό σύστημα σε αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο νησιού, το οποίο συνδύαζε αιολική και ηλιακή ενέργεια, αφετέρου η εμπειρία και το ευρωπαϊκό ενδιαφέρον κατά τη λειτουργία του αποτέλεσαν τη βάση για την κατανόηση της λειτουργίας και των πλεονεκτημάτων των υβριδικών συστημάτων.

Τον Απρίλιο του 1982 τέθηκε σε λειτουργία στο ίδιο νησί το πρώτο αιολικό πάρκο (100 kW) στην Ευρώπη το οποίο, μαζί με τον αυτόνομο σταθμό παραγωγής που χρησιμοποιούσε πετρέλαιο για τη λειτουργία του, κάλυπτε τις ηλεκτρικές ανάγκες των περίπου 2.000 κατοίκων του. Εκείνη την περίοδο οι ηλεκτρικές ανάγκες του νησιού κυμαίνονταν από 50 έως 500 kW (Kaldellis et al.

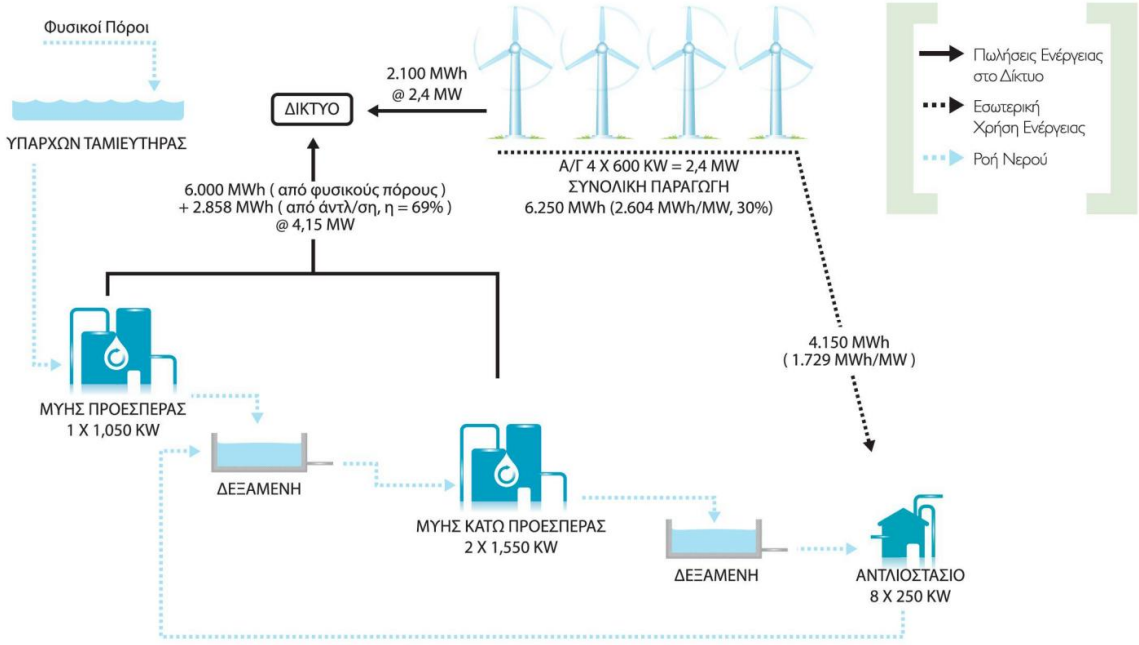
1999). Το αιολικό πάρκο αποτελείτο από 5 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 20 kW η κάθε μια, ενώ, ένα χρόνο μετά, τον Ιούλιο του 1983, τέθηκε σε λειτουργία στο νησί φωτοβολταϊκό πάρκο ονομαστικής ισχύος 100 kW, το οποίο απέδιδε την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο μέσω συστοιχίας μπαταριών. Οι μονάδες ΑΠΕ, σε συνδυασμό με τον αυτόνομο σταθμό παραγωγής του νησιού, δημιούργησαν το μεγαλύτερο (σε ισχύ) παγκοσμίως υβριδικό ηλεκτρικό δίκτυο. Σκοπός του υβριδικού συστήματος ήταν ο προσδιορισμός των απαραίτητων ενεργειών που θα έπρεπε να γίνονται κατά τη λειτουργία του, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η διείσδυση των ΑΠΕ, διατηρώντας την ευστάθεια του δικτύου, ακόμη και σε μικρά ηλεκτρικά δίκτυα, όπως αυτό της Κύθνου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν ανεμογεννήτριες ελέγχου βήματος[7], οι οποίες έδιδαν δυνατότητα ελέγχου και ρύθμισης της παραγόμενης ενέργειας. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή και για την αποφυγή διαταραχών στην τάση και τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου του νησιού, πολλές φορές το αιολικό πάρκο έπρεπε να διακόπτει τη λειτουργία του (Kaldellis et al. 2002). Οι δύο μονάδες ΑΠΕ συμμετείχαν στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του νησιού μέχρι 10% ετησίως. Για την αντιμετώπιση των τεχνικών περιορισμών περεταίρω διείσδυσης των ΑΠΕ, αλλά και για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων ηλεκτρικών αναγκών του νησιού, με χρηματοδότηση από το Γερμανικό Υπουργείο Οικονομικών και Τεχνολογίας καθώς και την Ευρωπαϊκή Ένωση, ενισχύθηκαν οι μονάδες ΑΠΕ˙ έτσι, το Νοέμβριο του 1999 αυξήθηκε η εγκατεστημένη αιολική ισχύς του νησιού στα 165 kW με αντικατάσταση των παλιών ανεμογεννητριών από 5 νέες των 33 kW η κάθε μία, ενώ παράλληλα το φωτοβολταϊκό πάρκο συνδέθηκε, μέσω κατάλληλου μετατροπέα, απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού.



Σχήμα** 6.2: **Σχηματική διάταξη του υβριδικού συστήματος της Κύθνου (Strauss et al. 2001)

[7] Οι ανεμογεννήτριες ελέγχου βήματος (pitch control) ελέγχουν την παραγωγή τους μεταβάλλοντας τον αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης της πτερωτής περιστρέφοντας κατάλληλα τα πτερύγιά τους.

Στα μέσα της δεκαετίας του ’90 η ΔΕΗ, σε συνεργασία με ιδιωτική γερμανική εταιρία και χρηματοδότηση από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Thermie, αναβάθμισε το σύστημα, δημιουργώντας στο νησί ένα ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο μπορούσε να αντιμετωπίσει τις διακυμάνσεις της παραγωγής των ΑΠΕ χωρίς να είναι απαραίτητη η λειτουργία του πετρελαϊκού σταθμού παραγωγής (Σχήμα 6.2). Το νέο ηλεκτρικό δίκτυο τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούνιο του 2000, έχοντας συμπληρωθεί με νέα συστοιχία μπαταριών χωρητικότητας 400 kWh και μία ανεμογεννήτρια των 500 kW, δημιουργώντας το πρώτο ολοκληρωμένο υβριδικό σύστημα στην Ελλάδα (Strauss et al. 2001). Με τη δημιουργία του νέου υβριδικού συστήματος κατέστη δυνατή, για πρώτη φορά, η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρικό δίκτυο τις ώρες εκτός αιχμής αποκλειστικά από ΑΠΕ. Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του νησιού αυξήθηκε σημαντικά, επιτυγχάνοντας μέση μηνιαία διείσδυση των ΑΠΕ μέχρι και 33% (Betzios 2001), ενώ σε ώρες εκτός αιχμής η διείσδυση των ΑΠΕ έφθανε κατά μέσο όρο πάνω από 50%.



***Σχήμα** 6.3: **Διάγραμμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος Ικαρίας (ΔΕΗ Ανανεώσιμες** 2015)*

Η Ικαρία αποτελεί επίσης ένα από τα ελληνικά νησιά τα οποία έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για τη δημιουργία υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Kaldellis & Kavadias 2001; Betzios 2001). Η Ικαρία παρουσιάζει υψηλό αιολικό δυναμικό, ενώ από τα μέσα της δεκαετίας του ’90 έχει κατασκευασθεί στο νησί ταμιευτήρας νερού χωρητικότητας ενός εκατομμυρίου m^3 σε υψόμετρο 720 m. Το υβριδικό σύστημα, που προτείνεται από τους ερευνητές για την Ικαρία, αποτελείται από τον πετρελαϊκό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής του νησιού, ένα αιολικό πάρκο, δύο υδροηλεκτρικές μονάδες και ένα αντλιοστάσιο (Σχήμα 6.3). Το αιολικό πάρκο, ονομαστικής ισχύος 2,4 MW, παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού, ενώ όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, η ενέργεια του αιολικού πάρκου διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο για τη μεταφορά τού νερού σε δεξαμενή τοποθετημένη σε μεγαλύτερο ύψος, αποθηκεύοντάς την σε μορφή δυναμικής ενέργειας. Τις ώρες αυξημένης ζήτησης τίθενται σε λειτουργία οι υδροστρόβιλοι των δύο μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών (ΜΥΗΣ), ο πρώτος (1,05 MW) αξιοποιώντας τις υπερχειλίσεις του υπάρχοντος ταμιευτήρα και ο δεύτερος (3,1 MW) αποδίδοντας την αποθηκευμένη αιολική ενέργεια στο ηλεκτρικό

δίκτυο. Σύμφωνα με το σχεδιασμό των μελετητών του έργου, το υβριδικό αυτό σύστημα αναμένεται να συνεισφέρει με 10,96 GWh στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο εκ των οποίων το 19% θα προέρχεται άμεσα από το αιολικό πάρκο, το 26% έμμεσα μέσω της αντλησιοταμίευσης[8] και το 55% άμεσα από την υδροηλεκτρική μονάδα αξιοποιώντας τον υπάρχοντα ταμιευτήρα του νησιού. Ο συνδυασμός αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση αποτελεί μια από τις βέλτιστες λύσεις για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από ΑΠΕ σε αυτόνομα νησιά μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους, μεγιστοποιώντας τη συμμετοχή των ΑΠΕ. Το υβριδικό σύστημα της Ικαρίας αναμένεται να καλύπτει άνω του 30% των ετήσιων ενεργειακών αναγκών των κατοίκων του νησιού.

Ανάλογες μελέτες ή επενδυτικό ενδιαφέρον έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια για την Κάρπαθο, τη Σέριφο, την Ίο, τη Σίκινο, τη Λέσβο, την Κρήτη, τη Ρόδο και αλλού (Katsaprakakis et al. 2012). Απώτερος στόχος είναι σε βάθος χρόνου, με την καλύτερη γνώση, πρακτική εμπειρία και ένταξη αυτών των συστημάτων, οι ενεργειακές ανάγκες των νησιών να καλύπτονται πλήρως από την παραγωγή ενέργειας των υβριδικών συστημάτων, θέτοντας σε ψυχρή εφεδρεία τις συμβατικές πετρελαϊκές μονάδες.

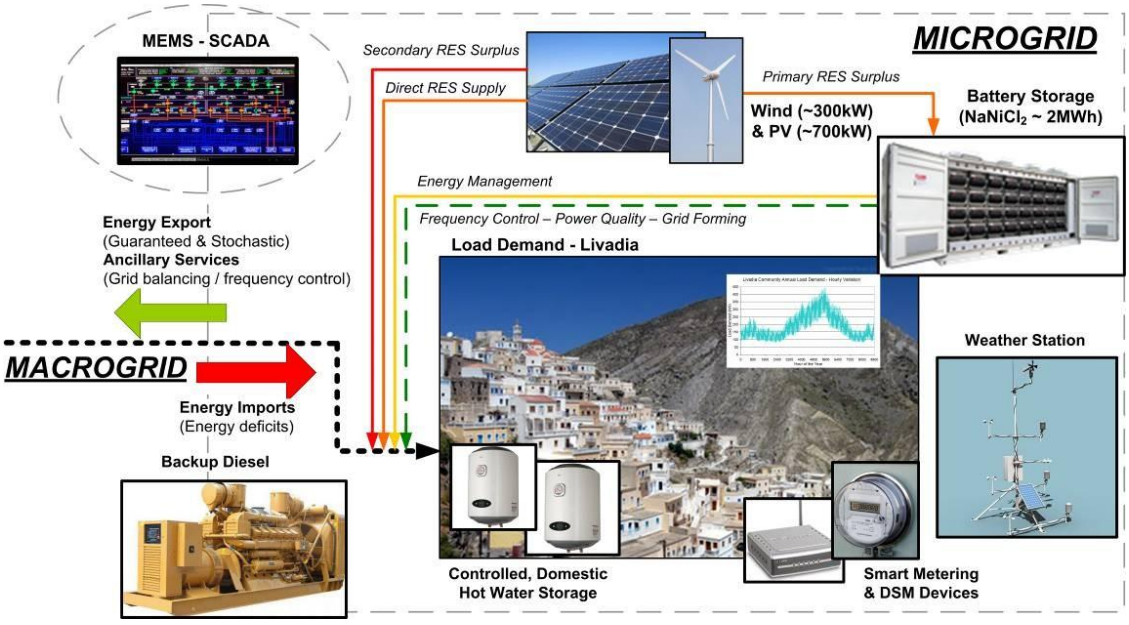
Ένα ακόμη πιο φιλόδοξο σχέδιο για την Ελλάδα, αποτελεί η μετατροπή του Άγιου Ευστράτιου (Αη Στράτης) σε "πράσινο νησί". Ο Άγιος Ευστράτιος είναι ένα μικρό νησί του βορειοανατολικού Αιγαίου με 270 κατοίκους και ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 1100 MWh. Σκοπός του σχεδίου είναι το σύνολο των ενεργειακών του αναγκών να καλύπτονται αποκλειστικά από ΑΠΕ, καθώς, ακόμη και τα αυτοκίνητα θα κινούνται με υδρογόνο και ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά. Το υβριδικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής του νησιού θα αποτελείται από τον ήδη εγκατεστημένο θερμικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής, δύο ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 500-800 kW και φωτοβολταϊκό πάρκο ονομαστικής ισχύος 100-250 kW (Σχήμα 6.4).

***Σχήμα** 6.4: **Συνολική εικόνα του έργου μετατροπής τού Αη Στράτη σε «πράσινο νησί»** (Green Agenda 2011)*

[8] Η αντλησιοταμίευση αφορά την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή δυναμικής ενέργειας, με αντλίες οι οποίες μεταφέρουν νερό σε ταμιευτήρα μεγαλύτερου υψομέτρου.

Οι δύο αυτές μονάδες ΑΠΕ θα συνδυασθούν με μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (συστοιχία συσσωρευτών) και μία μονάδα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου, συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 4-6 MWh. Στην πρώτη φάση υλοποίησης του έργου, αναμένεται η διείσδυση των ΑΠΕ να φθάσει το 80% και με την ολοκλήρωσή του στο 100%.

Τέλος, ένα από τα μεγαλύτερα έργα στον τομέα των υβριδικών συστημάτων που βρίσκεται σε εξέλιξη αυτή την περίοδο στη χώρα μας, αποτελεί το ευρωπαϊκό έργο "Technology Innovation for the Local scale, Optimum integration of battery energy Storage (TILOS)" και αφορά στη μερική ενεργειακή αυτονόμηση του νησιού της Τήλου. Η Τήλος είναι ένα μικρό νησί των Δωδεκανήσων, βορειοδυτικά της Ρόδου. Ηλεκτροδοτείται με υποβρύχιο καλώδιο από τον αυτόνομο πετρελαϊκό σταθμό παραγωγής της Κω, μέσω της Νισύρου. Το έργο εκτελείται από κοινοπραξία 15 ευρωπαϊκών ερευνητικών ιδρυμάτων, φορέων και εταιρειών από 7 διαφορετικές ευρωπαϊκές χώρες (Ελλάδα, Γερμανία, Γαλλία, Αγγλία, Ιταλία, Ισπανία, Σουηδία), με συντονιστή το Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος του ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ., στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος HORIZON 2020 και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2018. Σκοπός του έργου είναι η δημιουργία ενός μικροδικτύου ηλεκτροδότησης, που θα καλύπτει πλήρως τις ηλεκτρικές ανάγκες μέρους του νησιού (περίπου 500 κατοίκων), επιτυγχάνοντας αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ μέσω σύγχρονων συστημάτων αποθήκευσης. Το υβριδικό σύστημα του νησιού θα περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια 300 kW, ένα φωτοβολταϊκό πάρκο ονομαστικής ισχύος 700 kW σε συνδυασμό με σύστημα αποθήκευσης συσσωρευτών τεχνολογίας χλωριούχου νατρίου-νικελίου ($Na\text{-}NiCl_2$) συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 2 MWh (Σχήμα 6.5). Με την ολοκλήρωση του έργου αναμένεται η διείσδυση των ΑΠΕ να φθάσει έως και το 100%, όσον αφορά στο μικροδίκτυο και άνω του 60% για το σύνολο της νήσου Τήλου.



***Σχήμα** 6.5: **Σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος της Τήλου** (**Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος** 2015)*

Στη διεθνή βιβλιογραφία εξετάζεται πληθώρα παραδειγμάτων υβριδικών συστημάτων για τη δημιουργία πράσινων νησιών, με πρωτοπόρο το νησί Samso της Δανίας (Jørgensen et al. 2007) και το νησί Pellworm στη Γερμανία (Kruse et al. 1991), τα οποία καλύπτουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ˙ επίσης τα νησιά Utsira στη Νορβηγία (Ulleberg et al. 2010) και Reunion στον Ινδικό ωκεανό (υπερπόντια περιοχή της Γαλλίας) (Selosse et al. 2014). Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται τα έργα που έχουν υλοποιηθεί ή βρίσκονται σε εξέλιξη και αφορούν νησιά που επιδιώκουν

αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ με τη χρήση υβριδικών συστημάτων, όπως καταγράφονται στην ιστοσελίδα της Global 100% RE (100%RE 2015).

***Σχήμα** 6.6: **Εγκαταστάσεις υβριδικών συστημάτων όπως έχουν καταχωρηθεί στον ιστότοπο** go100re.net* (100%RE 2015)

6.2 Αρχή λειτουργίας υβριδικών συστημάτων

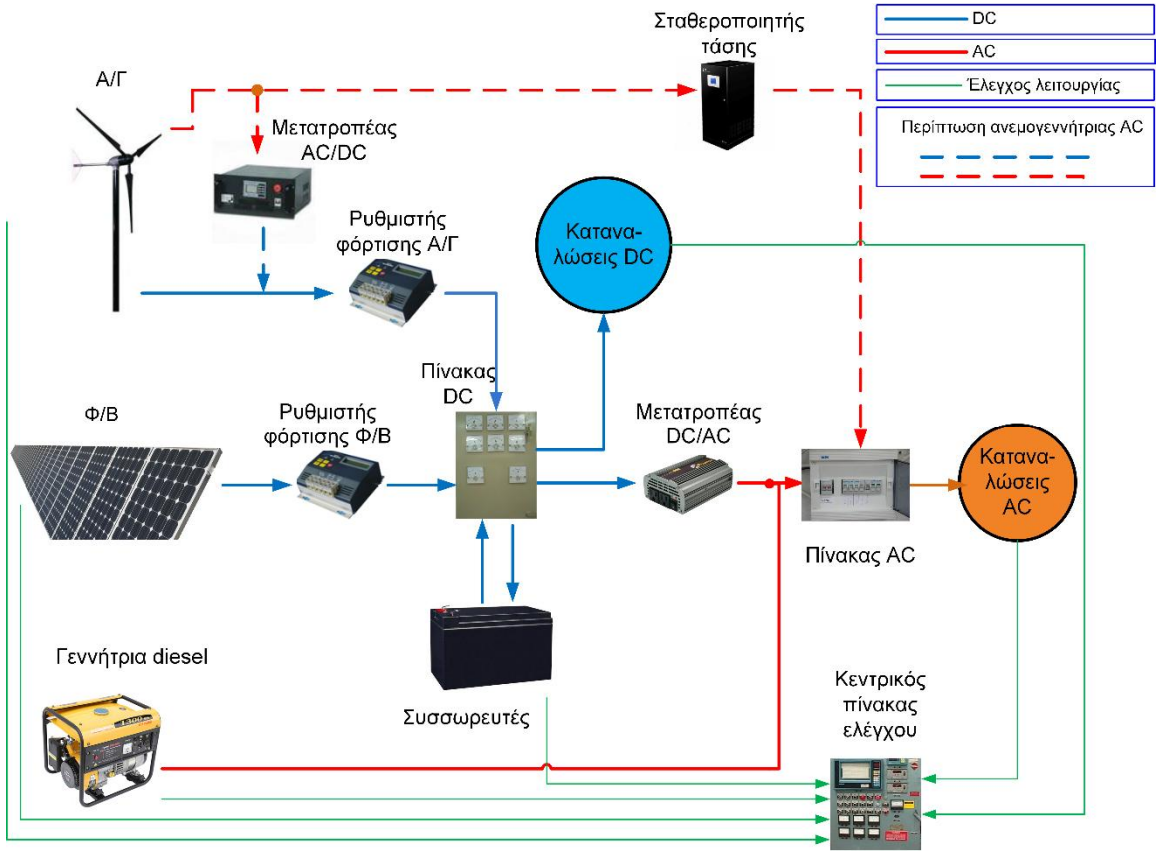
Τα βασικά συστατικά ενός τυπικού ενεργειακού υβριδικού συστήματος περιλαμβάνουν τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τη μονάδα αποθήκευσής της, τα συστήματα μετατροπής και ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας προκειμένου να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του καταναλωτή και τα συστήματα διαχείρισης της λειτουργίας της υβριδικής εγκατάστασης. Ειδικότερα, στα μικρής κλίμακας υβριδικά συστήματα (τα οποία εξετάζονται στην παρούσα διατριβή) οι μονάδες παραγωγής χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (1) τις μονάδες μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι Α/Γ και τα Φ/Β πλαίσια και (2) τις μονάδες ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που συμπεριλαμβάνουν συνήθως τις γεννήτριες diesel[9], τις κυψέλες καυσίμου[10] (Fuell Cells) και τους υδροστροβίλους. Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας ενός υβριδικού συστήματος χρησιμοποιείται για την προσωρινή αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες ΑΠΕ, όταν δεν υπάρχει επαρκής ζήτηση για να την απορροφήσει. Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι τα υβριδικά συστήματα χωρίς σύστημα αποθήκευσης δεν μπορούν να εξασφαλίσουν συμμετοχή των ΑΠΕ στην κάλυψη των ηλεκτρικών καταναλώσεων μεγαλύτερη του 25% (Neves et al. 2014). Οι μονάδες αυτές μπορούν να

[9] Γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν σε ζεύγος με κινητήρα ο οποίος χρησιμοποιεί πετρέλαιο.

[10] Αποτελούν ηλεκτροχημικές συσκευές οι οποίες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου (στην πλειοψηφία τους υδρογόνο) σε ηλεκτρική.

αποτελούνται από ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες μολύβδου-οξέως, νικελίου-καδμίου, νατρίου-θείου, μπαταρίες ροής), σφόνδυλο[11] (flywheel), υπερπυκνωτές, μονάδα ηλεκτρόλυσης[12] ή μονάδα αντλησιοταμίευσης (Kaldellis et al. 2009).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή επιλέχθηκε προς διερεύνηση ο συνδυασμός Φ/Β πλαισίων, Α/Γ και ηλεκτρικών συσσωρευτών καθώς, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, αποτελεί τον πλέον αξιόπιστο τρόπο κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών σε απομονωμένους από ηλεκτρικά δίκτυα καταναλωτές. Από την καταγραφή των εν λειτουργία υβριδικών συστημάτων από τους (Neves et al. 2014) προέκυψε ότι στην πλειοψηφία των μικρών νησιών χρησιμοποιείται ο συνδυασμός Α/Γ, Φ/Β πλαισίων, συσσωρευτών και γεννητριών diesel, ενώ στην περίπτωση των απομακρυσμένων ηπειρωτικών περιοχών επικρατεί ο συνδυασμός Φ/Β, γεννητριών diesel και συσσωρευτών, λόγω χαμηλότερων ταχυτήτων ανέμου.



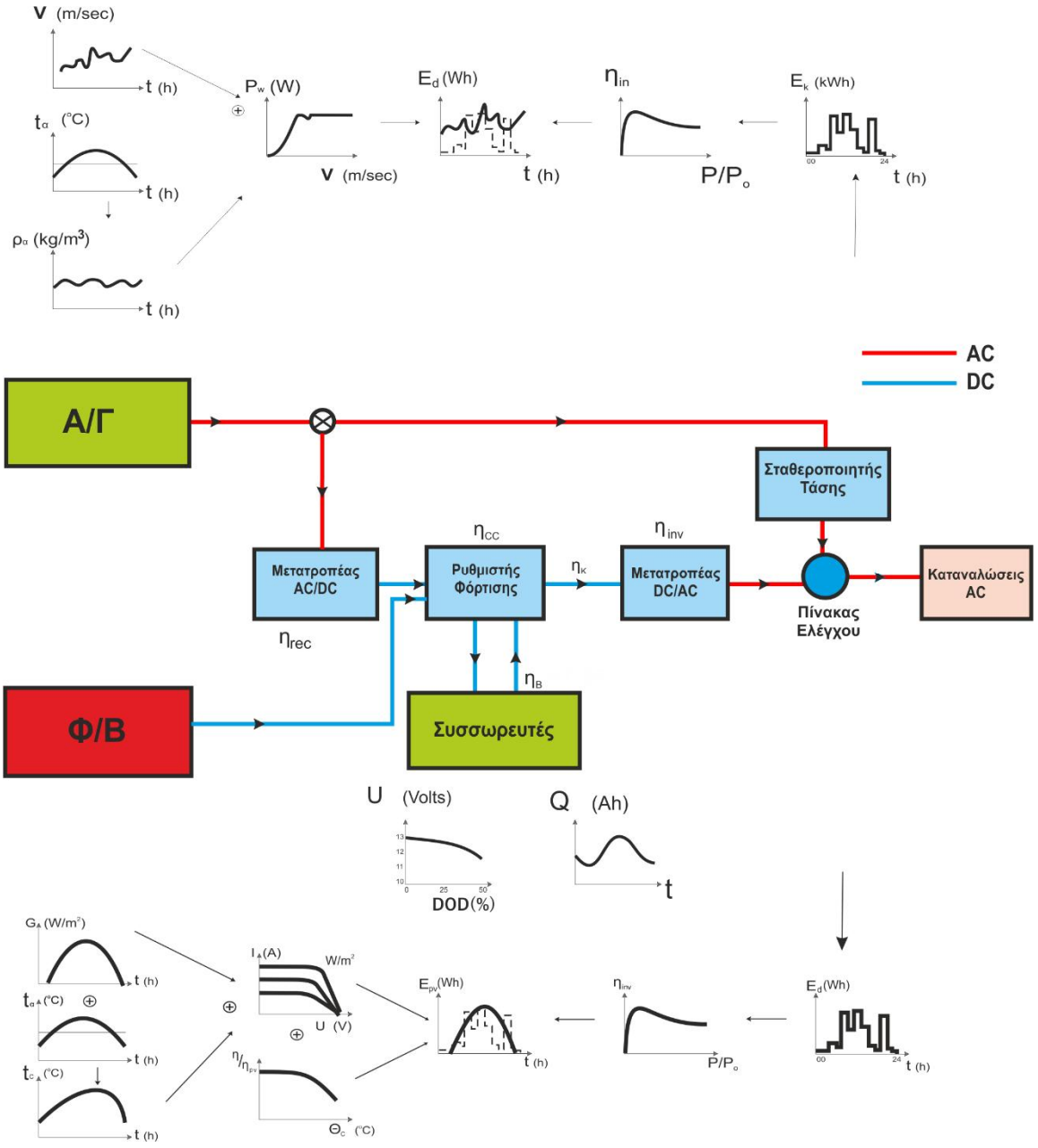
Σχήμα** 6.7: **Τυπική διάταξη υβριδικού συστήματος

Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η τυπική διάταξη ενός ολοκληρωμένου υβριδικού συστήματος ΑΠΕ, το οποίο αποτελείται από Α/Γ, Φ/Β σταθμό, εφεδρική γεννήτρια diesel -για την κάλυψη των ηλεκτρικών καταναλώσεων όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια από τις ΑΠΕ- συσσωρευτές, για την αποθήκευση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από τις ΑΠΕ, καθώς επίσης και βοηθητικό ηλεκτρολογικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό για τη ρύθμιση της ποιότητας της παραγόμενης ενέργειας και τον έλεγχο λειτουργίας του σταθμού. Για να επιτευχθούν αυτά, ο σταθμός περιλαμβάνει

[11] Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύεται σε μορφή κινητικής ενέργειας. Στηρίζονται στην περιστροφική κίνηση μιας μάζας η οποία αποθηκεύει και αποδίδει ενέργεια ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής.

[12] Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύεται σε μορφή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης.

τους ρυθμιστές φόρτισης των συσσωρευτών, τους μετατροπείς του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε συνεχές (DC) και αντίστροφα (όπου αυτό απαιτείται) και τους ηλεκτρικούς πίνακες, που συνδέουν τη μονάδα παραγωγής με τις ηλεκτρικές καταναλώσεις (Kavadias 2012).



Σχήμα** 6.8: **Διάγραμμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος ΑΠΕ, αποτελούμενο από Α/Γ εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), Φ/Β μονάδα και συσσωρευτές καθώς και κατάλληλο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό για τη διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα διαγράμματα απεικονίζουν τις καμπύλες λειτουργίας των επιμέρους συνιστωσών της εγκατάστασης, βάσει των οποίων πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση του συστήματος. Οι γραμμές με κυανό χρώμα απεικονίζουν τα τμήματα της εγκατάστασης που διαρρέονται από συνεχές ρεύμα και με ερυθρό χρώμα τα τμήματα που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Κατά τη λειτουργία ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος, το οποίο αποτελείται αποκλειστικά από μονάδες ΑΠΕ, το σύστημα ελέγχου καλείται να ρυθμίσει τη ροή ενέργειας (Σχήμα 6.8)

ανάλογα με την παραγωγή της Α/Γ και των Φ/Β πλαισίων σε συνδυασμό με την αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές και τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τον καταναλωτή. Ειδικότερα, οι καταστάσεις λειτουργίας ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος περιλαμβάνουν τις εξής περιπτώσεις:

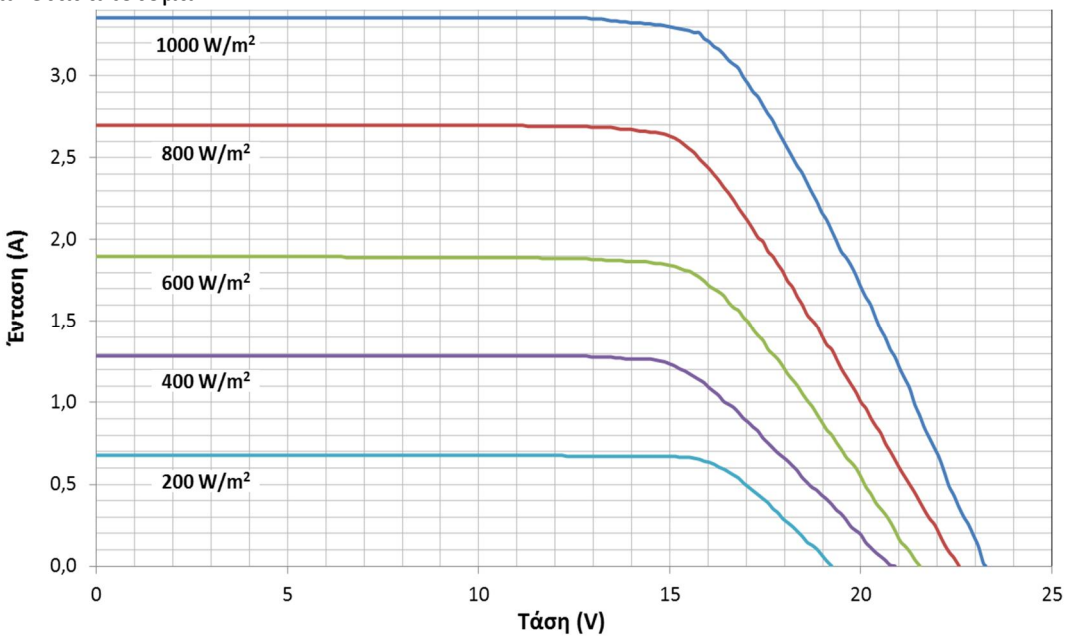
1. Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τον καταναλωτή, P_d, είναι μικρότερη από την παραγωγή της Α/Γ, P_w. Στην περίπτωση αυτή, η περίσσεια ενέργειας από την Α/Γ ($\Delta P = P_w - P_d$) οδηγείται μέσω του μετατροπέα AC/DC και του ρυθμιστή φόρτισης στους συσσωρευτές. Παράλληλα, η παραγόμενη ενέργεια από τα Φ/Β πλαίσια, P_{PV}, οδηγείται και αυτή μέσω του ρυθμιστή φόρτισης προς τους συσσωρευτές. Στην περίπτωση όπου οι συσσωρευτές είναι γεμάτοι ($Q = Q_{max}$), τότε η περίσσεια ενέργειας οδηγείται σε καταναλώσεις χαμηλότερης προτεραιότητας (π.χ. άντληση νερού, αφαλάτωση κ.λπ.).
2. Η ζήτηση ενέργειας από τον καταναλωτή είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη ενέργεια της Α/Γ ($P_w < P_d$), οπότε το έλλειμα ενέργειας καλύπτεται από την παραγωγή των Φ/Β πλαισίων ($P_w + P_{PV} > P_d$). Στην περίπτωση αυτή, η πρόσθετη ενέργεια, που απαιτείται από τα Φ/Β πλαίσια, οδηγείται μέσω του μετατροπέα DC/AC στις καταναλώσεις. Τυχούσα περίσσεια ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια αποθηκεύεται στους συσσωρευτές μέσω του ρυθμιστή φόρτισης. Εάν οι συσσωρευτές είναι γεμάτοι ($Q = Q_{max}$), τότε πάλι η περίσσεια ενέργειας οδηγείται σε καταναλώσεις χαμηλότερης προτεραιότητας.
3. Η ζήτηση ενέργειας είναι μεγαλύτερη από το σύνολο της παραγωγής Α/Γ και Φ/Β πλαισίων ($P_w + P_{PV} < P_d$). Τότε το έλλειμα ηλεκτρικής ενέργειας ($\Delta P = P_d - (P_w + P_{PV})$) καλύπτεται από τους συσσωρευτές, μέσω του ρυθμιστή φόρτισης και του μετατροπέα DC/AC, υπό την προϋπόθεση ότι η στάθμη ενέργειας των συσσωρευτών δεν μειώνεται πέρα του ελάχιστου επιτρεπόμενου ορίου ($Q > Q_{min}$).
4. Δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας από την Α/Γ και τα Φ/Β πλαίσια (π.χ. χαμηλή ταχύτητα ανέμου και έλλειψη ηλιοφάνειας), δηλαδή $P_w + P_{PV} = 0$. Στην περίπτωση αυτή οι ενεργειακές απαιτήσεις του καταναλωτή καλύπτονται από τους συσσωρευτές μέσω του ρυθμιστή φόρτισης και του μετατροπέα DC/AC, υπό την προϋπόθεση ότι η στάθμη ενέργειας των συσσωρευτών δεν μειώνεται πέρα του ελάχιστου επιτρεπόμενου ορίου ($Q > Q_{min}$).
5. Στις περιπτώσεις (3) και (4), εάν η αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές δεν επαρκεί για την κάλυψη του καταναλωτή, τότε το σύστημα ελέγχου της εγκατάστασης θέτει σε λειτουργία σχέδιο διαχείρισης των φορτίων, προκειμένου να μειωθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις, καθώς σε διαφορετική περίπτωση δεν καλύπτεται η ζήτηση (απόρριψη φορτίου). Προκειμένου να αποφευχθεί η μη ικανοποίηση της ζήτησης και να αυξηθεί η ενεργειακή ασφάλεια του συστήματος, μπορεί να προστεθεί μία εφεδρική γεννήτρια diesel, η οποία τίθεται σε λειτουργία μόνο σε επείγουσες περιπτώσεις.

6.3 Ενεργειακή ανάλυση

Η προσομοίωση των υβριδικών συστημάτων βασίζεται στα χαρακτηριστικά λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων που το αποτελούν. Για την αναλυτική προσομοίωση του υβριδικού συστήματος αναπτύχθηκε αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει, για κάθε δεδομένο χρονικό βήμα, τη ροή ενέργειας σε όλα τα επιμέρους τμήματα του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις λειτουργικές τους παραμέτρους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι λειτουργίας και οι σχέσεις στις οποίες βασίζεται ο υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής και της διαχείρισης ενέργειας από τα τμήματα του υβριδικού συστήματος.

6.3.1 Φωτοβολταϊκή μονάδα

Η λειτουργία των Φ/Β συστημάτων βασίζεται σε μία από τις πλέον γνωστές τεχνολογίες άμεσης μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια που στηρίζεται στο Φ/Β φαινόμενο. Το Φ/Β στοιχείο, το οποίο αποτελεί το κύτταρο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι, γενικά, ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν δέχεται φως εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα, ένα τυπικό Φ/Β στοιχείο αποτελείται από δύο ημιαγώγιμα στρώματα, από το ίδιο κύριο υλικό, σε επαφή. Με την τοποθέτηση κατάλληλων ηλεκτροδίων στην εξωτερική επιφάνεια των δύο ημιαγωγών, δημιουργείται το ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλεκτρική τάση ενός Φ/Β στοιχείου βρίσκεται στην περιοχή 0,5 έως 0,7 V και το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των 10 έως 40 mA/cm^2 όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έντασης 1000 W/m^2. Τα Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα κατάλληλα σε σειρά και σε παράλληλη συνδεσμολογία αποτελούν το Φ/Β πλαίσιο. Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραγόμενης έντασης και της τάσης ενός Φ/Β πλαισίου όταν αυτό δέχεται διαφορετικές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Συνδέοντας το Φ/Β πλαίσιο σε κύκλωμα που παρεμβάλλεται ωμική αντίσταση, παρατηρείται μεταβολή της τάσης συναρτήσει της τιμής της αντίστασης από το μηδέν έως την τιμή της τάσης όπου η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται (τάση ανοικτού κυκλώματος) (Σχήμα 6.9). Παράλληλα, με την αύξηση της αντίστασης, η ένταση του ρεύματος παραμένει αρχικά σχεδόν σταθερή, ενώ στη συνέχεια μειώνεται απότομα.



Σχήμα** 6.9: **Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας Φ/Β πλαισίου, για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας

Κατά το σχεδιασμό μιας Φ/Β μονάδας, επιλέγεται η συνδεσμολογία των πλαισίων προκειμένου να προκύψουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (τάση και εγκατεστημένη ισχύς) της Φ/Β εγκατάστασης. Ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων z που απαιτούνται εξαρτάται από τον αριθμό των πλαισίων z_1 που θα συνδεθούν σε σειρά και θα αποτελέσουν τη στοιχειοσειρά και τον απαιτούμενο αριθμό στοιχειοσειρών z_2 που θα συνδεθούν παράλληλα για να επιτευχθεί η επιθυμητή ονομαστική ισχύς $P_{PV\,0}$ της μονάδας. Ειδικότερα, λαμβάνοντας υπόψη την επιθυμητή τάση U_{DC} λειτουργίας της Φ/Β μονάδας και την τάση U_{mod}, στην οποία σχεδιάζεται η λειτουργία του Φ/Β πλαισίου (Σχήμα 6.9), προκύπτει απαιτούμενος αριθμός πλαισίων κάθε στοιχειοσειράς, ως:

$$z_1 = \left[\frac{U_{DC}}{U_{mod}}\right] \tag{6.1}$$

Ο συνολικός αριθμός Φ/Β πλαισίων, υπολογίζεται ως:

$$z = \left[\frac{P_{PV_0}}{z_1 \cdot P_{mod_0}}\right] \tag{6.2}$$

όπου, P_{mod_0}, η μέγιστη ισχύς του πλαισίου.

Έχοντας επιλέξει τον αριθμό των πλαισίων, που συνθέτουν τη Φ/Β μονάδα του υβριδικού συστήματος, η ενεργειακή παραγωγή της μονάδας υπολογίζεται σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του αέρα, που αποτελούν τις σημαντικότερες παραμέτρους λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων.

Ο υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής μιας Φ/Β μονάδας βασίζεται στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα Φ/Β πλαίσια στην επιφάνειά τους. Η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ενεργειακής παραγωγής των Φ/Β μονάδων εξαρτάται από την κλίση των πλαισίων, η οποία μπορεί είτε να είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (σταθερής κλίσης), είτε να μεταβάλλεται κατά τον άξονα μεταβολής του ηλιακού ύψους (μεταβολή ενός άξονα), είτε να μεταβάλλεται ακολουθώντας τη διαδρομή που διαγράφει ο ήλιος (μεταβολή δύο αξόνων). Στην παρούσα διατριβή, λαμβάνοντας υπόψη ότι η Φ/Β μονάδα εξετάζεται ως τμήμα ενός υβριδικού συστήματος αλλά και το γεγονός ότι αφορά κυρίως συστήματα μικρής ισχύος, εξετάζεται μόνο η περίπτωση εγκατάστασης Φ/Β με σταθερή κλίση και νότιο προσανατολισμό.

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας I_T σε γωνία κλίσης β των Φ/Β πλαισίων, χρησιμοποιείται το ισοτροπικό μοντέλο των (Liu & Jordan 1960), στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η διάχυτη ακτινοβολία από τον ουράνιο θόλο ως ισοτροπική και η ανακλώμενη διάχυτη ακτινοβολία από το έδαφος, σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \frac{1 + cos\beta}{2} + I \cdot \rho_g \cdot \frac{1 - cos\beta}{2} \tag{6.3}$$

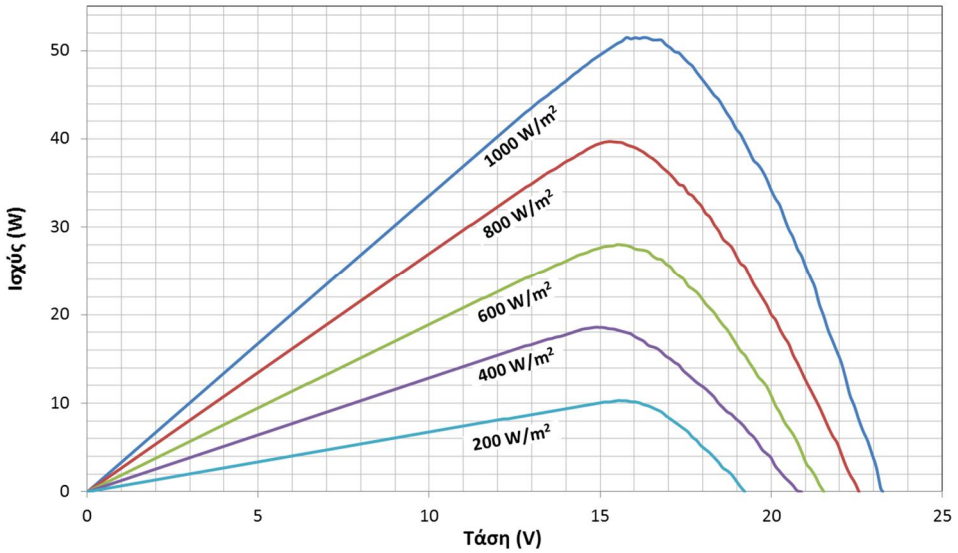
όπου: I_b, I_d, I, η άμεση, η διάχυτη και η ολική ακτινοβολία (W/m^2) στο οριζόντιο επίπεδο, αντίστοιχα,

R_b, γεωμετρικός παράγοντας ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{cos\theta}{cos\theta_z} \tag{6.4}$$

όπου: θ, η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του πλαισίου και θ_z, η ηλιακή ζενίθια γωνία.

ρ_g, η λευκαύγεια (albedo) του εδάφους, που ποικίλλει ανάλογα με το είδος της ανακλαστικής επιφάνειας. Χαρακτηριστικά είδη επιφάνειας εδάφους δίδονται από τους (Calafell & Hunnt 1977; Gueymard 1987) ενώ συνήθως στους υπολογισμούς λαμβάνεται ίση με 0,2.



Σχήμα** 6.10: **Διάγραμμα ισχύος Φ/Β πλαισίου για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας

Για κάθε σημείο λειτουργίας (I, U) ενός Φ/Β πλαισίου, η ισχύς P_{mod} υπολογίζεται ως:

$$P_{mod} = I_{mod} \cdot U_{mod} \tag{6.5}$$

Στο Σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η μεταβολή ισχύος του Φ/Β πλαισίου ανάλογα με την ένταση I_T της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του. Είναι σαφές ότι, εκτός από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, το σημείο λειτουργίας καθορίζεται και από την τάση. Προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση της Φ/Β μονάδας, χρησιμοποιούνται διατάξεις παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker, MPPT), οι οποίες με συνεχή αναπροσαρμογή στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας ρυθμίζουν την τάση, έτσι ώστε να αποδίδεται από τη Φ/Β μονάδα η μέγιστη δυνατή ισχύς. Οι παραπάνω καμπύλες λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου (Σχήμα 6.10) έχουν προκύψει κατά την πιστοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions, STC). Οι συνθήκες αυτές αφορούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δέσμης φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με $AM1{,}5$, κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου και θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων 25 °C ± 2 °C. Η σημαντικότερη επίδραση στην παραγωγή των Φ/Β παρατηρείται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας τους. Σύμφωνα με τους (Καλδέλλης & Καββαδίας 2005; Kaldellis et al. 2014), η μεταβολή της θερμοκρασίας της Φ/Β επιφάνειας μπορεί να επιφέρει σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας μέχρι και 25% μεταβολή της αναμενόμενης ισχύος (Σχήμα 6.11).

Για το σκοπό αυτό απαιτείται διόρθωση της ισχύος του πλαισίου σύμφωνα με τη σχέση:

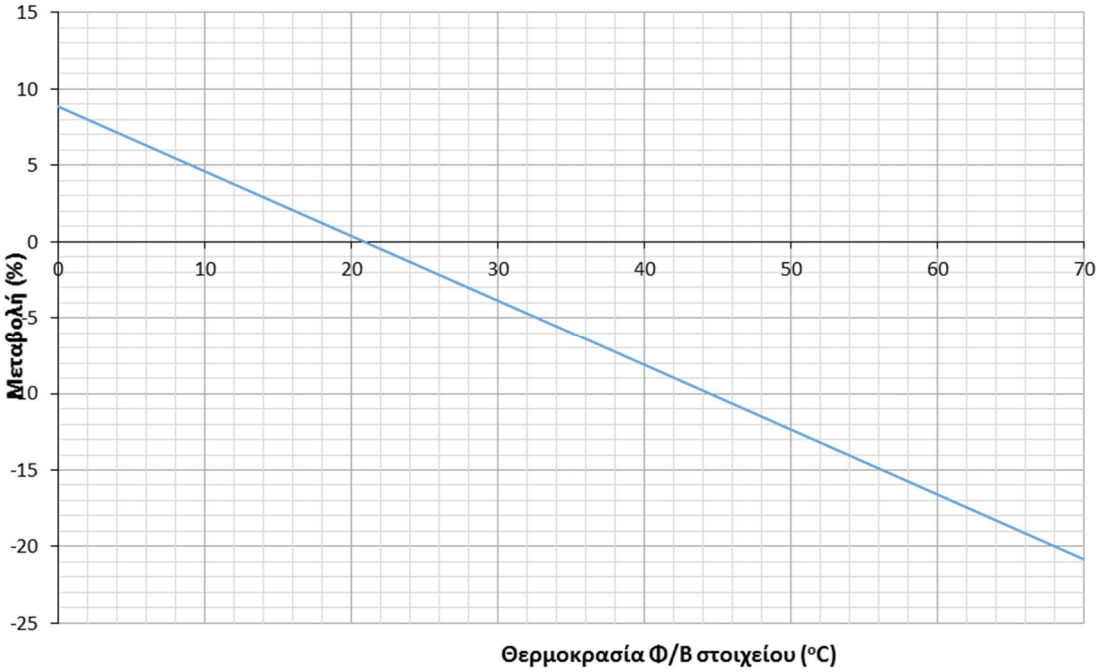
$$P_{mod}^{+} = \frac{I_T}{I_{STC}} \cdot P_{mod} \cdot \left(1 + \gamma \cdot (t_c - t_{STC})\right) \tag{6.6}$$

όπου: I_{STC} και t_{STC}, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου,
t_c, η θερμοκρασία λειτουργίας των Φ/Β στοιχείων,
γ, ο θερμικός συντελεστής ισχύος του Φ/Β πλαισίου, ο οποίος, για συνήθεις συνθήκες, λαμβάνεται ίσος με $-0{,}0045\ K^{-1}$.

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στα Φ/Β στοιχεία κατά τη λειτουργία τους, συνδέεται άμεσα με την ένταση I_T της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία αέρα t_α (Καλδέλλης & Καββαδίας 2000; Kaplanis & Kaplani 2011):

$$t_c = t_a + k \cdot I_T \tag{6.7}$$

όπου *k* θερμοκρασιακή σταθερά εξαρτημένη από τις συνθήκες λειτουργίας και μετάδοσης θερμότητας του Φ/Β πλαισίου και κυμαινόμενη μεταξύ 0,02 και 0,04 $^oC/(W/m^2)$.



Σχήμα** 6.11: **Επίδραση της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά ενός Φ/Β στοιχείου

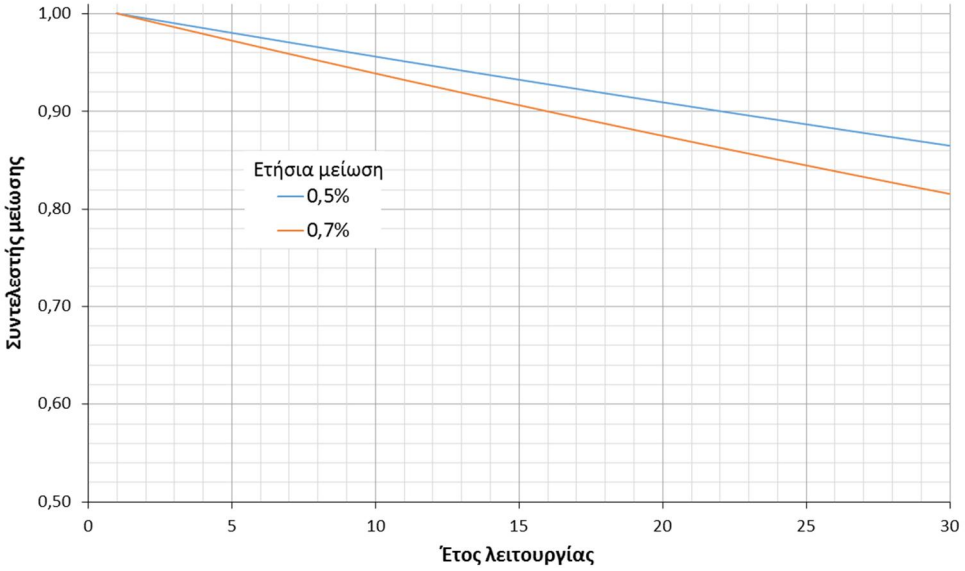
Η ενέργεια E_{PV} που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή μονάδα του υβριδικού συστήματος, σε χρόνο Δt υπολογίζεται ως:

$$E_{PV} = z \cdot P_{mod}^{+} \cdot \Delta t \cdot \eta_{dst} \cdot \eta_{PV_{ag}} \cdot \eta_{shd} \tag{6.8}$$

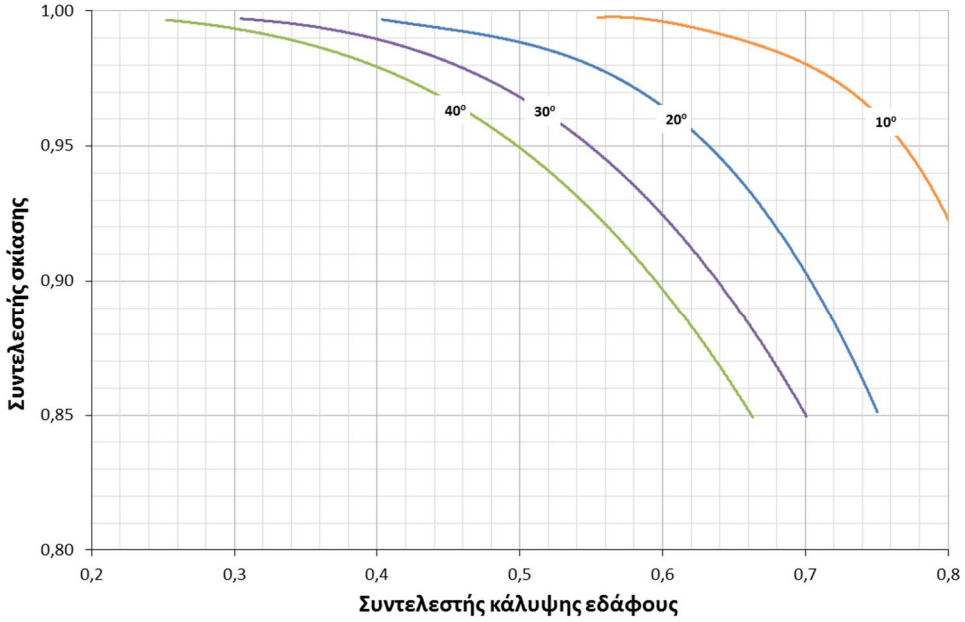
όπου: η_{dst}, συντελεστής απόδοσης ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων λόγω επικάθησης σκόνης κ.λπ. Οι τιμές του συντελεστή εξαρτώνται από τη συχνότητα με την οποία καθαρίζονται οι επιφάνειες των Φ/Β πλαισίων καθώς και το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 96% και 99%,

$\eta_{PV_{ag}}$, συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη γήρανση των Φ/Β. Η γήρανση των Φ/Β έχει ως αποτέλεσμα τη μέση ετήσια μείωση της μέγιστης απόδοσή τους μεταξύ 0,5% και 0,7% (Kaplanis & Kaplani 2011; Φραγκιαδάκης 2009). Οι ετήσιες τιμές του συντελεστή γήρανσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.12.

η_{shd}, συντελεστής απόδοσης λόγω σκίασης των Φ/Β πλαισίων, ο οποίος εξαρτάται από τη διάταξη των πλαισίων και τις αποστάσεις μεταξύ των συστοιχιών (εσωτερικές σκιάσεις) αλλά και τυχούσες σκιάσεις που μπορεί να προκληθούν από εξωτερικούς παράγοντες (κτήρια, φυσικά εμπόδια κ.λπ.). Ο συντελεστής εσωτερικής σκίασης της Φ/Β μονάδας επιλέγεται από το Σχήμα 6.13 (Deline et al. 2012).



Σχήμα** 6.12: **Συντελεστής μεταβολής της μέγιστης απόδοσης των Φ/Β πλαισίων λόγω γήρανσης για κάθε έτος λειτουργίας

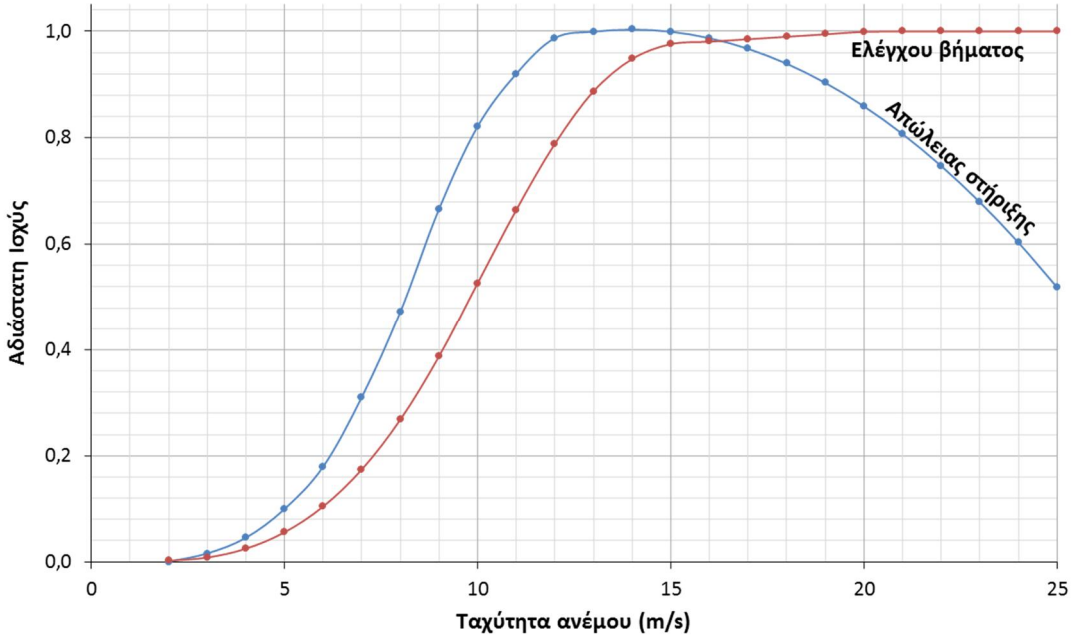


Σχήμα** 6.13: **Συντελεστής απόδοσης λόγω σκίασης Φ/Β μονάδας σε συνάρτηση με το ποσοστό κάλυψης του εδάφους (επιφάνεια Φ/Β πλαισίων προς επιφάνεια του εδάφους που καταλαμβάνει η Φ/Β μονάδα)

6.3.2 Ανεμογεννήτρια

Οι αιολικές μηχανές αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις που έχουν ως σκοπό την αποτελεσματική αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Τα πτερύγια της πτερωτής μιας Α/Γ δεσμεύουν ένα ποσοστό της ανά μονάδα χρόνου κινητικής ενέργειας του ανέμου και το μετατρέπουν σε μηχανικό έργο (στρεπτική ροπή) στον άξονα της πτερωτής. Το μηχανικό έργο μετασχηματίζεται, κατά κανόνα μέσω της ηλεκτρικής γεννήτριας, σε ηλεκτρική ισχύ. Η ισχύς που αποδίδει μια Α/Γ

είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου όταν η τιμή της είναι μεταξύ της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας και της ταχύτητας ονομαστικής λειτουργίας της Α/Γ, ενώ για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής ταχύτητας λειτουργίας πραγματοποιείται έλεγχος της αποδιδόμενης ισχύος. Για τον έλεγχο ισχύος της μηχανής είναι απαραίτητη είτε η ρύθμιση του βήματός της, είτε ο κατάλληλος αεροδυναμικός σχεδιασμός και η αξιοποίηση του φαινομένου "απώλειας στήριξης" (Σχήμα 6.14). Πιο συγκεκριμένα, με τη διαδικασία ρύθμισης βήματος (pitch control) επιχειρείται η περιστροφή του πτερυγίου γύρω από το διαμήκη άξονά του, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής γωνίας προσβολής κατά το μήκος του πτερυγίου, ώστε να υλοποιούνται οι απαιτήσεις ισχύος της μηχανής. Αντίστοιχα, ο μηχανισμός απώλειας στήριξης (stall control) βασίζεται στο αεροδυναμικό φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος (το στρώμα αέρα που σχεδόν εφάπτεται στην επιφάνεια του πτερυγίου) από τμήμα ή το σύνολο του πτερυγίου, εφόσον η γωνία προσβολής του πτερυγίου ξεπεράσει ορισμένα αεροδυναμικά όρια. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε απότομη μείωση της ισχύος της μηχανής.



Σχήμα** 6.14: **Αδιάστατες καμπύλες λειτουργίας Α/Γ

Η ταχύτητα του ανέμου, η οποία λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής της Α/Γ, αναφέρεται στο ύψος της πτερωτής. Η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει μια κατακόρυφη διανομή μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Ειδικότερα, παρουσιάζει εκθετική αύξηση με την αύξηση του ύψους, η οποία συνήθως είναι αξιοσημείωτη για τα πρώτα 100 m από το έδαφος, συνήθως εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας με το ύψος εξαρτάται κυρίως από το ανάγλυφο της περιοχής. Για την περιγραφή της κατακόρυφης διανομής της ταχύτητας του ανέμου έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές σχέσεις (Mohandes et al. 2011; Johnson 2006), οι οποίες στηρίζονται στη θεωρία του οριακού στρώματος, εκ των οποίων η πιο διαδεδομένη είναι η εκθετική διανομή (power law) (Peterson & Hennessey Jr. 1977; Hsu et al. 1994; Καλδέλλης & Καββαδίας 2005):

$$\frac{V_h}{V_{h_0}} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^a \tag{6.9}$$

όπου: V_h, η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος h από το έδαφος όπου έχει τοποθετηθεί η ανεμογεννήτρια,
V_{h_0}, η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς h_0 από το έδαφος και
α, παράμετρος η οποία εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους αλλά και τη διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές της παραμέτρου α κυμαίνονται κατά κανόνα μεταξύ 0,08 για παγωμένες λείες επιφάνειες και 0,45 για αστικές περιοχές.

Ένα άλλο μέγεθος από το οποίο εξαρτάται η ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ, είναι η πυκνότητα του αέρα. Οι καμπύλες λειτουργίας των Α/Γ αναφέρονται σε πυκνότητα αέρα 1,225 kg/m^3 (Κανονικές Συνθήκες). Η πυκνότητα του αέρα παρουσιάζει μικρές μεταβολές ανάλογα με τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες (ατμοσφαιρική πίεση, σχετική υγρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος)· παρόλα αυτά, σύμφωνα με τους (Kaldellis et al. 2004), η εκτιμώμενη ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ μπορεί να παρουσιάσει απόκλιση έως και 20% από την πραγματική, εάν δεν ληφθούν υπόψη οι πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά το διάστημα λειτουργίας της. Η πυκνότητα του υγρού αέρα (μίγμα ξηρού αέρα και υδρατμών), ρ_α, εκφράζεται ως το άθροισμα της πυκνότητας του ξηρού αέρα, ρ_d, και της πυκνότητας των υδρατμών, ρ_v, ως:

$$\rho_\alpha = \frac{m_a}{V_a} = \frac{m_d + m_v}{V_a} = \rho_d + \rho_v \tag{6.10}$$

όπου: m_a, m_d, m_v, η συνολική μάζα αέρα, η μάζα ξηρού αέρα και η μάζα υγρού αέρα (kg), αντίστοιχα,
V_a, ο συνολικός όγκος του αέρα (m^3) και
ρ_d, ρ_v, η πυκνότητα του ξηρού αέρα και η πυκνότητα των υδρατμών αντίστοιχα (kg/m^3).

Η πυκνότητα του ξηρού αέρα υπολογίζεται, σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση του ξηρού αέρα, ως:

$$\rho_d = \frac{P_d}{R_d \cdot T_a} = \frac{P_a - e}{R_d \cdot T_a} \tag{6.11}$$

όπου: P_a, P_d, e, η ατμοσφαιρική πίεση, η μερική πίεση του ξηρού αέρα και η μερική πίεση (τάση) των υδρατμών (Pa), R_d η σταθερά του ξηρού αέρα (287,05 J/(kg·K)) και T_a, η θερμοκρασία αέρα (K).

Αντίστοιχα, η πυκνότητα των υδρατμών υπολογίζεται ως:

$$\rho_v = \frac{e}{R_v \cdot T_\alpha} \tag{6.12}$$

όπου: R_v η ειδική σταθερά των υδρατμών (461,51 J/(kg·K)).

Η τάση των υδρατμών, e, υπολογίζεται από τη σχέση της σχετικής υγρασίας του αέρα:

$$RH = \frac{e}{e_s} \tag{6.13}$$

ως:

$$e = e_s \cdot \frac{RH}{100} \tag{6.14}$$

όπου: e_s, η τάση των κορεσμένων υδρατμών (*Pa)* και RH, η σχετική υγρασία του αέρα (%).

Η τάση των κορεσμένων υδρατμών συνδέεται με τη θερμοκρασία αέρα μέσω της σχέσης Clausius-Clapeyron (Μεταξάς & Μπαρτζώκας 2012):

$$\frac{de_s}{e_s} = \frac{L}{R_v} \cdot \frac{dT_a}{T_a^2} \tag{6.15}$$

όπου: L, η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (2,507 J/kg).

Ολοκληρώνοντας τη σχέση 6.15 προκύπτει ότι η τάση κορεσμένων υδρατμών υπολογίζεται ως:

$$e_s = \exp\left(-\frac{L}{R_v \cdot T_a}\right) \tag{6.16}$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων 6.11, 6.12, 6.14 και 6.16 στη σχέση 6.10, προκύπτει ότι:

$$\rho_a = \frac{1}{T_a} \cdot \left[0{,}00348 \cdot P_a - 0{,}0000132 \cdot RH \cdot \exp\left(-\frac{0{,}00543}{T_a}\right)\right] \tag{6.17}$$

Η ενεργειακή παραγωγή E_W (*Wh*) μιας Α/Γ σε χρόνο Δt (*h*) υπολογίζεται ως:

$$E_W = p_w \cdot P_{W_0} \cdot \Delta t \cdot \frac{\rho_\alpha}{\rho_{K\Sigma}} \cdot \delta(t) \tag{6.18}$$

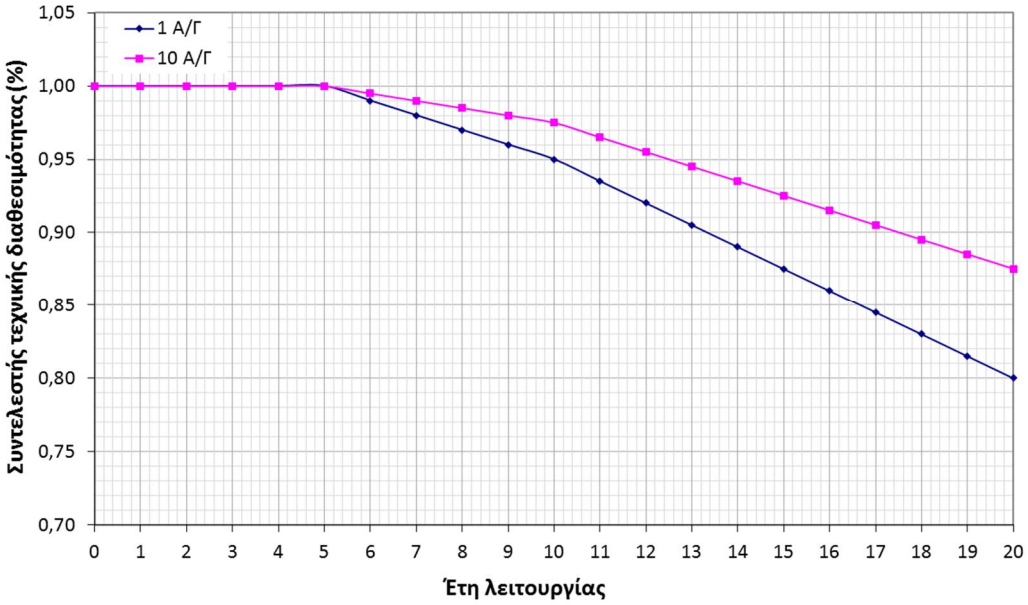
όπου: p_w, η αδιάστατη ισχύς (Σχήμα 6.14) που αποδίδει η Α/Γ, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πτερωτής. Η αδιάστατη ισχύς προκύπτει από το λόγο της αποδιδόμενης ισχύος μιας Α/Γ προς την ονομαστική της ισχύ,

P_{W_0}, η ονομαστική ισχύς της Α/Γ (*W*),

$\rho_{K\Sigma}$, η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (1,225 kg/m^3),

$\delta(t)$, η συνάρτηση τεχνικής διαθεσιμότητας της ανεμογεννήτριας, η οποία είναι συνάρτηση δείκτης (indicator function) που λαμβάνει την τιμή 1 όταν η μηχανή βρίσκεται σε λειτουργία και την τιμή 0 όταν βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Η τεχνική διαθεσιμότητα μιας Α/Γ δεν συνδέεται άμεσα με το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της περιοχής, εκφράζει δε την ικανότητα ασφαλούς λειτουργίας της Α/Γ από τεχνικής άποψης. Η τιμή της εξαρτάται από τις ώρες εκτός λειτουργίας της Α/Γ για προγραμματισμένη συντήρηση, τυχαίες βλάβες, χρόνο αποκατάσταση βλαβών, διακοπή της λειτουργίας της λόγω ενεργοποίησης μηχανι-

σμών αυτοπροστασίας και άλλους τεχνικούς λόγους. Η μέση ετήσια τεχνική διαθεσιμότητα, Δ, κυμαίνεται στις σύγχρονες Α/Γ στα επίπεδα του 95%, ενώ έχουν δημοσιευθεί στοιχεία αιολικών εγκαταστάσεων με τεχνική διαθεσιμότητα του 99%. Η διαχρονική μεταβολή της τεχνικής διαθεσιμότητας μιας αιολικής εγκατάστασης, σε σχέση με την αρχική της τιμής κατά την έναρξη λειτουργίας τής εγκατάστασης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.15 και εξαρτάται από τον αριθμό Α/Γ που διαθέτει η εγκατάσταση (Kalafatis et al. 2008).

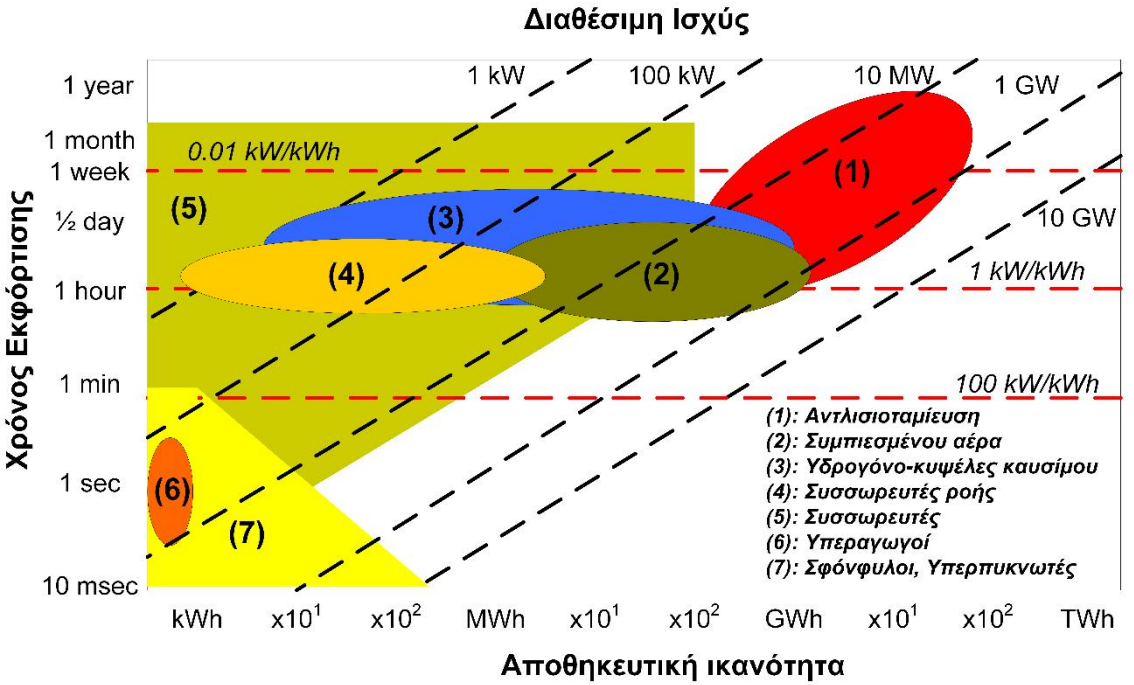


Σχήμα** 6.15: **Διαχρονική μεταβολή τού συντελεστή τεχνικής διαθεσιμότητας αιολικών εγκαταστάσεων** 1 **και** 10 **Α/Γ

6.3.3 Μονάδα αποθήκευσης ενέργειας

Η στιγμιαία διάθεση ισχύος από τις μονάδες παραγωγής ενός υβριδικού συστήματος εξαρτάται από μια σειρά κλιματολογικών και εν γένει φυσικών παραγόντων, που ο άνθρωπος δεν μπορεί να ελέγχει και να εκμεταλλεύεται στο βαθμό που τον ικανοποιεί (π.χ. ταχύτητα αέρα, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας). Ως εκ τούτου, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς παρουσιάζει διακυμάνσεις και είναι συχνό το φαινόμενο της ασυμφωνίας ζήτησης και διάθεσης της ενέργειας. Άλλοτε η παραγόμενη ενέργεια θεωρείται ανεπαρκής και δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις της κατανάλωσης και άλλοτε υπερβαίνει τη ζήτηση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση σημαντικής περίσσειας ενέργειας. Η χρήση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας βελτιώνει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των υβριδικών συστημάτων, συμβάλλοντας στην περιορισμένη χρήση εφεδρικών μονάδων, που αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση περιόδων χαμηλής παραγωγής ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης αξιοποιούν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα Φ/Β πλαίσια και τις Α/Γ, αποδίδοντάς την σε περιόδους νηνεμίας και έλλειψης ηλιοφάνειας.

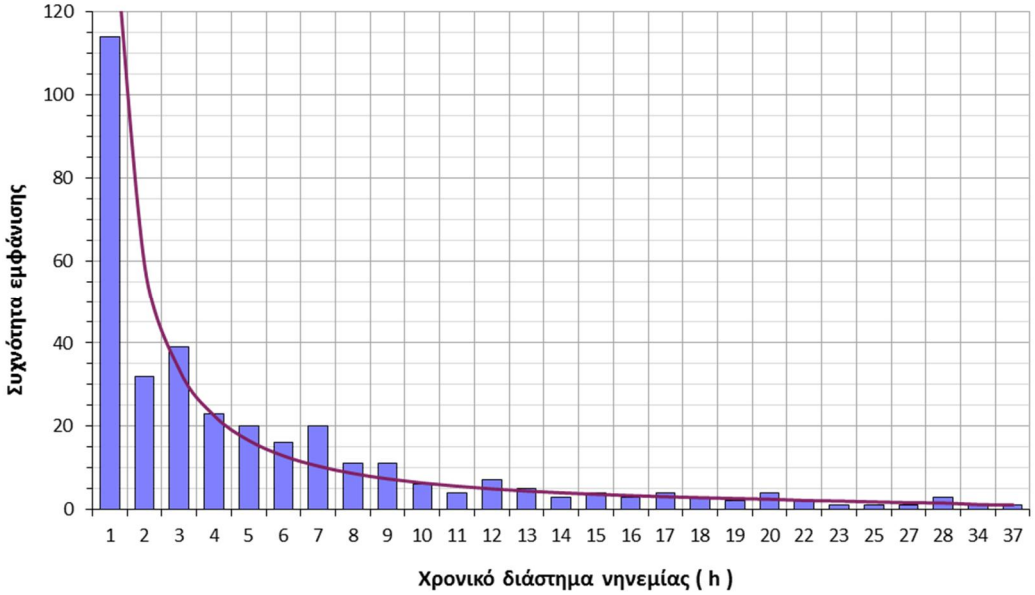
Τα πλέον αναγνωρισμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά, τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα, οι σφόνδυλοι, η αποθήκευση υδρογόνου και η χρήση του σε κυψέλες καυσίμου, οι υπερπυκνωτές, η αποθήκευση ενέργειας σε μαγνητικό πεδίο, οι συσσωρευτές και τα στοιχεία ροής. Ανάλογα με το μέγεθος του υβριδικού συστήματος επιλέγεται και το καταλληλότερο σύστημα αποθήκευσης (Σχήμα 6.16).



Σχήμα** 6.16: **Εύρος ισχύος, χρόνου εκφόρτισης και αποθηκευτικής ικανότητας διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης (Kavadias 2012)

Η αποθήκευση ενέργειας σε συσσωρευτές είναι από τις πλέον ώριμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας σε μικρής και μεσαίας κλίμακας εγκαταστάσεις. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και συνήθως έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση, παρέχοντας με άμεσο τρόπο τη δυνατότητα συσσώρευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συσσωρευτές αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια, αφού τη μετατρέψουν σε χημική και όταν αυτό απαιτηθεί, μπορούν να την αποδώσουν πάλι σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά και παράλληλα, προκειμένου να αποδώσουν στα άκρα τους τα επιθυμητά χαρακτηριστικά λειτουργίας (τάση και ένταση). Ο τομέας ανάπτυξης των συσσωρευτών παρουσιάζει σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα να διατίθεται πληθώρα τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης τύπου μπαταρίας. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι συσσωρευτών είναι οι μολύβδου – οξέος, οι αλκαλικές, οι λιθίου, οι ψευδαργύρου/βρωμιδίου, οι νατρίου-θείου και οι μετάλλου-αέρα.

Για τη διαστασιολόγηση των συσσωρευτών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται να καλύψουν και το χρονικό διάστημα στο οποίο θα πρέπει να την αποδώσουν. Οι δύο αυτές παράμετροι καθορίζονται από το αιολικό και ηλιακό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο χρονικό διάστημα συνεχόμενης νηνεμίας (π.χ. Σχήμα 6.17), η οποία συνοδεύεται από περίοδο χαμηλής ηλιοφάνειας. Στα χαρακτηριστικά μεγέθη των συσσωρευτών περιλαμβάνονται η χωρητικότητα, ο ρυθμός και το βάθος εκφόρτισης, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης και ο βαθμός απόδοσης.



Σχήμα** 6.17: **Συχνότητα εμφάνισης διαστημάτων συνεχόμενης νηνεμίας, για χρονική περίοδο ενός έτους, στην Άνδρο (Kaldellis et al. 2007)

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών εκφράζει την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευθεί ή να αποδοθεί και καθορίζεται για συγκεκριμένο ρυθμό ή περίοδο εκφόρτισης. Οι λειτουργικοί παράγοντες, που επηρεάζουν τη χωρητικότητα, είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, το βάθος εκφόρτισης (ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας που δύναται να αποδοθεί από την μπαταρία), η τάση της μπαταρίας στο τέλος της εκφόρτισης (τάση αποκοπής), η θερμοκρασία, η ηλικία της και το ιστορικό χρήσης της (π.χ. κακή χρήση). Η συνήθης μονάδα έκφρασης της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι το Amber-hour (Ah)˙ ο ρυθμός εκφόρτισης εκφράζεται ως το κλάσμα της χωρητικότητας, *C*, προς τη διάρκεια της περιόδου εκφόρτισης, σε ώρες.

Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (Depth Of Discharge, DOD) είναι το μέγιστο ποσοστό τής χωρητικότητας, το οποίο μπορεί να αποδοθεί από το συσσωρευτή. Συνήθως καταδεικνύεται από την τάση αποκοπής, ή τάση βάθους εκφόρτισης και από το ρυθμό εκφόρτισης. Στα υβριδικά συστήματα, η τάση αποκοπής του φορτίου ρυθμίζεται από το ρυθμιστή φόρτισης, καθορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το επιτρεπόμενο βάθος για δεδομένο ρυθμό εκφόρτισης. Οι τιμές του μέγιστου DOD μπορούν να κυμαίνονται μεταξύ του 15% και του 80% της χωρητικότητας, ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας. Το βάθος εκφόρτισης συνδέεται άμεσα με το χρόνο ζωής των συσσωρευτών, ο οποίος καθορίζεται από τον αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισής τους.

Η αυτοεκφόρτιση είναι η διαδικασία κατά την ο οποία ο συσσωρευτής υφίσταται μείωση της στάθμης φόρτισης (State Of Charge, SOC), χωρίς να εξυπηρετεί κάποια κατανάλωση. Τα αίτια, που προκαλούν την αυτοεκφόρτιση, είναι οι εσωτερικοί χημικοί μηχανισμοί ή άλλες απώλειες της μπαταρίας. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης ενός τυπικού συσσωρευτή είναι της τάξης του 0,7% του SOC ανά ημέρα.

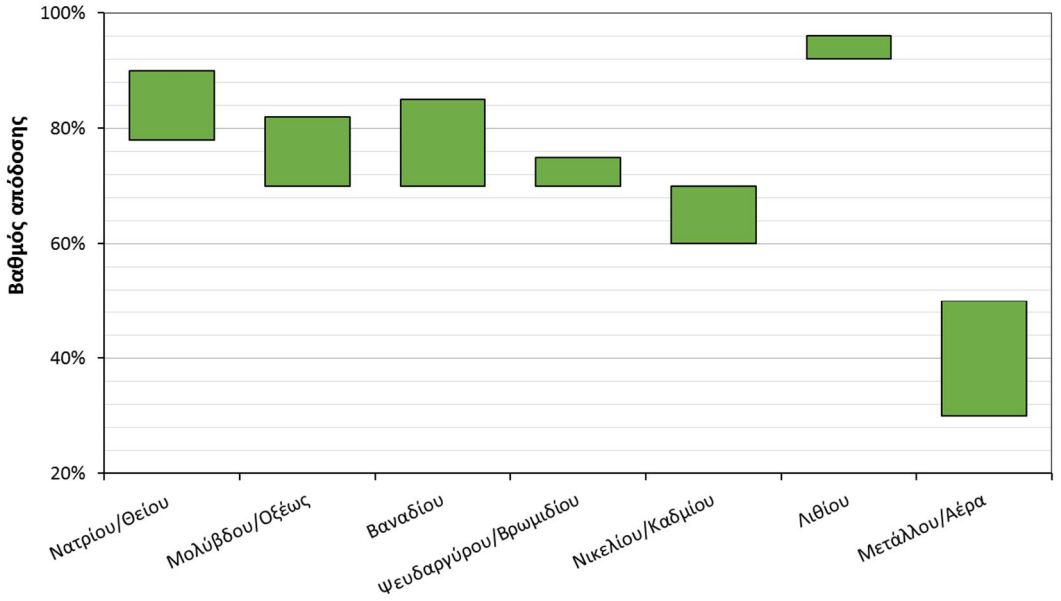
Το μέγεθος των συσσωρευτών καθορίζεται από τις ώρες αυτονομίας, h_o, του συστήματος, τις συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις των καταναλώσεων, E_d, το βαθμό απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης και από το μέγιστο επιτρεπόμενο DOD_L. Επιλέγοντας την τάση λειτουργίας των συσσωρευτών, U_{DC}, η μέγιστη χωρητικότητα, Q_o, των συσσωρευτών (σε Ah) δίδεται από τη σχέση:

$$Q_o = \frac{h_o \cdot E_d}{\Delta t \cdot U_{DC}} \cdot \frac{1}{DOD_L} \cdot \frac{1}{\eta_{ss_o}} \qquad (6.19)$$

όπου η_{ss_o} ο συνολικός βαθμός απόδοσης των συσσωρευτών, που περιλαμβάνει το βαθμό αυτοεκφόρτισης και το βαθμό απόδοσης του συστήματος εκφόρτισης. Για την επιλογή του DOD στο οποίο θα λειτουργούν οι συσσωρευτές, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι αυτό συνδέεται άμεσα με τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών σύμφωνα με τη σχέση:

$$DOD_L \cdot n_c \cong 1200 \text{ έως } 1500 \qquad (6.20)$$

όπου n_c ο αριθμός των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.



Σχήμα** 6.18: **Εύρος μεταβολής βαθμού απόδοσης κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης συσσωρευτών
(Kavadias 2012)

6.3.4 Εξοπλισμός ρύθμισης ισχύος

Ο εξοπλισμός ρύθμισης της παραγόμενης ενέργειας ενός υβριδικού συστήματος περιλαμβάνει τους μετατροπείς του ηλεκτρικού ρεύματος από εναλλασσόμενο σε συνεχές (ανορθωτής, rectifier) και από συνεχές σε εναλλασσόμενο (αντιστροφέας, inverter) και το ρυθμιστή φόρτισης, ο οποίος αποτελεί το σύνδεσμο μεταξύ των μονάδων παραγωγής (Φ/Β μονάδα, Α/Γ), της μονάδας αποθήκευσης (συσσωρευτές) και της κατανάλωσης.

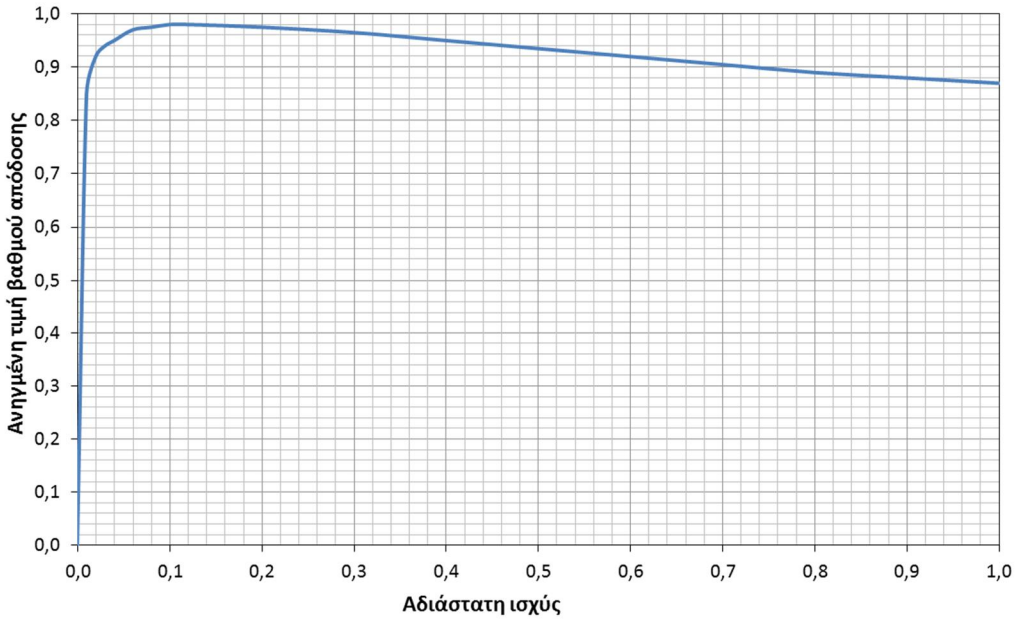
Τα χαρακτηριστικά, που καθορίζουν την επιλογή των μετατροπέων, είναι η μέγιστη ισχύς και η μέγιστη τάση λειτουργίας˙ ως εκ τούτου, είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την ονομαστική ισχύ της Φ/Β μονάδας και της Α/Γ. Ο βαθμός απόδοσης, η_{inv}, ενός αντιστροφέα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{U_{AC} \cdot I_{AC} \cdot \text{συν}(\varphi)}{U_{DC} \cdot I_{DC_{inv}}} \qquad (6.21)$$

όπου: P_{out}, U_{AC}, I_{AC}, η ισχύς (*W*), η τάση (*V*) και η ένταση (*A*) του εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα, αντίστοιχα,
P_{in}, U_{DC}, $I_{DC_{inv}}$, η ισχύς (*W*), η τάση (*V*) και η ένταση (*A*) του συνεχούς ρεύματος στην είσοδο του αντιστροφέα, αντίστοιχα, και

συν(φ), το συνημίτονο της διαφοράς φάσης μεταξύ τάσης και έντασης του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Παρόλο που ο βαθμός απόδοσης των μετατροπέων δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές κατά τη λειτουργία τους, οι μεταβολές του, όμως, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης ενός υβριδικού συστήματος. Στο Σχήμα 6.19 παρουσιάζεται η τυπική καμπύλη του βαθμού απόδοσης ενός αντιστροφέα, από την οποία γίνεται αντιληπτό ότι αυτός παρουσιάζει μέγιστο σε συγκεκριμένη περιοχή τιμών ισχύος. Παράλληλα, κατά τη διαστασιολόγηση των αντιστροφέων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η τάση λειτουργίας του συστήματος προκειμένου ο αντιστροφέας να λειτουργεί σε υψηλές τιμές απόδοσης.



Σχήμα** 6.19: **Καμπύλη μεταβολής τού βαθμού απόδοσης ενός αντιστροφέα σε σχέση με την αδιάσταστη τιμή της ισχύος εξόδου του (ισχύς εξόδου/ονομαστική ισχύ)

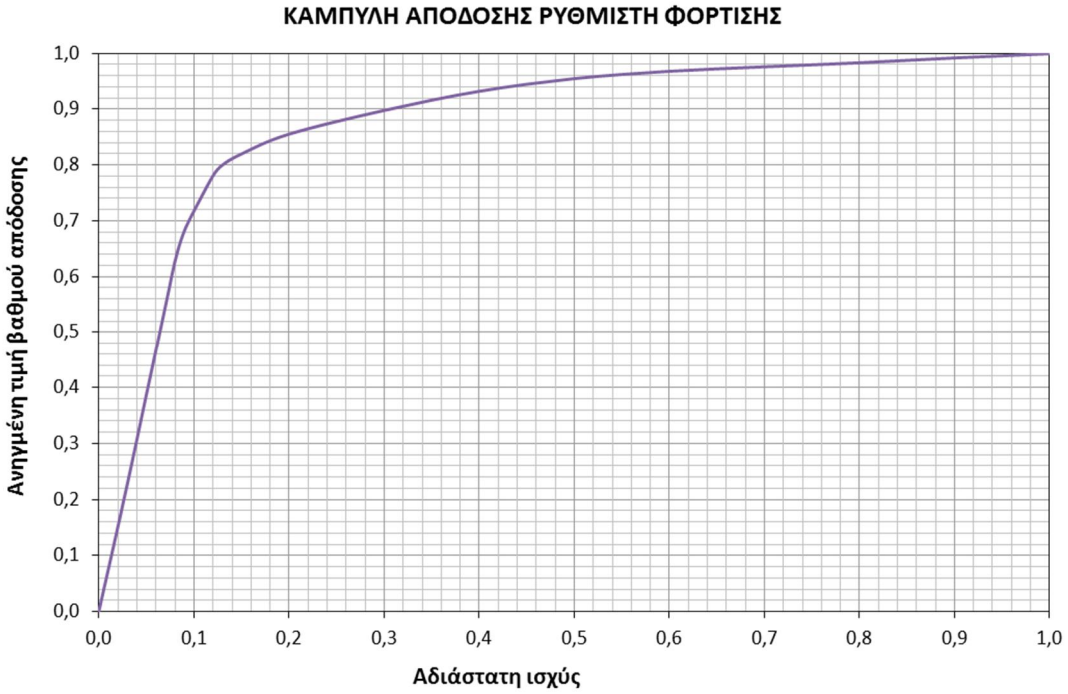
Καθώς ο μέγιστος βαθμός απόδοσης δεν επαρκεί για να χαρακτηρίσει τη λειτουργία ενός αντιστροφέα, αναφορικά με τις απώλειές του, έχει καθιερωθεί ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης (euro efficiency), ο οποίος αποτελεί μία σταθμισμένη τιμή, βασιζόμενη στις επιμέρους αποδόσεις του αντιστροφέα, σε συγκεκριμένες τιμές μερικού φορτίου. Ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta_{inv} = 0{,}03 \cdot \eta_{5\%} + 0{,}06 \cdot \eta_{10\%} + 0{,}13 \cdot \eta_{20\%} + 0{,}10 \cdot \eta_{30\%} + 0{,}48 \cdot \eta_{50\%} + 0{,}20 \cdot \eta_{100\%} \quad (6.22)$$

όπου η με δείκτη αριθμό, οι βαθμοί απόδοσης του μετατροπέα όταν λειτουργεί στην αντίστοιχη τιμή μερικού φορτίου, ενώ οι συντελεστές κάθε όρου του αθροίσματος αποτελούν τη βαρύτητα που δίνεται σε κάθε βαθμό απόδοσης. Η τιμή του ευρωπαϊκού βαθμού απόδοσης είναι συνήθως 1% έως 2% μικρότερη του μέγιστου βαθμού απόδοσης που δίδεται από τους κατασκευαστές.

Ο σταθεροποιητής τάσης (UPS) χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων τάσης και συχνότητας της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την Α/Γ, όταν η παραγόμενη ενέρ-

γεια οδηγείται απευθείας προς την κατανάλωση. Το μέγεθος του σταθεροποιητή τάσης καθορίζεται από τη μέγιστη ισχύ της ανεμογεννήτριας, ενώ ο βαθμός απόδοσής του, η_{UPS}, μεταβάλλεται σε σχέση με το σημείο λειτουργίας του σύμφωνα με την καμπύλη του Σχήματος 6.20.



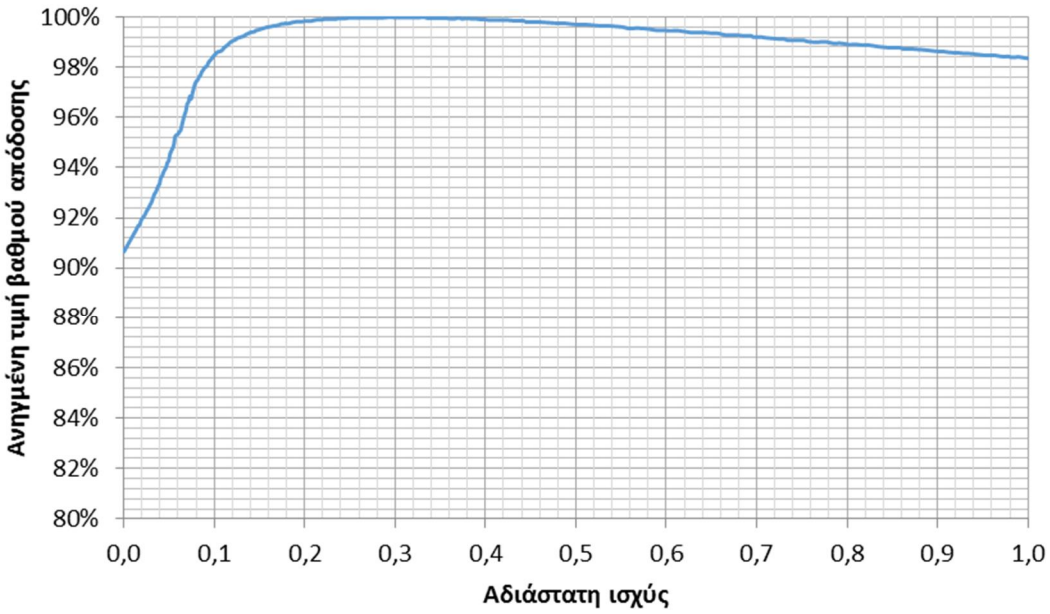
Σχήμα** 6.20: **Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης σταθεροποιητή τάσης σε σχέση με την αδιάστατη ισχύ

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ρυθμιστή φόρτισης περιλαμβάνουν την τάση, U_{DC}, και την ένταση, $I_{in_{cc}}$, του συνεχούς ρεύματος που καλείται να εξυπηρετήσει. Η διαστασιολόγηση του ρυθμιστή φόρτισης προκύπτει σύμφωνα με τη μέγιστη τιμή της έντασης της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να δεχθεί. Κατά τη λειτουργία του, η ένταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{in_{cc}} = \frac{P_{in_{cc}}}{U_{DC}} \tag{6.23}$$

όπου $P_{in_{cc}}$ είναι η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες παραγωγής (Φ/Β μονάδα, Α/Γ) προς τους συσσωρευτές ή από τους συσσωρευτές προς τον αντιστροφέα, σε περίπτωση που η κατανάλωση δεν καλύπτεται από τις μονάδες παραγωγής.

Ο βαθμός απόδοσης, η_{cc}, του ρυθμιστή φόρτισης κατά τη διάρκεια λειτουργίας του δεν παραμένει σταθερός, αλλά εξαρτάται από το ρεύμα εισόδου. Εκφράζεται δε ως ο λόγος του ηλεκτρικού ρεύματος στην έξοδο προς το ηλεκτρικό ρεύμα εισόδου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τάση είναι κοινή στην είσοδο και την έξοδο του ρυθμιστή φόρτισης, αντίστοιχη είναι και η μεταβολή του βαθμού απόδοσης, ως προς την ισχύ στην είσοδό του. Στο Σχήμα 6.21 παρουσιάζεται ο συντελεστής μεταβολής του ονομαστικού βαθμού απόδοσης ως προς το σημείο λειτουργίας του ρυθμιστή φόρτισης, εκφραζόμενος ως ο λόγος της ισχύος στην είσοδο προς τη μέγιστη ισχύ λειτουργίας του.



Σχήμα** 6.21: **Καμπύλη μεταβολής του βαθμού απόδοσης ρυθμιστή φόρτισης σε σχέση με την αδιάστατη ισχύ

6.4 Οικονομική ανάλυση

Κατά την οικονομική αξιολόγηση του υβριδικού συστήματος λαμβάνονται υπόψη το αρχικό κόστος, στο οποίο περιλαμβάνονται τα κόστη εξοπλισμού και εγκατάστασης, προκειμένου να καταστεί λειτουργικό το σύστημα, το ετήσιο σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας και το κόστος αντικατάστασης εξοπλισμού, ο οποίος έχει χρόνο ζωής, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, μικρότερο του συνολικού χρόνου για τον οποίο αξιολογείται το σύστημα.

6.4.1 Αρχικό κόστος εγκατάστασης

Το αρχικό κόστος, IC_o, του απαιτούμενου εξοπλισμού αναλύεται στο κόστος αγοράς της Α/Γ, IC_w, των Φ/Β πλαισίων IC_{PV}, των συσσωρευτών, IC_{ss}, και του βοηθητικού εξοπλισμού, IC_{el}, που συμπεριλαμβάνει τους απαραίτητους μετατροπείς (ανορθωτή και αντιστροφέα), το ρυθμιστή φόρτισης και το σταθεροποιητή τάσης, καθώς και το κόστος εγκατάστασης του εξοπλισμού. Το κόστος εγκατάστασης εξαρτάται κυρίως από τις διαστάσεις του υβριδικού συστήματος αλλά και την ευκολία εγκατάστασής του. Μπορεί, δε, να εκτιμηθεί ως ένα ποσοστό *f* του κόστους εξοπλισμού. Τελικά, το συνολικό κόστος εγκατάστασης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$IC_o = IC_w + IC_{PV} + IC_{ss} + IC_{el} + f \cdot \left(IC_w + IC_{PV}\right) \tag{6.24}$$

Σύμφωνα με ανάλυση αγοράς των (Kaldellis et al. 2006), το κόστος αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού μπορεί να εκτιμηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια από τις σχέσεις:

$$IC_W = \left(\frac{a}{b + P_{w_0}^{x}} + c\right) \cdot P_{w_0} \tag{6.25}$$

$$IC_{PV} = \zeta \cdot z \cdot \mathrm{Pr} \cdot \mathrm{P}^{+}{}_{\mathrm{mod}} \tag{6.26}$$

$$IC_{ss} = \xi \cdot Q_{\max}^{1-\omega} \tag{6.27}$$

$$IC_{elec} = \lambda \cdot P_{d_{\max}}^{1-\tau} + B \cdot (P_w + P_{PV}) \tag{6.28}$$

όπου: ο παράγοντας ζ υπολογίζεται σε συνάρτηση με τον αριθμό των Φ/Β πλαισίων από τα οποία αποτελείται η Φ/Β μονάδα του συστήματος, ως:

$$\zeta = 1 - 0{,}1 \cdot \log_{10}(z) \tag{6.29}$$

και P_r είναι η ανηγμένη τιμή πώλησης του Φ/Β πλαισίου εκφρασμένη σε €/kW$_p$. Οι τιμές των σταθερών όρων των σχέσεων 6.25 έως 6.28 παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.I.

***Πίνακας** 6.I: **Αριθμητικές τιμές των παραμέτρων των σχέσεων** 6.25 **έως** 6.28*

Παράμετρος	Τιμή
a	$8{,}7 \cdot 10^5$ €/kW
b	621
x	2,05
c	700 €/kW
P_r	4000 €/kW
ξ	5,04 €/Ah
ω	0,078
λ	483 €/kW
τ	0,083
B	380 €/kW

6.4.2 Σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του υβριδικού συστήματος, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας περιλαμβάνει τα έξοδα που απαιτούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών και αφορούν τη συντήρηση του συστήματος. Ο υπολογισμός του κόστους συντήρησης και λειτουργίας εκφράζεται ως ποσοστό, m, του αρχικού κόστους του συστήματος, IC_o (σχέση 6.24). Ο υπολογισμός του σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας, FC_o, κατά την έναρξη λειτουργίας του συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$FC_o = m \cdot IC_o \tag{6.30}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το κόστος συντήρησης της Φ/Β μονάδας είναι μικρότερο του κόστους συντήρησης της Α/Γ, ο συντελεστής σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας, m, υπολογίζεται ως η σταθμισμένη τιμή του συντελεστή σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας, m_1, της Φ/Β μονάδας και του συντελεστή σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας, m_2, της υπόλοιπης εγκατάστασης, ως:

$$m = m_1 \cdot \frac{IC_{PV}}{IC_o} + m_2 \cdot \left(1 - \frac{IC_{PV}}{IC_o}\right) \tag{6.31}$$

Οι τιμές των επί μέρους συντελεστών m_1 και m_2 κυμαίνονται από 0,5% έως 1,5% και από 1,5% έως 3%, αντίστοιχα.

Για τον υπολογισμό της διαχρονικής μεταβολής του σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος, λαμβάνεται υπόψη η αναπροσαρμογή του κόστους αυτού σε ετήσια βάση, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον πληθωρισμό. Η ετήσια αναπροσαρμογή, g_m, περιλαμβάνει τη μέση ετήσια αύξηση του κόστους εργασίας, αναλωσίμων και ανταλλακτικών που απαιτούνται για την τακτική συντήρηση και λειτουργία του συστήματος. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη και το κόστος ευκαιρίας του κεφαλαίου, i, το οποίο αναφέρεται στην απώλεια μιας επενδυτικής ευκαιρίας και, κατά συνέπεια, του αντίστοιχου οφέλους, εξαιτίας δέσμευσης του κεφαλαίου σε μία συγκεκριμένη επένδυση για ένα χρονικό διάστημα. Με την παραδοχή ότι τα έξοδα συντήρησης μιας τυχαίας χρονικής περιόδου (π.χ. έτος) καταβάλλονται στο τέλος αυτής (δηλαδή πρακτικά με την έναρξη της επόμενης), έχουμε, μετά από n χρόνια λειτουργίας του υβριδικού συστήματος, τα συνολικά έξοδα για την τακτική συντήρηση και λειτουργία του (σε μελλοντικές αξίες), να υπολογίζονται από τη σχέση:

$$FC_n = m \cdot IC_o \cdot \left[\frac{1+g_m}{1+i} + \left(\frac{1+g_m}{1+i}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{1+g_m}{1+i}\right)^{n-1} + \left(\frac{1+g_m}{1+i}\right)^n\right] \tag{6.32}$$

6.4.3 Μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Το μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας οφείλεται στην αντικατάσταση k_o τμημάτων του εξοπλισμού του συστήματος, των οποίων ο χρόνος ζωής n_k, είναι μικρότερος του χρόνου ζωής τού υβριδικού συστήματος. Σε ειδικές, μάλιστα, περιπτώσεις, ο ακέραιος αριθμός των αντικαταστάσεων, l_k, μπορεί να είναι μεγαλύτερος της μονάδας κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης περιόδου λειτουργίας της μηχανής:

$$l_k = \left[\frac{n-1}{n_k}\right] \tag{6.33}$$

Εάν συμβολίσουμε με r_k το κόστος αντικατάστασης καθενός από τα k_o ($k=1 \div k_o$) μέρη του συστήματος, εκφραζόμενο ως ποσοστό του αρχικού κόστους εγκατάστασης τη στιγμή έναρξης της λειτουργίας της, το συνολικό μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας μπορεί να εκφρασθεί (σε μελλοντικές αξίες) ως:

$$VC_n = IC_o \cdot \sum_{k=1}^{k=k_o} r_k \cdot \left\{\sum_{l=1}^{l=l_k} \left[(1+g_k)\cdot(1-\rho_k)\right]^{l \cdot n_k} \cdot (1+i)^{(n-l\cdot n_k)}\right\} \tag{6.34}$$

όπου: g_k, ο μέσος ετήσιος ρυθμός αναπροσαρμογής της τιμής αντικατάστασης του εξοπλισμού k και

ρ_k, το επίπεδο των πιθανών τεχνολογικών βελτιώσεων, με την πάροδο του χρόνου, των λειτουργικών χαρακτηριστικών του εξοπλισμού που αντικαθίσταται. Εννοείται ότι για $n \le min\{n_k\}$ το μεταβλητό κόστος συντήρησης και λειτουργίας είναι ίσο με μηδέν.

Ο εξοπλισμός, ο οποίος θα πρέπει να αντικατασταθεί, είναι οι συσσωρευτές, των οποίων ο χρόνος ζωής, όταν λειτουργούν σε συνδυασμό με Φ/Β και Α/Γ, κυμαίνεται μεταξύ 5 και 7 ετών, ενώ ο βοηθητικός εξοπλισμός ρύθμισης ισχύος έχει διάρκεια ζωής περίπου στα 10 έτη. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η σχέση 6.34 γράφεται ως:

$$VC_n = IC_o \cdot \Psi \tag{6.35}$$

με

$$\begin{aligned}
&\Psi = 0 && για \quad n \le n_b \\
&\Psi = r_b \cdot \left(\frac{1+g_b}{1+i}\cdot(1-\rho_b)\right)^{n_b} && για \quad n_b+1 \le n \le n_e \\
&\Psi = r_b \cdot \left(\frac{1+g_b}{1+i}\cdot(1-\rho_b)\right)^{n_b} + r_e \cdot \left(\frac{1+g_e}{1+i}\cdot(1-\rho_e)\right)^{n_e} && για \quad n_e+1 \le n \le 2n_b \\
&\Psi = r_b \cdot \left(\frac{1+g_b}{1+i}\cdot(1-\rho_b)\right)^{n_b} + r_b \cdot \left(\frac{1+g_b}{1+i}\cdot(1-\rho_b)\right)^{2n_b} + r_e \cdot \left(\frac{1+g_e}{1+i}\cdot(1-\rho_e)\right)^{n_e} && για \quad 2n_b+1 \le n \le 2n_e
\end{aligned} \tag{6.36}$$

όπου: n_b, n_e, η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών και του βοηθητικού εξοπλισμού αντίστοιχα,
r_b, r_e, ο συντελεστής κόστους αντικατάστασης των συσσωρευτών και του βοηθητικού εξοπλισμού αντίστοιχα,
g_b, g_e, ο πληθωρισμός ετήσιας αναπροσαρμογής του κόστους αντικατάστασης των συσσωρευτών και του βοηθητικού εξοπλισμού αντίστοιχα και
ρ_b, ρ_e, ο συντελεστής βελτίωσης της τεχνολογίας των συσσωρευτών και του βοηθητικού εξοπλισμού, αντίστοιχα, που λαμβάνει υπόψη τεχνολογικές βελτιώσεις του νέου εξοπλισμού σε σχέση με τον εξοπλισμό που αντικαθίσταται και έχει ως συνέπεια τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος.

6.4.4 Κόστος παραγόμενης ενέργειας υβριδικού συστήματος

Λαμβάνοντας υπόψη τα ποσά του κάθε επιμέρους κόστους, το μακροχρόνιο κόστος του υβριδικού συστήματος, C_n, προκύπτει ως το άθροισμα του αρχικού κόστους της εγκατάστασης και της παρούσας αξίας τού σταθερού και μεταβλητού κόστους συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος, από τη σχέση:

$$C_n = (1-\gamma)\cdot IC_o + FC_n + VC_n \tag{6.37}$$

όπου με γ εκφράζεται η επιδιωκόμενη επιδότηση του αρχικού κόστους του υβριδικού συστήματος.

Με αντικατάσταση των σχέσεων 6.32 και 6.35 στη σχέση 6.37, το συνολικό κόστος τού υβριδικού συστήματος υπολογίζεται ως:

$$C_n = IC_o \cdot \left[(1-\gamma) + m \cdot x \cdot \frac{x^n - 1}{x-1} + \Psi\right] \tag{6.38}$$

όπου:

$$x = \frac{1+g_m}{1+i} \tag{6.39}$$

Εάν θεωρήσουμε ότι οι τιμές του ετήσιου πληθωρισμού στο κόστος αντικατάστασης των συσσωρευτών και του βοηθητικού εξοπλισμού, καθώς επίσης και του κόστους συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος είναι ίσοι ($g_b \approx g_e \approx g_m$) και αγνοώντας ενδεχόμενη βελτίωση της τεχνολογίας ($\rho_b \approx \rho_e \approx 0$), τότε το συνολικό κόστος του υβριδικού συστήματος, μετά από εικοσαετή περίοδο λειτουργίας του, υπολογίζεται ως:

$$C_{20} = IC_o \cdot \left[(1-\gamma) + m \cdot x \cdot \frac{x^{20}-1}{x-1} + r_b \cdot \left(x^7 + x^{14}\right) + r_e \cdot x^{10} \right] \tag{6.40}$$

στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το κόστος αντικατάστασης των συσσωρευτών το 7ο και 14ο έτος, καθώς επίσης και το κόστος αντικατάστασης του βοηθητικού εξοπλισμού το 10ο έτος.

Τέλος, για τον υπολογισμό του κόστους της παραγόμενης ενέργειας, c_o, μετά από εικοσαετή περίοδο λειτουργίας του υβριδικού συστήματος, λαμβάνεται υπόψη η συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά το διάστημα λειτουργίας που καλύφθηκε από το σύστημα. Υπολογίζεται δε από τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του καταναλωτή επί τα έτη λειτουργίας του συστήματος. Ειδικότερα, το κόστος παραγωγής ενέργειας, c_o, του υβριδικού συστήματος υπολογίζεται ως:

$$c_0 = \frac{C_{20}}{20 \cdot E_d} \tag{6.41}$$

6.5 Προφίλ κατανάλωσης

Στα δεδομένα που απαιτούνται για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός υβριδικού συστήματος ΑΠΕ, συμπεριλαμβάνεται αναπόφευκτα και το προφίλ κατανάλωσης, ο ρυθμός δηλαδή με τον οποίο καταναλώνεται η ηλεκτρική ενέργεια από τις ηλεκτρικές συσκευές. Ένα ορθά μελετημένο υβριδικό σύστημα ΑΠΕ θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ, για κάθε χρονική στιγμή, ανεξάρτητα εάν υπάρχει διαθέσιμο ηλιακό ή αιολικό δυναμικό. Καθώς η διαστασιολόγηση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ εξαρτάται από το προφίλ κατανάλωσης, η επιλογή διαφορετικού προφίλ μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές διαστάσεις˙ η διαφοροποίηση όμως μειώνεται όταν οι χρήστες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά (Santamouris et al. 2007). Στη βιβλιογραφία έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες στην κατεύθυνση δημιουργίας ενός τυπικού προφίλ καταναλωτών οικιακού τομέα. Ωστόσο, ο οικιακός τομέας περιλαμβάνει χρήστες με διαφορετικά χαρακτηριστικά και πολλές φορές μη προβλέψιμες συνήθειες λειτουργίας των ηλεκτρικών συσκευών των κατοικιών, οπότε τα προφίλ που δημιουργούνται, στην πλειοψηφία τους, έχουν εφαρμογή στις περιοχές μελέτης (Seryak & Kissock 2003; Tsuji et al. 2004; Yao & Steemers 2005; Paatero & Lund 2006; Widén, Lundh, et al. 2009; Widén, Nilsson, et al. 2009; Asimakopoulos et al. 2012; Seo & Hong 2014). Στην παρούσα διατριβή επιλέχτηκε η δημιουργία προφίλ κατανάλωσης από πραγματικές μετρήσεις ηλεκτρικής κατανάλωσης μιας μέσης αστικής κατοικίας. Χαρακτηρίζεται ως μέση λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό ατόμων που κατοικούν, το εμβαδό και την οικονομική κατάσταση. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν την επιλογή είναι οι εξής:

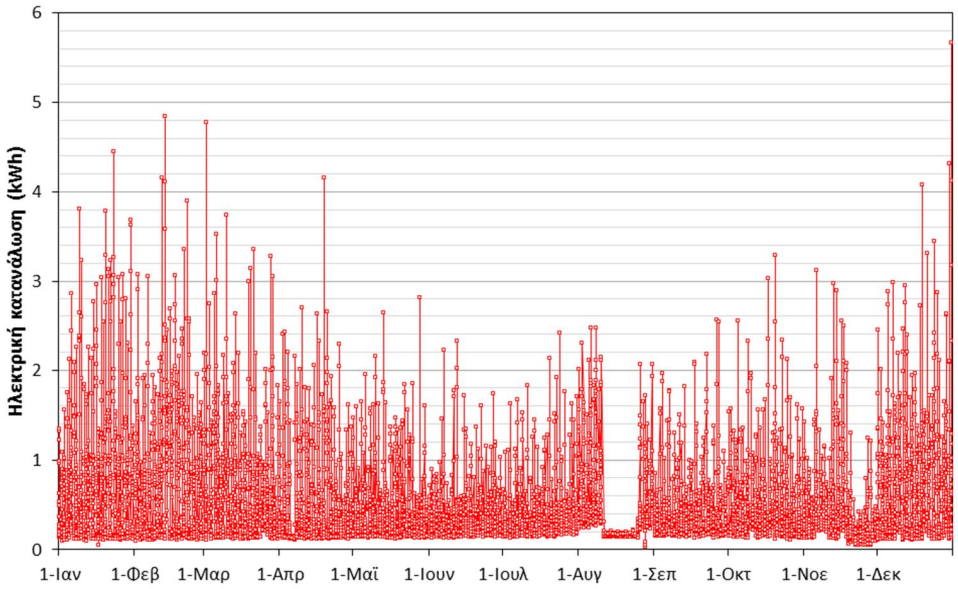
1. Η υιοθέτηση ενός εκ των προφίλ της βιβλιογραφίας, παρόλο που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως προφίλ που αντιπροσωπεύει μεγάλο εύρος οικιακών καταναλωτών, εν τούτοις οι μελέτες αυτές έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές περιοχές του πλανήτη και ως εκ τούτου τα παραγόμενα προφίλ δεν μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά των οικιακών καταναλωτών της χώρας μας.
2. Στην Ελλάδα δεν υπάρχουν εκτεταμένες μελέτες σχετικά με την τυποποίηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων σε κτήρια κατοικιών (Santamouris & Argiriou 1997; Santamouris et al. 2007; Asimakopoulos et al. 2012) και η εκκίνηση μιας εκτεταμένης μελέτης θα ξέφευγε από τους στόχους της παρούσας διατριβής.
3. Η διαστασιολόγηση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ με τη μέθοδο της προσομοίωσης πραγματοποιείται από τους μελετητές για συγκεκριμένο κατά περίπτωση καταναλωτή, σύμφωνα με τις ηλεκτρικές συσκευές που διαθέτει, ή πρόκειται να εγκαταστήσει, στην κατοικία που θα αυτονομηθεί ενεργειακά.
4. Οι καταναλωτές, που επιλέγουν ΑΠΕ για την κάλυψη των ηλεκτρικών τους καταναλώσεων, αποφεύγουν τη χρήση ενεργοβόρων συσκευών επιλέγοντας εναλλακτικές λύσεις, όπως για παράδειγμα τη χρήση ηλιακού συλλέκτη για τη θέρμανση νερού.
5. Οι οικιακοί καταναλωτές που ηλεκτροδοτούνται αποκλειστικά από υβριδικά συστήματα ΑΠΕ διαπιστώνεται ότι με την πάροδο του χρόνου προσαρμόζουν τις καταναλωτικές τους συνήθειες στο διαθέσιμο αιολικό και ηλιακό δυναμικό μειώνοντας την ασυμφωνία που παρατηρείται μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης (Πλωμαρίτης 2011).
6. Η διάθεση εξοπλισμού από το Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος για την καταγραφή των ηλεκτρικών καταναλώσεων, καθώς επίσης και ελεγχόμενη διαθέσιμη κατοικία προκειμένου να γίνονται άμεσα παρεμβάσεις σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή διακοπής επικοινωνίας των μετρητικών οργάνων, ήταν επίσης ένας από τους λόγους που οδήγησαν στην επιλογή των μετρήσεων.

Η καταγραφή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε σε κατοικία εμβαδού 80 m^2, η οποία κατοικείται από μια τετραμελή οικογένεια μέσου οικονομικού εισοδήματος. Η κατοικία βρίσκεται σε πολυκατοικία εντός του αστικού ιστού, στα βόρεια προάστεια της Αθήνας, στην Κλιματική Ζώνη Β. Σκοπός της καταγραφής ήταν η δημιουργία ενός προφίλ κατανάλωσης που να προσεγγίζει τις πραγματικές ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας. Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε για διάστημα ενός έτους χρησιμοποιώντας ένα αμπερόμετρο, το οποίο περιβάλλει το καλώδιο του γενικού ασφαλειοδιακόπτη στον πίνακα ηλεκτροδότησης της κατοικίας. Το αμπερόμετρο τροφοδοτούσε με μετρήσεις ένα μικρό πομπό, ο οποίος, με τη σειρά του, έστελνε τις τιμές στον κυρίως μετρητή. Οι μετρήσεις μεταδίδονταν σε πραγματικό χρόνο σε συμβατές δικτυακές πύλες μέσω ενός modem, παρέχοντας τη δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε μορφή πίνακα. Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιείτο ανά δεκάλεπτο (μέση τιμή δεκαλέπτου) και μετατρέπονταν σε ωριαίες τιμές, αφού η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος έγινε με ωριαίο βήμα. Καθώς το ζητούμενο δεν ήταν η ακρίβεια της καταγραφής, αλλά η εκτίμηση της χρονικής διακύμανσης της καταναλισκόμενης ενέργειας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας μιας κατοικίας, δεν κρίθηκε σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυση της διαδικασίας.

Προκειμένου να αποφευχθούν τυχαία γεγονότα ικανά να οδηγήσουν στην εμφάνιση υψηλής τιμής κατά την περίοδο κατανάλωσης ή μηδενικής κατανάλωσης (π.χ. διακοπή ηλεκτροδότησης), δημιουργήθηκε, για κάθε μήνα, το μέσο εβδομαδιαίο προφίλ του μήνα. Η δημιουργία του μέσου εβδομαδιαίου προφίλ μειώνει τις κορυφές της καμπύλης ηλεκτρικών καταναλώσεων προσεγγίζοντας ακόμη περισσότερο σε καταναλωτή που θα επέλεγε να ηλεκτροδοτηθεί από ΑΠΕ καθώς, όπως ειπώθηκε και προηγούμενα, οι καταναλωτές που συνειδητά επιλέγουν ΑΠΕ για την κάλυψη

των ηλεκτρικών τους καταναλώσεων παρουσιάζουν μειωμένες αιχμές ζήτησης (Πλωμαρίτης 2011). Από τις ημέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία της μέσης εβδομάδας εξαιρέθηκαν οι αργίες, οι εορτές και οι καλοκαιρινές διακοπές˙ οι περίοδοι αυτές δεν ακολουθούν τις ηλεκτρικές καταναλώσεις συνηθισμένων ημερών. Οι ημέρες οι οποίες αφαιρέθηκαν ήταν οι ημέρες των Χριστουγέννων, της Πρωτοχρονιάς, του Μεγάλου Σαββάτου, της Κυριακής του Πάσχα καθώς και οι ημέρες των καλοκαιρινών διακοπών, που, στη συγκεκριμένη καταγραφή, ήταν το διάστημα μεταξύ 11 και 25 Αυγούστου.

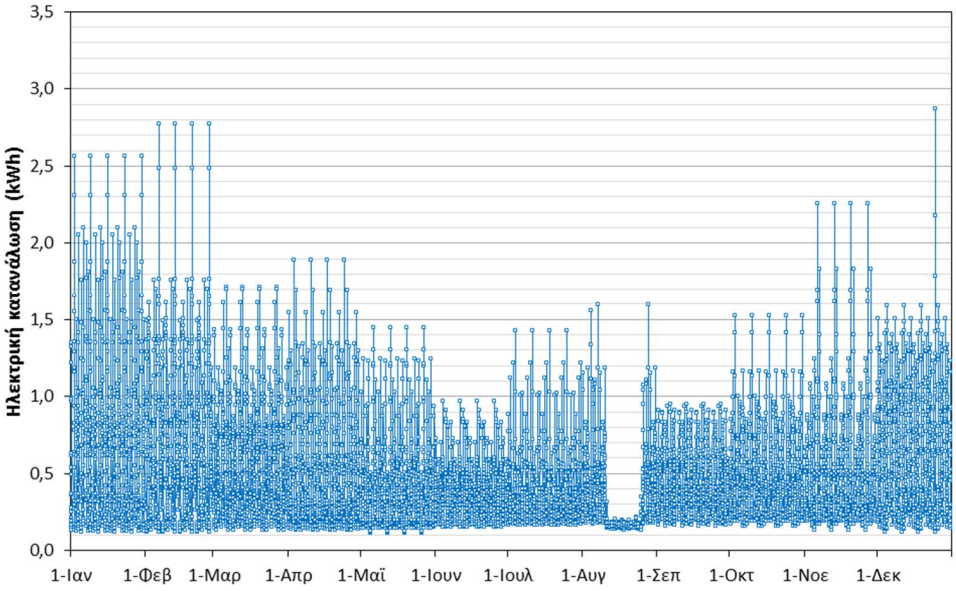
Στο Σχήμα 6.22 παρουσιάζονται οι ωριαίες τιμές κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προέκυψαν από τις αντίστοιχες μετρήσεις δεκαλέπτων. Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα αυτό, η μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας δεν ξεπερνάει τις 6 kWh, ενώ η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, στη διάρκεια του έτους καταγραφής, ήταν 4416 kWh.



Σχήμα** 6.22: **Ωραίες μετρήσεις κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για ένα έτος

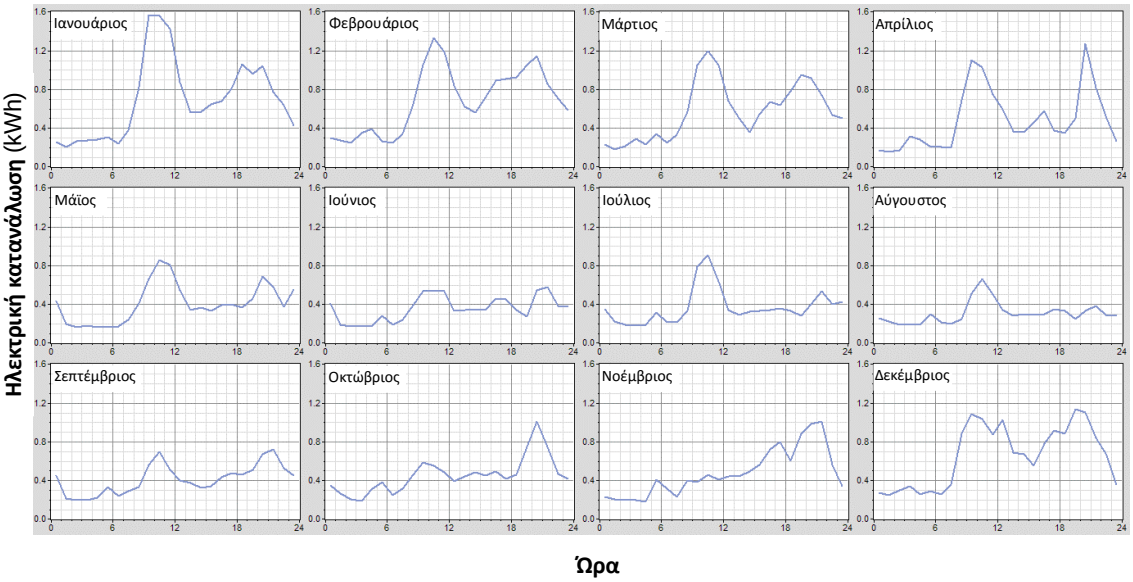
Σύμφωνα με τις μετρήσεις ηλεκτρικών καταναλώσεων της κατοικίας, η ετήσια ανηγμένη τιμή ηλεκτρικής κατανάλωσης είναι 55,2 kWh/m^2, τιμή που πλησιάζει τη μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (46,8 kWh/m^2) της Κλιματικής Ζώνης Β (Balaras et al. 2007), αν αναλογιστεί κανείς τη διαφορετικότητα που παρουσιάζουν οι κατοικίες και οι καταναλωτικές συνήθειες σε τόσο μεγάλο εύρος περιοχών. Ως προς την ενδοημερήσια κατανομή της ετήσιας καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το 47% καταναλώνεται τις ώρες 0:00-12:00 ενώ το τρίωρο με τις υψηλότερες τιμές κατανάλωσης είναι οι ώρες 06:00-12:00 όπου καταναλώνεται το 32% της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας (06:00-18:00) καταναλώνεται το 58% της ηλεκτρικής ενέργειας ενώ οι ώρες με τη μικρότερη κατανάλωση είναι μεταξύ 00:00 και 06:00 (15% της ετήσιας κατανάλωσης).

Η ετήσια χρονοσειρά του μέσου προφίλ κατανάλωσης της συγκεκριμένης κατοικίας προέκυψε από τη συνένωση των μέσων εβδομάδων κάθε μήνα του έτους, από τον Ιανουάριο έως και το Δεκέμβριο. Για κάθε μήνα η μέση εβδομάδα επαναλαμβανόταν 4 φορές, προκειμένου να δημιουργηθεί η χρονοσειρά του μήνα, ενώ κενά 5, 6 ή 7 ημερών που δημιουργήθηκαν καλύφθηκαν με επανάληψη της μέσης εβδομάδας στον ίδιο μήνα. Στη συνέχεια, αντικαταστάθηκαν οι ημέρες εορτών, αργιών και διακοπών με τις πραγματικές τιμές καταναλώσεων. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε το μέσο προφίλ κατανάλωσης της κατοικίας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.23.



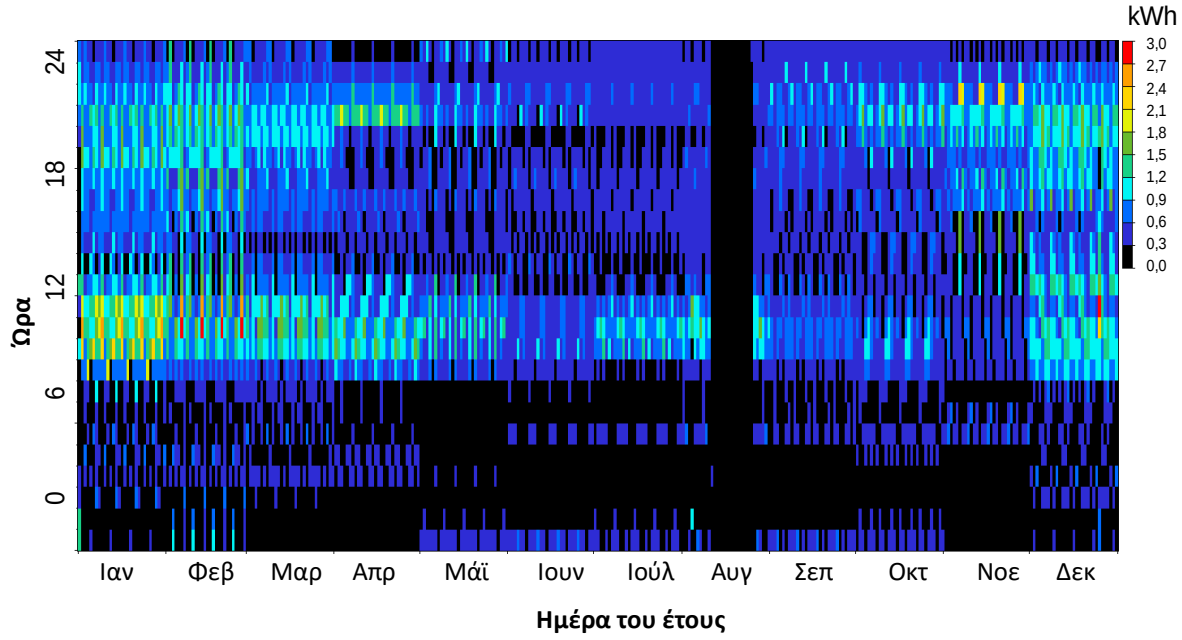
Σχήμα** 6.23: **Μέσο προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατοικίας

Από το Σχήμα 6.23 διαπιστώνεται ότι με την επεξεργασία στην οποία υποβλήθηκε το προφίλ κατανάλωσης της κατοικίας, δημιουργήθηκε ένα νέο προφίλ κατανάλωσης στο οποίο οι ετήσιες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια παρέμειναν σχεδόν αμετάβλητες, ενώ παράλληλα περικόπτονται οι τυχαίες τιμές της κατανάλωσης, οι οποίες δεν ήταν αντιπροσωπευτικές για τις αντίστοιχες περιόδους. Οι συνολικές ετήσιες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με το μέσο προφίλ, ανήλθαν στις 4287 kWh.



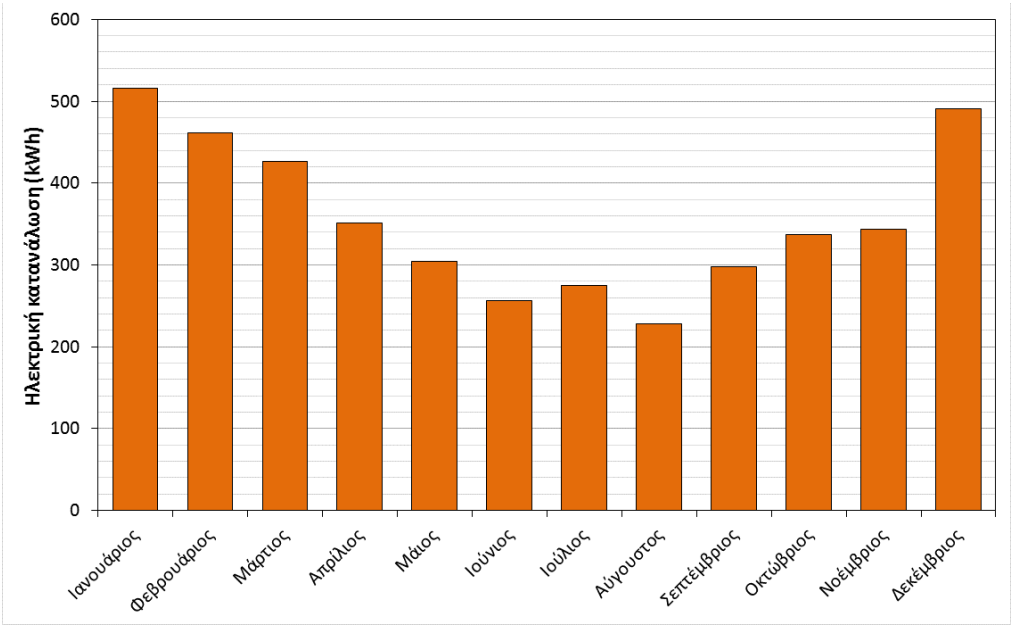
Σχήμα** 6.24: **Καμπύλες μέσης ενδοημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατοικίας

Στο Σχήμα 6.24 παρουσιάζεται η μέση ενδοημερήσια κατανάλωση κάθε μήνα του έτους. Διαπιστώνεται ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των καμπυλών μεταξύ των εποχών του έτους με τους χειμερινούς μήνες να εμφανίζουν διπλό μέγιστο, ένα τις πρωϊνές ώρες, το πρωτεύον, και ένα τις απαγευματινές ώρες, το δευτερεύον, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες μόνο ένα μέγιστο το οποίο και εμφανίζεται τις πρωϊνές ώρες.



Σχήμα** 6.25: **Διάγραμμα πυκνότητας ημερήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης κατοικίας

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6.25 παρουσιάζεται ο χρωματικός χάρτης των ωριαίων καταναλώσεων κάθε ημέρας του έτους. Με τη βοήθεια της χρωματικής κλίμακας εντοπίζονται με ευκολία οι περιοχές υψηλής κατανάλωσης (ερυθρό χρώμα) και οι περιοχές χαμηλής κατανάλωσης (μαύρο χρώμα) μέσα στο έτος.



Σχήμα** 6.26: **Ενδοετήσια μεταβολή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας

Τέλος, στο Σχήμα 6.26 παρουσιάζεται η ενδοετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χαρακτηρίζεται από μέγιστα τα οποία εμφανίζονται στη διάρκεια των χειμερινών μηνών που είναι και οι μήνες με τη μικρότερη διάρκεια ημέρας. Επίσης, από το ίδιο σχήμα διαπιστώνεται ότι η μέση μηνιαία κατανάλωση πλησιάζει τις 360 kWh.

6.6 Μεθοδολογία

Για την αναλυτική προσομοίωση του υβριδικού συστήματος αναπτύχθηκε αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει, για κάθε δεδομένο χρονικό βήμα, τη ροή ενέργειας σε όλα τα επιμέρους τμήματα του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις λειτουργικές τους παραμέτρους, όπως αυτές καταγράφονται στην ενότητα 6.3. Τα απαραίτητα δεδομένα εισαγωγής, που απαιτούνται για τη λειτουργία του αλγορίθμου, περιλαμβάνουν αναλυτικές τιμές για το διάστημα στο οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση των παραμέτρων:

- ταχύτητας του ανέμου στο ύψος της πτερωτής της Α/Γ,
- ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο,
- θερμοκρασίας αέρα, ατμοσφαιρικής πίεσης και σχετικής υγρασίας,
- κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω πληροφορίες, καθορίζονται οι αρχικές διαστάσεις της Α/Γ, της Φ/Β μονάδας και των συσσωρευτών.

Ειδικότερα, η ονομαστική ισχύς, $P_{w\,0}$, της Α/Γ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{E_d}{\Delta t \cdot CF_w \cdot \eta_{UPS}} \le P_{w_0} \le \frac{E_d}{\Delta t \cdot CF_w \cdot \eta_{tot}} \tag{6.42}$$

όπου: η_{UPS}, ο βαθμός απόδοσης του σταθεροποιητή τάσης στην περίπτωση όπου η Α/Γ αποδίδει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια απευθείας στην κατανάλωση και
η_{tot}, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του εξοπλισμού ρύθμισης ισχύος και των ηλεκτρικών αγωγών μεταφοράς, όταν η παραγόμενη ενέργεια της Α/Γ οδηγείται στην κατανάλωση μέσω των συσσωρευτών.
Δt, το χρονικό διάστημα της ανάλυσης (h),
CF_w, ο συντελεστής φορτίου της μηχανής, ο οποίος υπολογίζεται σε συνάρτηση με την τεχνική διαθεσιμότητα, Δ, και το συντελεστή ισχύος, ω, ως:

$$\mathrm{CF_w} = \Delta \cdot \omega \tag{6.43}$$

Ο συντελεστής ισχύος της Α/Γ εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό τής περιοχής εγκατάστασης και την καμπύλη λειτουργίας της και υπολογίζεται από τη σχέση:

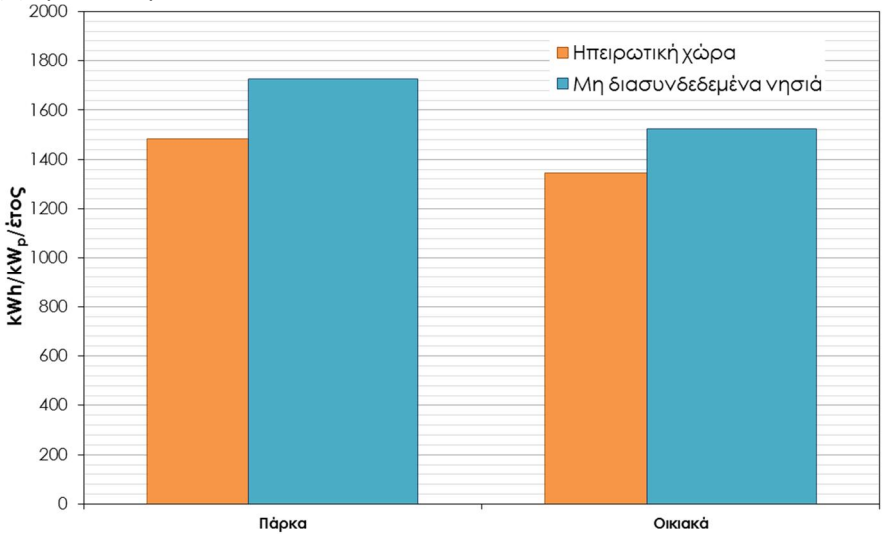
$$\omega = \int_{V_C}^{V_f} \frac{P_w(V)}{P_{w_0}} \cdot f(V) \cdot dV \tag{6.44}$$

όπου V_f και V_c, οι ταχύτητες (m/s) έναρξης και διακοπής λειτουργίας της Α/Γ και $f(V)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τιμών της ταχύτητας του ανέμου για την περίοδο της ανάλυσης.

Αντίστοιχα, η αρχική ονομαστική ισχύς της Φ/Β μονάδας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{E_d}{\Delta t \cdot CF_{PV} \cdot \eta_{inv}} \le z \cdot P^{+}{}_{\mathrm{mod}} \le \frac{E_d}{\Delta t \cdot CF_{PV} \cdot \eta_{tot}} \tag{6.45}$$

όπου CF_{PV} ο μέσος αναμενόμενος συντελεστής φορτίου της Φ/Β μονάδας. Σύμφωνα με στοιχεία του ελληνικού Συνδέσμου Φωτοβολταϊκών Εταιρειών (ΣΕΦ), η μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση των Φ/Β εγκαταστάσεων στην Ελλάδα είναι 1480 kWh/kW$_p$ (Σχήμα 6.27), δηλαδή μέσος ετήσιος συντελεστής φορτίου περίπου 17%.



***Σχήμα** 6.27 : **Μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση Φ/Β πάρκων στην Ελλάδα** (**ΣΕΦ** 2015)*

Για τον υπολογισμό της αρχικής χωρητικότητας των συσσωρευτών χρησιμοποιείται η σχέση 6.19, λαμβάνοντας υπόψη την ποσότητα της μέγιστης αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας, το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών, καθώς επίσης και το βαθμό απόδοσής τους.

Έχοντας επιλέξει τον τύπο της Α/Γ, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου, τον τύπο των συσσωρευτών και προσδιορίσει τις αρχικές διαστάσεις τους, πραγματοποιείται παραμετρική ενεργειακή ανάλυση του υβριδικού συστήματος. Για κάθε συνδυασμό Α/Γ, Φ/Β μονάδας και συσσωρευτών, ο αλγόριθμος υπολογίζει με ωριαίο βήμα την ενεργειακή παραγωγή και λαμβάνοντας υπόψη τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τη συγκεκριμένη ώρα, διαχειρίζεται την ενέργεια του υβριδικού συστήματος ελέγχοντας εάν καλύπτεται η στιγμιαία ζήτηση. Σε περίπτωση που εμφανισθεί έστω και μία φορά έλλειμα ενέργειας, τότε αυξάνονται οι διαστάσεις των συσσωρευτών εντός των ορίων που έχει θέσει ο χρήστης και επαναλαμβάνεται η προσομοίωση από την αρχή. Εάν και πάλι δεν επιτευχθεί πλήρης κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του καταναλωτή, τότε αυξάνεται σταδιακά ο αριθμός των πλαισίων˙ εάν και πάλι δεν επιτευχθεί αυτονομία, αυξάνεται και η ονομαστική ισχύς της Α/Γ. Με τον τρόπο αυτό, καθορίζεται ο συνδυασμός Α/Γ, Φ/Β πλαισίων και συσσωρευτών που μπορεί να εξασφαλίσει πλήρη ενεργειακή αυτονομία.

Λαμβάνοντας υπόψη τις καταστάσεις λειτουργίας ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος στη γενικότερή του μορφή (όπως παρουσιάσθηκαν στην ενότητα 6.2, καθώς επίσης και την ενεργειακή ανάλυση της ενότητας 6.3), ο αλγόριθμος κατά τη λειτουργία του υβριδικού συστήματος διαχειρίζεται την ενέργεια ως εξής:

1. Εάν η παραγωγή της Α/Γ, μέσω του σταθεροποιητή τάσης, είναι μεγαλύτερη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή:

$$P_w(t) > \frac{P_d(t)}{\eta_{UPS}(t)} \tag{6.46}$$

τότε, η περίσσεια ενέργειας:

$$\Delta P_{res}(t) = \eta_{cc}(t) \cdot \left(\eta_{rec}(t) \cdot \left(P_w(t) - \frac{P_d(t)}{\eta_{UPS}(t)} \right) + P_{PV}(t) \right) \quad (6.47)$$

αποθηκεύεται μέσω του ανορθωτή (με βαθμό απόδοσης η_{rec}) και του ρυθμιστή φόρτισης (με βαθμό απόδοσης η_{cc}) στους συσσωρευτές. Στην περίπτωση όπου οι συσσωρευτές δεν μπορούν να αποθηκεύσουν το σύνολο της περίσσειας ενέργειας, τότε η υπόλοιπη ποσότητα οδηγείται σε καταναλώσεις χαμηλότερης προτεραιότητας.

2. Εάν η παραγωγή της Α/Γ είναι μικρότερη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά το έλλειμα ενέργειας μπορεί να καλυφθεί από την παραγωγή της Φ/Β μονάδας, δηλαδή:

$$P_w(t) \le P_d(t) \quad (6.48)$$

και

$$\eta_{UPS}(t) \cdot P_w(t) + \eta_{inv}(t) \cdot P_{PV}(t) \ge P_d(t) \quad (6.49)$$

τότε, το έλλειμμα ενέργειας καλύπτεται από την παραγωγή των Φ/Β πλαισίων μέσω του αντιστροφέα (με βαθμό απόδοσης η_{inv}). Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή της Φ/Β μονάδας:

$$\Delta P_{res}(t) = \eta_{cc}(t) \cdot \left(P_{PV}(t) - \frac{P_d(t) - \eta_{UPS}(t) \cdot P_w(t)}{\eta_{INV}(t)} \right) \quad (6.50)$$

αποθηκεύεται στους συσσωρευτές μέσω του ρυθμιστή φόρτισης (με βαθμό απόδοσης η_{cc}).

3. Εάν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τον καταναλωτή είναι μεγαλύτερη από το σύνολο της ενεργειακής παραγωγής της Α/Γ και της Φ/Β μονάδας, δηλαδή:

$$P_d(t) \ge \eta_{UPS}(t) \cdot P_w(t) + \eta_{INV}(t) \cdot P_{PV}(t) \quad (6.51)$$

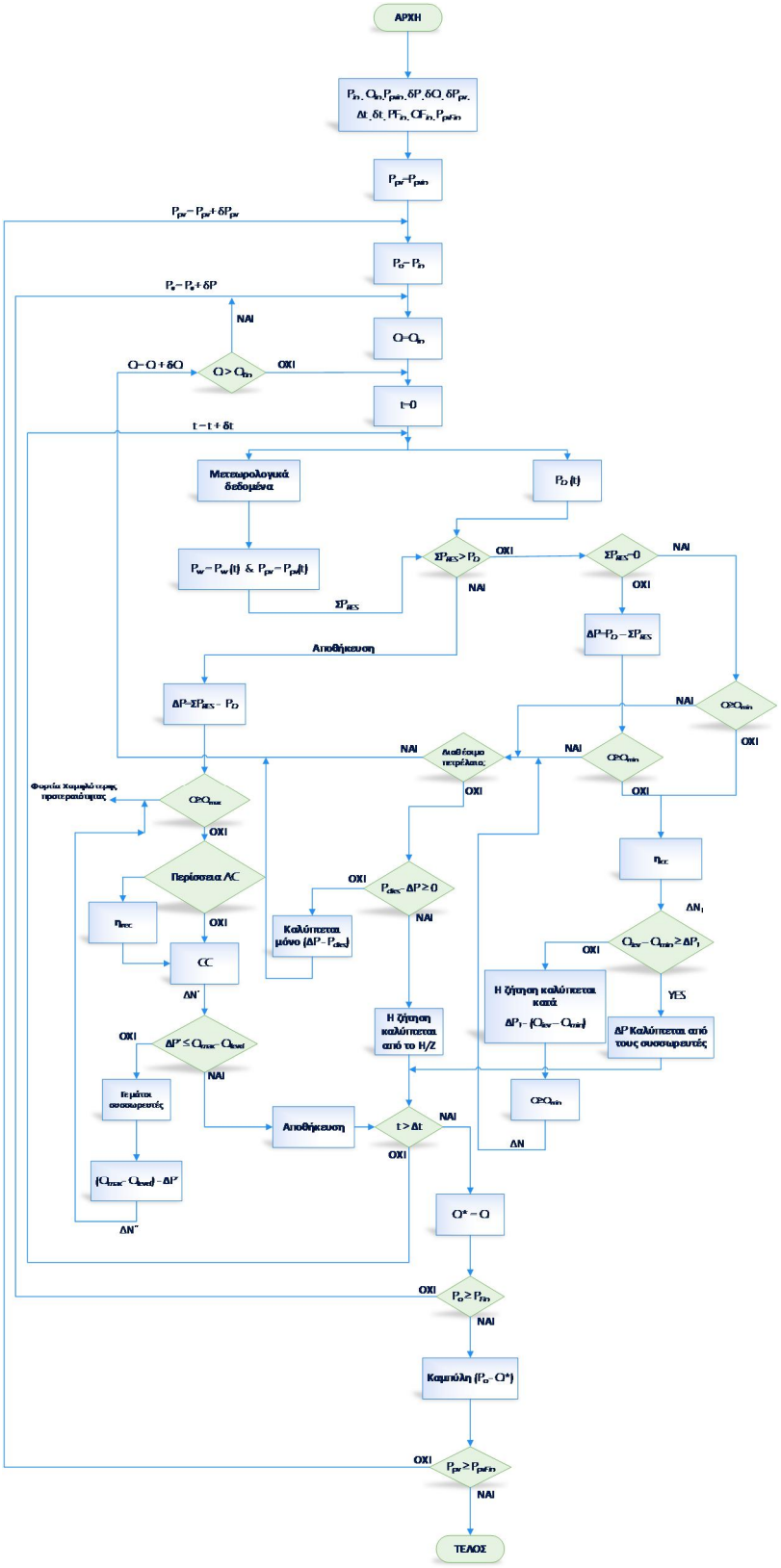
τότε, το έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας:

$$\Delta P_d(t) = P_d(t) - \eta_{UPS}(t) \cdot P_w(t) + \eta_{INV}(t) \cdot P_{PV}(t) \quad (6.52)$$

καλύπτεται από τους συσσωρευτές, έως την ποσότητα που επιτρέπει η παραμένουσα ενέργεια στους συσσωρευτές και υπό την προϋπόθεση ότι δεν θα ξεπερασθεί το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισής τους. Στην περίπτωση όπου η ηλεκτρική ενέργεια, που μπορούν να αποδώσουν οι συσσωρευτές, είναι μικρότερη του ελλείμματος ενέργειας που παρουσιάσθηκε, τότε επαναπροσδιορίζονται οι διαστάσεις του υβριδικού συστήματος και ο αλγόριθμος ξεκινάει πάλι από την αρχή.

Στο Σχήμα 6.28, στο αναλυτικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου, καταγράφεται η διαχείριση της ενέργειας του υβριδικού συστήματος ανάλογα με τις καταστάσεις λειτουργίας του.

Για κάθε έναν από τους συνδυασμούς Α/Γ, Φ/Β μονάδας και συσσωρευτών για τους οποίους το υβριδικό σύστημα επιτυγχάνει πλήρη αυτονομία, πραγματοποιείται οικονομική ανάλυση όπως φαίνεται στην ενότητα 6.4 και προσδιορίζονται τα οικονομικά χαρακτηριστικά του συστήματος καθώς και το κόστος παραγωγής της ενέργειας για τη συγκεκριμένη επιλογή.



Σχήμα** 6.28: **Διάγραμμα ροής προσομοίωσης υβριδικού συστήματος

Βιβλιογραφία

100%RE, 2015. World Map of 100% RE Projects. http://go100re.net/map/.

Betzios, G., 2001. The hybrid system of Kythnos. One year operation experience from June 2000-2001. In *Int. Conference on Renewable Energies for Islands*. Chania, Crete, Greece, pp. 1–4.

Calafell, D.O. & Hunnt, B.D., 1977. Determination of average ground reflectivity for solar collectors. *Solar Energy*, 19(1), pp.87–89.

Deline, C., Meydbray, J., Donovan, M. & Forrest, J., 2012. *Photovoltaic Shading Tested for Module-Level Power Electronics*,

Green_Agenda, 2011. Αϊ Στράτης: το πρώτο πράσινο νησί. http://www.greenagenda.gr/?p=161.

Hsu, S., Meindl, E. & Gilhousen, D.B., 1994. Determining the power-law wind-profile exponent under near-neutral stability conditions at sea.

IEA, 2009. *World Energy Outlook 2009*, Paris, France.

IEA, 2011. *World Energy Outlook 2011*, Paris, France.

Johnson, G.L., 2006. *Wind energy systems* Electronic., Manhattan, KS: Prentice-Hall (NJ).

Jørgensen, P.J., Hermansen, S., Johnsen, A. & Nielsen, J.P., 2007. Samsø–a renewable energy island. 10 years of development and evaluation. *Samsø: Samsø Energy Academy*.

Kalafatis, E., Skittides, F. & Kaldellis, J.K., 2008. Investigating the relation between the reliability and the technical availability of wind energy applications. In *Int. Conference of Medpower 2008*.

Kaldellis, J.K., Kapsali, M. & Kavadias, K.A., 2014. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. *Renewable Energy*, 66, pp.612–624.

Kaldellis, J.K. & Kavadias, K.A., 2001. Optimal wind-hydro solution for Aegean Sea islands' electricity-demand fulfilment. *Applied Energy*, 70(4), pp.333–354.

Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A., Korbakis, G. & Vlachou, D.S., 2004. The impact of local ambient conditions on the energy production of contemporary wind power stations. In *7th Panhellenic Conference of Meteorology*. Nicosia, Cyprus: Climatology and Atmospheric Physics.

Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A. & Koronakis, P.S., 2007. Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1), pp.57–77.

Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A. & Vlachou, D.S., 2002. Long-term evolution of PPC wind parks operation in Aegean Archipelago remote islands. In *EuroSun 2002 The 4th ISES Europe Solar Congress" Renewable Energy for Local Communities of Europe" (Toward Rio+10)*. Bologna, Italy, p. W140.

Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A. & Zafirakis, D., 2009. Integrated electrification solution for remote islands based on wind-PV hybrid system. In *European Wind Energy Conference and Exhibition*. Marseille, France: European Wind Energy Association.

Kaldellis, J.K., Kondili, E.M. & Filios, A.E., 2006. Sizing a hybrid wind-diesel stand-alone system on the basis of minimum long-term electricity production cost. *Applied Energy*, 83(12), pp.1384–1403.

Kaldellis, J.K., Thiakoulis, T. & Vlachou, D.S., 1999. Autonomous energy systems for remote islands based on renewable energy sources. In *European Wind Energy Conference and Exhibition*. Nice, France: European Wind Energy Association, pp. 315–319.

Kaldellis, J.K., Zafirakis, D. & Kavadias, K.A., 2009. Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), pp.378–392.

Kaplanis, S. & Kaplani, E., 2011. Energy performance and degradation over 20years performance of BP c-Si PV modules. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(4), pp.1201–1211.

Katsaprakakis, D.A., Christakis, D.G., Pavlopoylos, K., Stamataki, S., Dimitrelou, I., Stefanakis, I., Spanos, P. & Al, D., 2012. Introduction of a wind powered pumped storage system in the isolated insular power system of Karpathos–Kasos. *Applied Energy*, 97, pp.38–48.

Kavadias, K.A., 2012. Stand-Alone, Hybrid Systems. In A. Sayigh, ed. *Comprehensive Renewable Energy*. Ocford: Elsevier, pp. 623–656.

Kavadias, K.A., Gitersos, C., Zafirakis, D. & Kaldellis, J.K., 2011. Optimum photovoltaic angle estimation for stand-alone installations of south Europe on the basis of experimental measurements. In *Int. Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2011)*. Ischia, Italy.

Kruse, C., Lowalt, H.J. & Maass, K., 1991. Eight Years Experience with the 300 KWp Solar Power Plant on the Island Pellworm (FRG) and the Extension to A 1.25 MW Hybrid System (Additional 300 KWp Photovoltaic and 600 kW Wind Energy). In *Tenth EC Photovoltaic Solar Energy Conference*. Springer, pp. 724–727.

Legros, G., Havet, I., Bruce, N. & Bonjour, S., 2009. *the Energy Access Situation in Developing Countries*, Washington, DC.

Liu, B.Y.H. & Jordan, R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, pp.1–19.

Mohandes, M., Rehman, S. & Rahman, S.M., 2011. Estimation of wind speed profile using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Applied Energy*, 88(11), pp.4024–4032.

Neves, D., Silva, C. a. & Connors, S., 2014. Design and implementation of hybrid renewable energy systems on micro-communities: A review on case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, pp.935–946.

Peterson, E.W. & Hennessey Jr., J.P., 1977. On the use of power laws for estimates of wind power potential. *Journal of Applied Meteorology*, 17, pp.390–394.

Selosse, S., Ricci, O., Garabedian, S. & Maizi, N., 2014. Reunion Island energy autonomy objective by 2030. In *EcoMod2014, International Conference on Economic Modeling*.

Strauss, P., Kleinkauf, W., Reekers, J., Cramer, G. & Betzios, G., 2001. Kythnos Island- 19 Years Experience of Renewable Energy Integration. In *International Conference on Renewable Energies for Islands*. Chania, Crete, Greece.

Takada, M. & Fracchia, S., 2007. *A Review of Energy in National MDG Reports*, Washington, DC.

Ulleberg, Ø., Nakken, T. & Eté, A., 2010. The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(5), pp.1841–1852.

ΔΕΗ Ανανεώσιμες, 2015. Ικαρία. Το αύριο της ενέργειας, σήμερα, www.ppc.gr.

Εργ. Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, 2015, Tilos Project. www.sealab.gr.

Καλδέλλης, Ι.Κ. & Καββαδίας, Κ.Α., 2000. *Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας*, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης.

Καλδέλλης, Ι.Κ. & Καββαδίας, Κ.Α., 2005. *Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας (Αιολική Ενέργεια – Μικρά Υδροηλεκτρικά)*, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης.

Μεταξάς, Δ. & Μπαρτζώκας, Α., 2012. *Εισαγωγή στη δυναμική μετεωρολογία*, Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.

ΣΕΦ, 2015. *Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2014*, Αθήνα.

Φραγκιαδάκης, Ι.Ε., 2009. *Φωτοβολταϊκά συστήματα* 3η έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.

7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Προσομοίωση Υβριδικών Συστημάτων ΑΠΕ

7.1 Εισαγωγή

Στο Κεφαλαίο αυτό διερευνώνται οι επιλογές κάλυψης των ηλεκτρικών φορτίων απομονωμένου οικιακού καταναλωτή συνδυάζοντας δύο μορφές ΑΠΕ. Στην ανάλυση εξετάζεται η επιλογή αξιοποίησης της ηλιακής σε συνδυασμό με την αιολική ενέργεια μέσω ενός υβριδικού σταθμού παραγωγής, ο οποίος αποτελείται από Α/Γ και Φ/Β πλαίσια, ο οποίος με τη βοήθεια κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης, έχει τη δυνατότητα πλήρους κάλυψης της ζήτησης ενέργειας σε κάθε χρονική στιγμή. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με ωριαίο βήμα, με την υπόθεση ότι κατά τη διάρκεια μιας ώρας δεν αναμένεται σημαντική μεταβολή των ενεργειακών μεγεθών.

Για τον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής της εκάστοτε Φ/Β μονάδας, αξιοποιούνται οι τιμές θερμοκρασίας αέρα, ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας των ΤΜΕ που δημιουργήθηκαν στο Κεφάλαιο 4 στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Ο υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής της Α/Γ υπολογίζεται για τρία διαφορετικά προφίλ (χαμηλού, μέσου και υψηλού αιολικού δυναμικού) ωριαίων τιμών ταχύτητας του ανέμου. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του αέρα αξιοποιούνται οι τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης των ΤΜΕ ανάλογα με την περιοχή στην οποία πραγματοποιείται η προσομοίωση. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα διερεύνησης διαφορετικών σεναρίων, τα οποία δημιουργούνται από το συνδυασμό ηλιακού δυναμικού σε διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας και διαφορετικών περιπτώσεων αιολικού δυναμικού που δύναται να εμφανίζονται σε κάθε περιοχή.

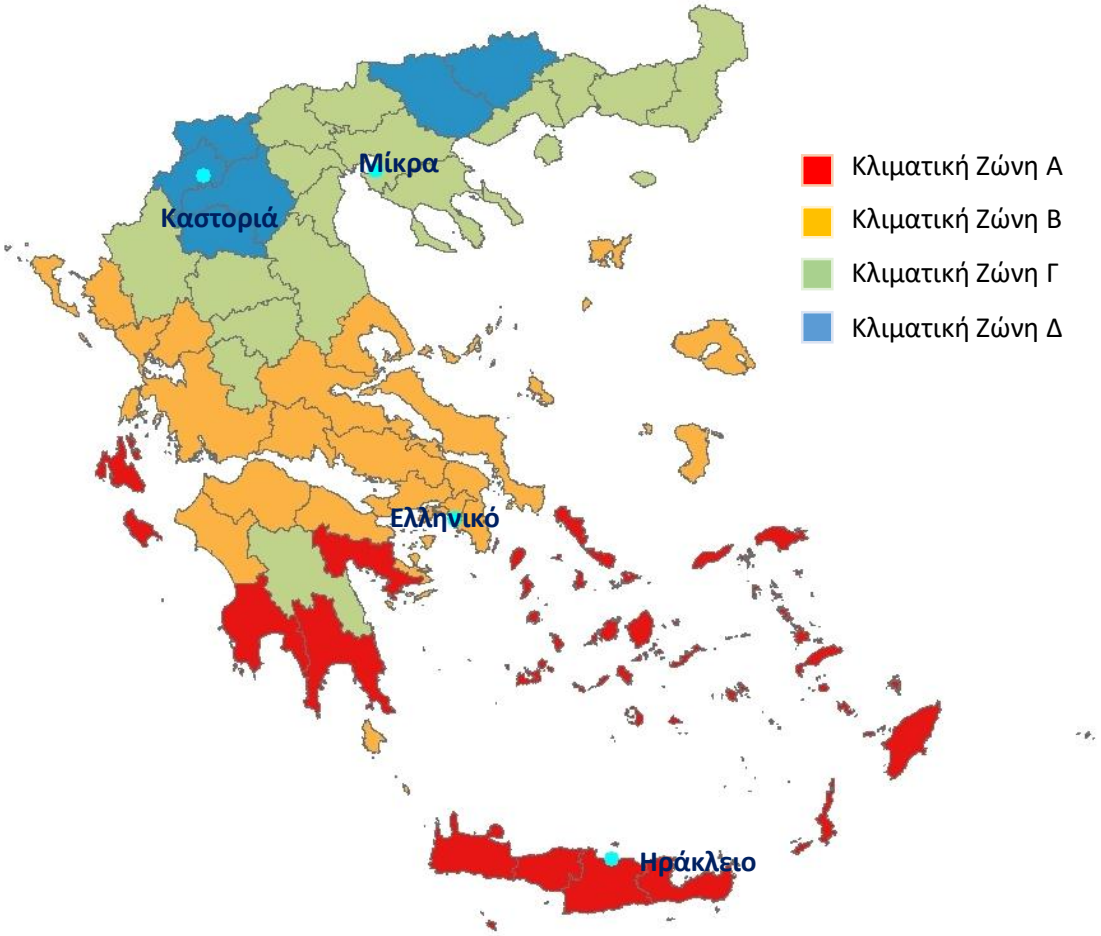
Η ανάλυση των αποτελεσμάτων διερευνάται σε δύο ανεξάρτητες κατευθύνσεις. Η πρώτη αφορά την ενεργειακή συμπεριφορά των διαφορετικών υβριδικών συστημάτων και η δεύτερη την αξιολόγηση των οικονομικών αποτελεσμάτων, με βασικό κριτήριο αξιολόγησης το ελάχιστο κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Εκτός από την παραδοχή που εμπεριέχεται στην προσομοίωση του υβριδικού συστήματος σε ωριαίο βήμα, στην παρούσα ανάλυση εμπεριέχονται υποθέσεις οι οποίες είναι απαραίτητες στην παραγωγή αποτελεσμάτων και ακολουθούνται από όλο σχεδόν το σύνολο των επιστημονικών εργασιών στον τομέα θεωρητικής προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων. Στις υποθέσεις αυτές συμπεριλαμβάνονται:

- Το δυναμικό των ΑΠΕ (ηλιακή και αιολική ενέργεια) ακολουθεί συγκεκριμένη ωριαία μεταβολή (προφίλ) που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση.

- Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με το βήμα που περιγράφει το επιλεγμένο προφίλ ζήτησης.
- Οι οικονομικοί δείκτες (πληθωρισμός, κόστος κεφαλαίου κ.λπ.), που χρησιμοποιούνται για την οικονομική αξιολόγηση, διατηρούνται σταθεροί θεωρώντας ότι αποτελούν τη μέση τιμή της περιόδου κατά την οποία πραγματοποιείται η προσομοίωση.
- Δεν λαμβάνεται υπόψη τυχούσα διακοπή λειτουργίας του συστήματος για τεχνικές εργασίες που πιθανόν να προκύψουν (π.χ. περιοδικός έλεγχος συντήρησης) καθώς οι συγκεκριμένες εργασίες μπορούν να προγραμματίζονται σε περιόδους νηνεμίας και έλλειψης ηλιοφάνειας, ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις τους στην ενεργειακή παραγωγή.
- Ο τεχνικός εξοπλισμός που επιλέγεται έχει χαρακτηριστικά λειτουργίας και ενεργειακή συμπεριφορά όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.

Είναι κατανοητό ότι οι παραπάνω υποθέσεις μπορούν να αρθούν με την τροποποίηση των δεδομένων εισόδου στον αλγόριθμο προσομοίωσης, παρέχοντας τη δυνατότητα διεξαγωγής αποτελεσμάτων για διαφορετικές επιλογές εξοπλισμού, διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και διαφορετικές περιπτώσεις καταναλωτών (διαφορετικά ενεργειακά προφίλ).



Σχήμα** 7.1 : **Θέσεις επιλεγέντων σταθμών που χρησιμοποιούνται κατά την ενεργειακή-οικονομική ανάλυση υβριδικών συστημάτων

Καθώς ο αριθμός των περιοχών για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμα ΤΜΕ από την παρούσα διατριβή είναι μεγάλος, επιλέγησαν για την προσομοίωση τέσσερεις περιοχές. Ως κριτήριο επιλογής αποτέλεσαν οι διαφορετικές κλιματικές ζώνες, όπως αυτές έχουν ορισθεί από τον Κανονισμό

Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ), επιλέγοντας ένα ΤΜΕ από κάθε ζώνη (Σχήμα 7.1). Επίσης, κατά την επιλογή των σταθμών επιλέγησαν σταθμοί σε μεγάλες πόλεις, ούτως ώστε τα αποτελέσματα να αφορούν σε μεγαλύτερο αριθμό κατοίκων που εν δυνάμει θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής. Οι σταθμοί, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση, είναι οι σταθμοί Καστοριάς, Μίκρας, Ελληνικού και Ηρακλείου Κρήτης.

7.2 Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης

7.2.1 Ενεργειακή παραγωγή Φ/Β μονάδας

Η επιλογή της κλίσης τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων αποτέλεσε μία εκ των παραμέτρων που διερευνήθηκαν, καθώς η μέγιστη ενεργειακή παραγωγή επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλιοστατών, δηλαδή βάσεων με δυνατότητα μεταβολής της κλίσης των Φ/Β πλαισίων σε δύο άξονες (ανατολή-δύση και βορρά-νότο). Οι συγκεκριμένες βάσεις μεταβάλλουν την κλίση τους καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας επιτυγχάνοντας κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων. Ωστόσο, η επιλογή τους δεν ενδείκνυται σε μικρές εγκαταστάσεις, καθώς, σε σχέση με τις σταθερές βάσεις, έχουν αυξημένο κόστος εγκατάστασης, μικρότερη αντοχή σε ανεμοπίεση, μεγαλύτερο κόστος συντήρησης, μειωμένη αξιοπιστία, αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης βλάβης και απαιτούν μεγαλύτερη διαθέσιμη έκταση για την εγκατάσταση της Φ/Β μονάδας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2, ειδικότερα στις εγκαταστάσεις Φ/Β συστημάτων σε στέγες, οροφές κτηρίων ή πλησίον κτηρίων, η επιλογή των βάσεων μεταβλητού βήματος απαιτεί μεγαλύτερη διαθέσιμη έκταση και αυξάνει την οπτική όχληση που πιθανόν να προκαλεί στους κατοίκους των γειτονικών περιοχών η εγκατάσταση κατασκευών μεγάλου όγκου.

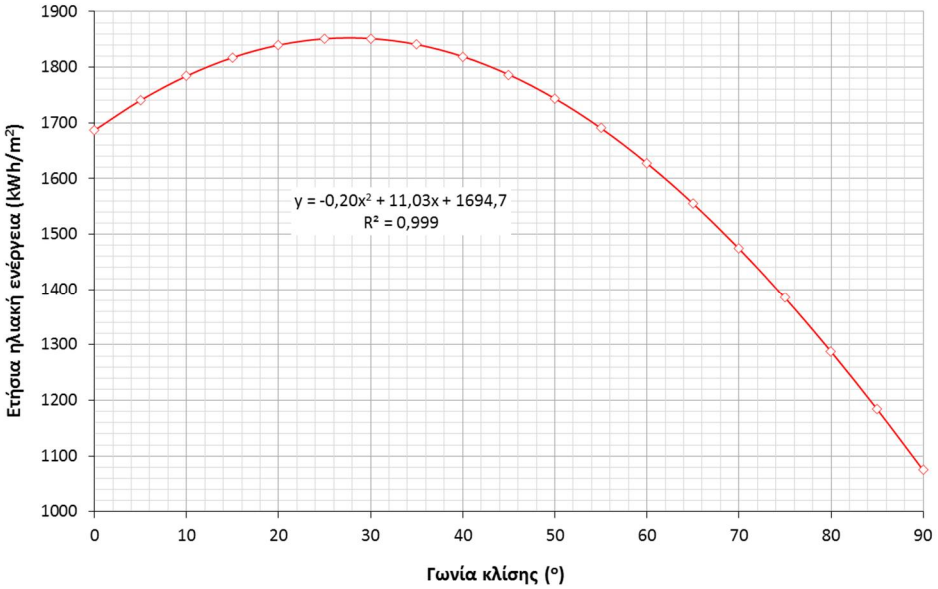
***Πηγή**: www.solar-motors.com*

Πηγή: www.vwmin.org

***Πηγή**: www.aurorasolarenergy.com*

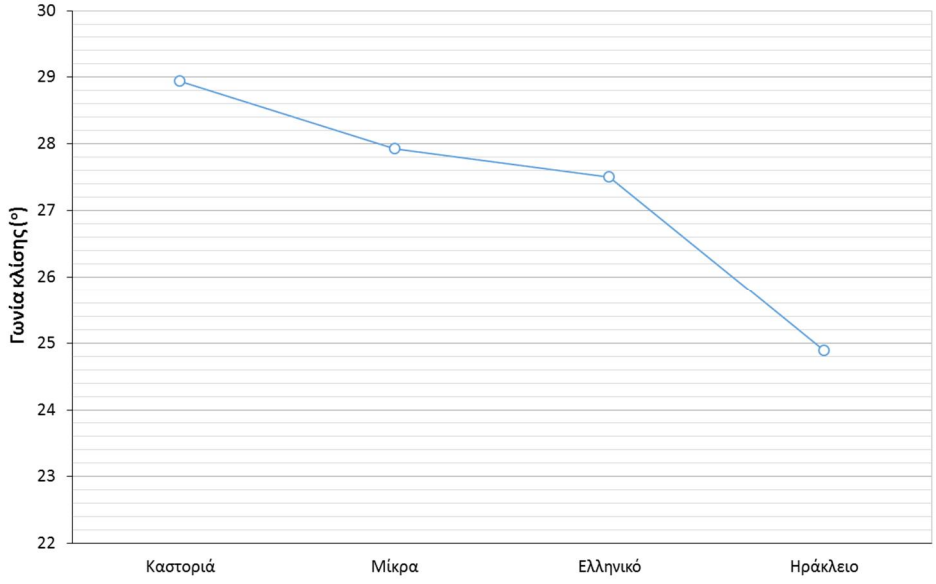
***Πηγή**: www.ucs-renewables.co.uk*

Σχήμα** 7.2: **Φωτογραφίες εγκαταστάσεων Φ/Β μονάδων σε ηλιοστάτες (αριστερά) και σε βάσεις σταθερής κλίσης (δεξιά)



Σχήμα** 7.3: **Μεταβολή της ετήσιας ηλιακής ενέργειας για διαφορετικές τιμές τής γωνίας κλίσης Φ/Β πλαισίων στην περιοχή του Ελληνικού

Για την εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων σε βάσεις σταθερής κλίσης, απαιτείται η επιλογή της γωνίας που παρέχει τη μέγιστη ετήσια ενεργειακή παραγωγή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι επιφάνειες των Φ/Β έχουν νότιο προσανατολισμό, η βέλτιστη κλίση εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εγκατάστασης. Χρησιμοποιώντας το ισοτροπικό μοντέλο υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες και αξιοποιώντας τις τιμές ηλιακής ακτινοβολίας των ΤΜΕ, υπολογίζεται η αναμενόμενη ηλιακή ενέργεια σε διαφορετικές γωνίες κλίσης των βάσεων των Φ/Β πλαισίων. Σύμφωνα με το Σχήμα 7.3, για την περιοχή του Ελληνικού η ετήσια ηλιακή ενέργεια, που δέχεται μια επιφάνεια, κυμαίνεται από 1075 έως 1852 kWh/m^2, ανάλογα με την κλίση της επιφάνειας. Η κλίση, που παρέχει μέγιστη ετήσια ηλιακή ενέργεια, βρίσκεται μεταξύ 25^o και 30^o, με βέλτιστη κλίση, σύμφωνα με το δευτεροβάθμιο πολυώνυμο παλινδρόμησης για την προσέγγιση της συγκεκριμένης μεταβολής (Σχήμα 7.3), τις 27,5^o.



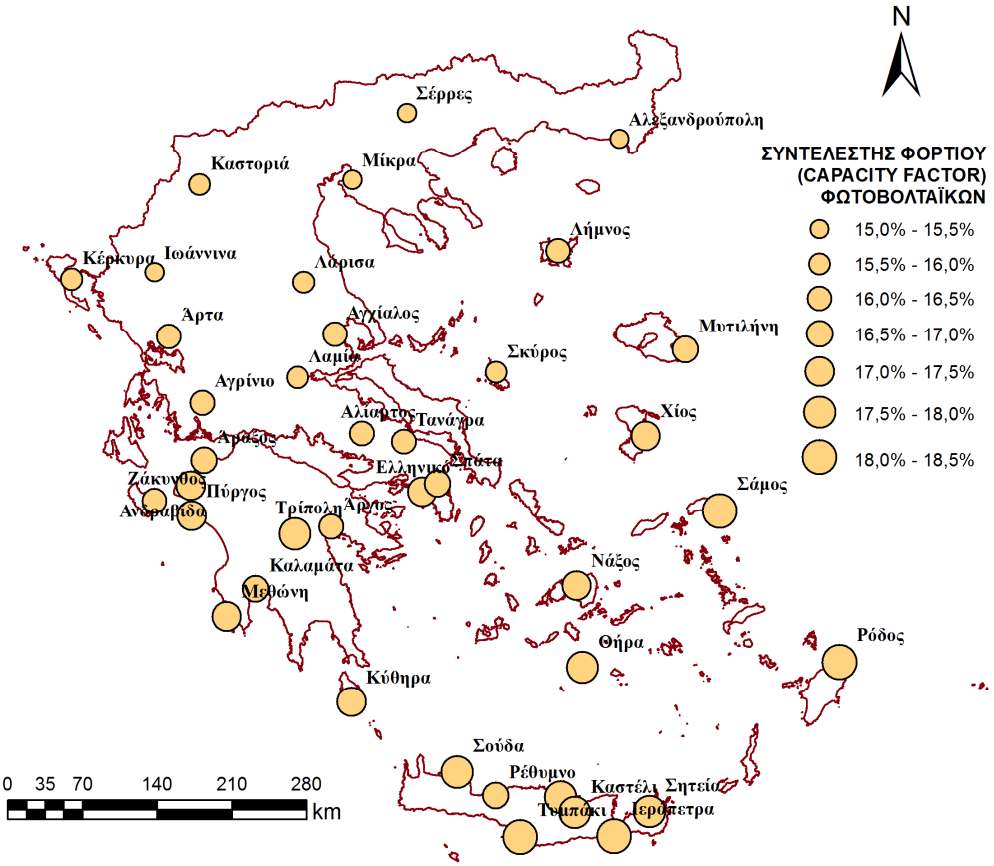
Σχήμα** 7.4: **Βέλτιστη γωνία κλίσης Φ/Β πλαισίων για τους επιλεγέντες σταθμούς

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για τις θέσεις των επιλεγέντων σταθμών, προκύπτει το Σχήμα 7.4, από το οποίο, ανάλογα με την περιοχή όπου πραγματοποιείται η ανάλυση, επιλέγεται η βέλτιστη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων.

Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζεται η αναμενόμενη μεταβολή της ενεργειακής παραγωγής των Φ/Β μονάδων στις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών για τους οποίους έχουν παραχθεί τα ΤΜΕ. Ειδικότερα, στο χάρτη αποτυπώνονται οι τιμές του συντελεστή φορτίου (Capacity Factor, CF) ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της αναμενόμενης παραγωγής ενέργειας μιας Φ/Β μονάδας ως προς τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας που θα μπορούσε να παραχθεί, εάν η μονάδα λειτουργούσε με σταθερή ισχύ και ίση με την ονομαστική της ισχύ καθ' όλο το έτος. Η σχέση, σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής φορτίου, είναι:

$$CF = \frac{E_{PV}}{P_{PV} \cdot \Delta t} \tag{7.1}$$

όπου: E_{PV}, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή (σε *kWh*) Φ/Β πλαισίων ονομαστικής ισχύος $P_{PV} = 1\ kW$ και Δt ο χρόνος σε ώρες (8760 h για ένα έτος).

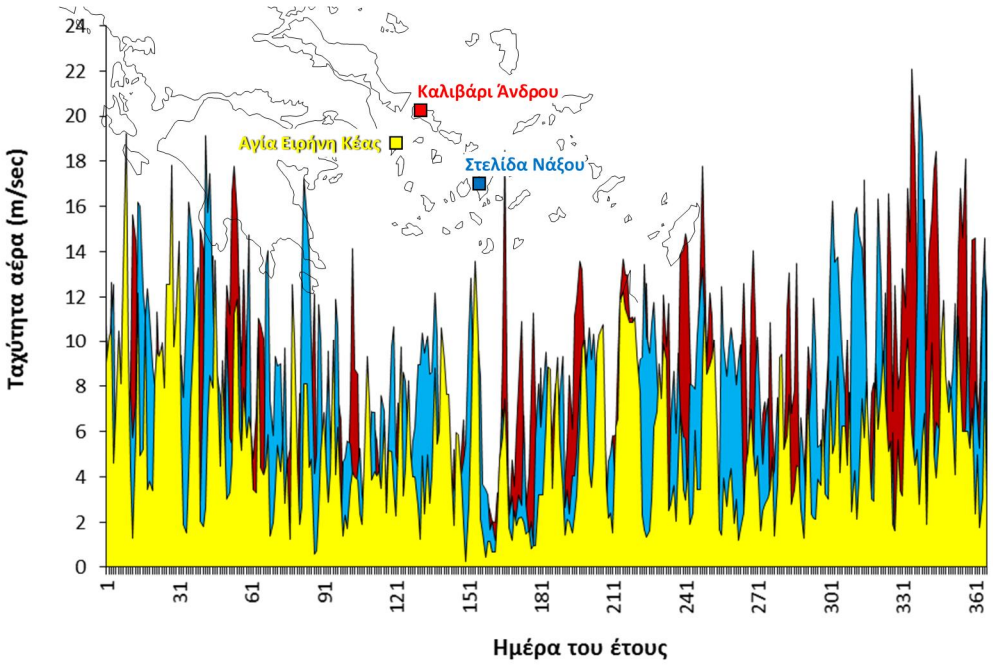


Σχήμα** 7.5: **Διακύμανση του συντελεστή φορτίου των Φ/Β μονάδων σύμφωνα με τα ΤΜΕ κάθε σταθμού

Από το Σχήμα 7.5 διαπιστώνεται η αυξημένη αποδοτικότητα των Φ/Β εγκαταστάσεων στη χώρα μας καθώς, ακόμη και για εγκαταστάσεις σταθερής γωνίας κλίσης, ο συντελεστής φορτίου μπορεί να φθάσει ή και να ξεπεράσει το 18% σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό.

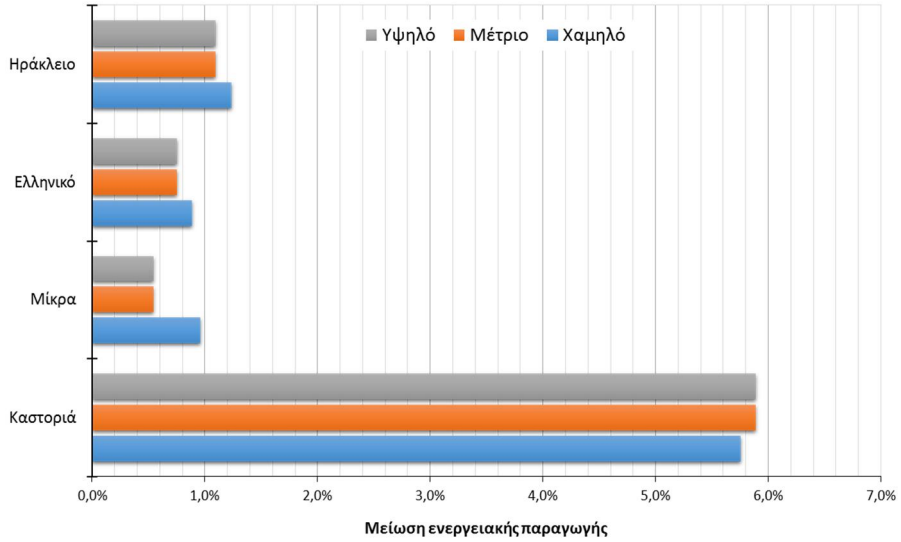
7.2.2 Ενεργειακή παραγωγή Α/Γ

Καθώς σκοπός της διατριβής είναι ο προσδιορισμός της συμβολής των τιμών ηλιακής ακτινοβολίας που περιλαμβάνονται στα ΤΜΕ, που δημιουργήθηκαν (στα πλαίσια της διατριβής), στην εκτίμηση του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας των αυτόνομων υβριδικών συστημάτων, ο ρόλος της Α/Γ και, κατά συνέπεια, του αιολικού δυναμικού είναι επικουρικός, προκειμένου να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να παραβλεφθεί το γεγονός ότι και η Α/Γ συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή παραγωγή ενός υβριδικού συστήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται στην ανάλυση χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου από τρεις περιοχές της Ελλάδας. Η επιλογή των τριών αυτών περιοχών είχε αποκλειστικό κριτήριο τη διαθεσιμότητα των χρονοσειρών, την ποιότητα του αιολικού δυναμικού, καθώς επίσης και το γεγονός ότι οι συγκεκριμένες χρονοσειρές έχουν χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες εργασίες με τη συμμετοχή του συγγραφέα (Kavadias et al. 2001; Kaldellis & Kavadias 2007; Kaldellis et al. 2007; Kavadias 2012). Η πρώτη περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλό αιολικό δυναμικό (Καλιβάρι Άνδρου), η δεύτερη από μέτριο (Στελίδα Νάξου) και η τρίτη από χαμηλό (Αγία Ειρήνη Κέας) (Σχήμα 7.6). Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν ωριαίες τιμές ταχύτητας ανέμου για χρονικό διάστημα ενός έτους, όπως έχουν καταγραφεί από τους ανεμολογικούς ιστούς μέτρησης της ΔΕΗ (ΔΕΗ 1986).



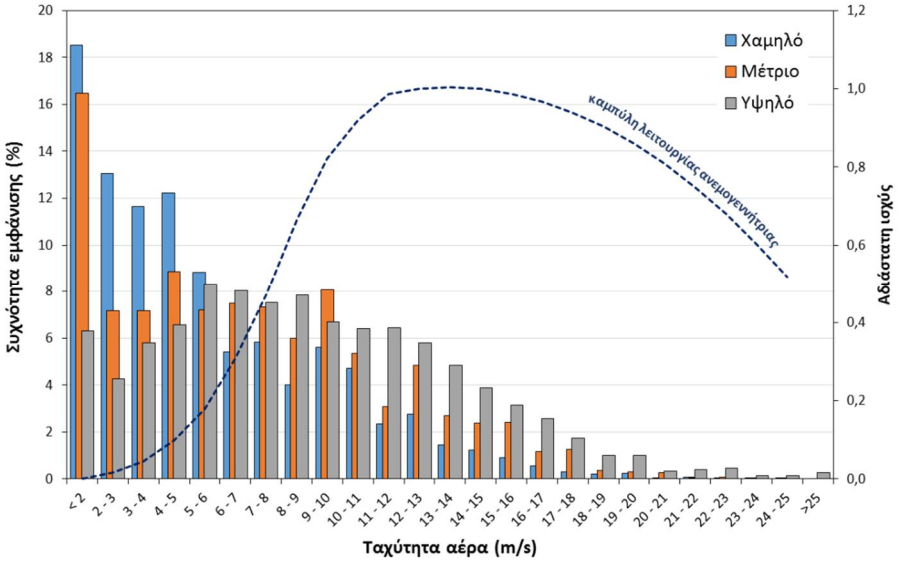
Σχήμα** 7.6: **Ενδοετήσια μεταβολή της μέσης ημερήσιας ταχύτητας ανέμου στις επιλεγμένες περιοχές

Για κάθε μια εκ των θέσεων των τεσσάρων επιλεγέντων σταθμών και για τα τρία διαφορετικά προφίλ ανέμου, εξετάζεται η συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στο υβριδικό σύστημα. Για τον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής λαμβάνονται υπόψη οι ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα, σχετικής υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης των ΤΜΕ κάθε μετεωρολογικού σταθμού. Στο Σχήμα 7.7 παρουσιάζεται η επίδραση της πυκνότητας του ανέμου στην ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ σε σχέση με την ενεργειακή παραγωγή που προκύπτει από τη λειτουργία της σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (πυκνότητα αέρα 1,225 kg/m^3). Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, η μείωση της ενεργειακής παραγωγής μπορεί να ξεπεράσει το 5%, ενώ παρατηρείται διαφορετικό ποσοστό μείωσης μεταξύ των διαφορετικών προφίλ ταχυτήτων ανέμου.



Σχήμα** 7.7: **Επίδραση της πυκνότητας του αέρα στην ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ

Η μεταβολή της μείωσης ως προς το προφίλ ανέμου οφείλεται στη συνεργασία της καμπύλης λειτουργίας της Α/Γ σε συνάρτηση με την καμπύλη συχνοτήτων του αιολικού δυναμικού. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 7.8 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των ταχυτήτων ανέμου για τις τρεις περιπτώσεις αιολικού δυναμικού σε σχέση με την καμπύλη λειτουργίας της υπό μελέτη Α/Γ.



Σχήμα** 7.8: **Διάγραμμα συχνοτήτων των υπό μελέτη περιπτώσεων αιολικού δυναμικού και αδιάστατη καμπύλη λειτουργίας Α/Γ

Ολοκληρώνοντας το γινόμενο της αδιάστατης ισχύος $\left(\frac{P_{wt}}{P_{wt_0}}\right)$ επί την καμπύλη συχνοτήτων $f(V)$ για το διάστημα λειτουργίας της Α/Γ (από ταχύτητα έναρξης V_c έως ταχύτητα αποκοπής της λειτουργίας της V_f) προκύπτει ο συντελεστής ισχύος της Α/Γ ως:

$$\omega = \int_{V_c}^{V_f} \frac{P_{wt}}{P_{wt_0}} \cdot f(V) \cdot dV \qquad (7.2)$$

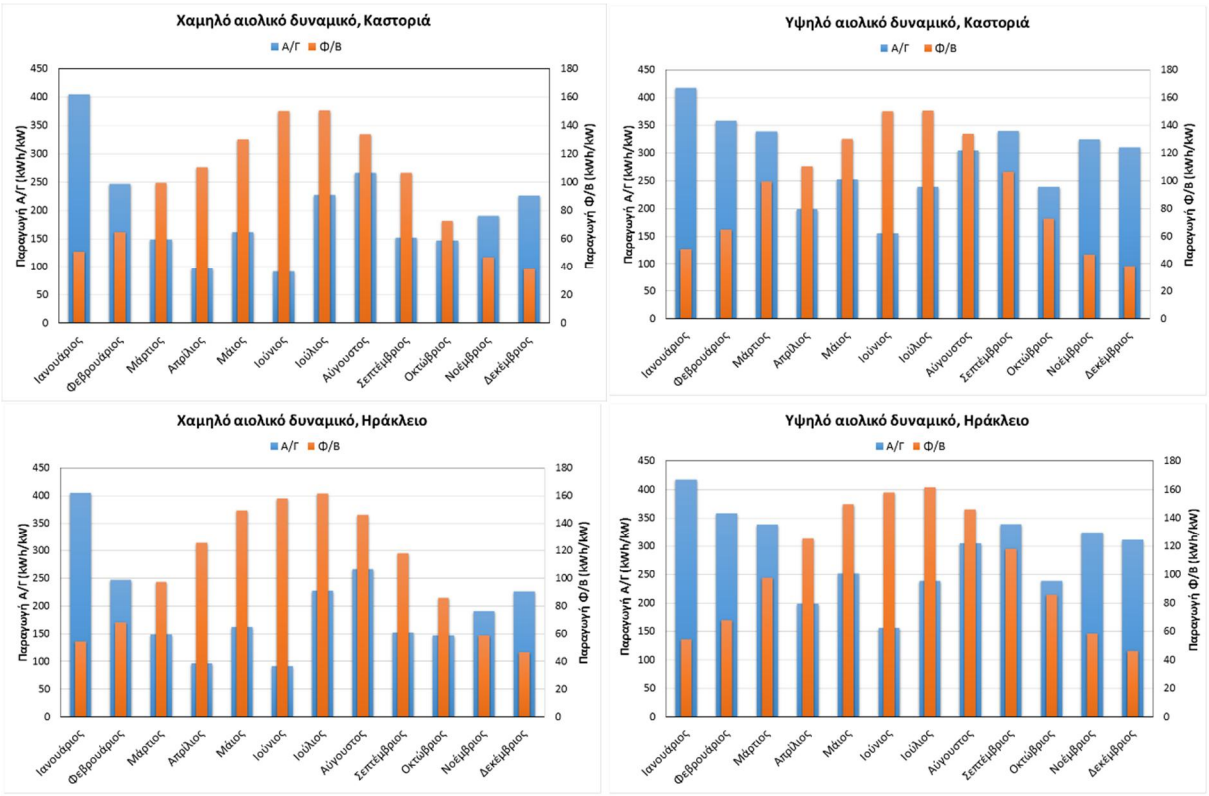
Οι τιμές των συντελεστών ισχύος κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.Ι. Όπως διαπιστώνεται από τον Πίνακα 7.Ι, η ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ δεν είναι απαραίτητα ανάλογη της μέσης ταχύτητας του ανέμου, καθώς εξαρτάται από την κατανομή ταχυτήτων.

Πίνακας** 7.Ι: **Τιμές συντελεστή ισχύος και μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου για τις υπό μελέτη περιπτώσεις αιολικού δυναμικού

Αιολικό δυναμικό	ω	$\overline{V}$ (m/s)
Χαμηλό	0,30	5,48
Μέτριο	0,43	6,85
Υψηλό	0,57	9,16

7.2.3 Συμπεριφορά ηλιακού και αιολικού δυναμικού

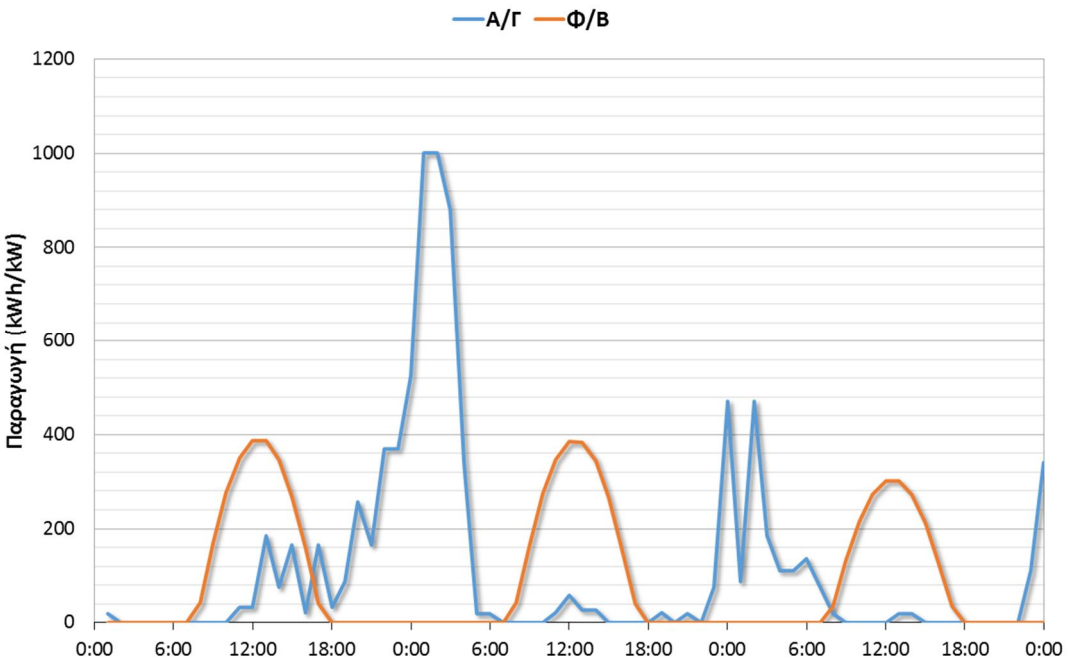
Από την επεξεργασία των τιμών ενεργειακής παραγωγής των Φ/Β πλαισίων και της Α/Γ, προκύπτει η συμπληρωματικότητα των δύο αυτών μορφών ΑΠΕ. Αυτός είναι και ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μελέτης υβριδικών συστημάτων, ο συνδυασμός Φ/Β πλαισίων και Α/Γ αποτελεί βασική επιλογή.



Σχήμα** 7.9: **Μηνιαίες τιμές ενεργειακής παραγωγής Α/Γ και Φ/Β για διαφορετικούς συνδυασμούς περιπτώσεων αιολικού και ηλιακού δυναμικού

Στο Σχήμα 7.9 παρουσιάζεται η συνδυαστική ενεργειακή παραγωγή Α/Γ και Φ/Β μονάδας για τις περιπτώσεις ηλιακού δυναμικού με υψηλό/χαμηλό αιολικό δυναμικό. Οι τιμές ενεργειακής παραγωγής στα διαγράμματα δίδονται σε παραγόμενη ενέργεια ανά kW ονομαστικής ισχύος της μονάδας παραγωγής (είτε Α/Γ, είτε Φ/Β πλαισίων). Όπως διαπιστώνεται στο διάγραμμα, ακόμη και στην περίπτωση συνδυασμού χαμηλών τιμών ηλιακού δυναμικού (Καστοριά) κατά τη χειμερινή

περίοδο με χαμηλό είτε υψηλό αιολικό δυναμικό, η ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ είναι αυξημένη σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες του έτους. Αντίθετα, τους καλοκαιρινούς μήνες η παραγωγή των Φ/Β πλαισίων μπορεί να συμπληρώσει το έλλειμα από την Α/Γ λόγω χαμηλών ταχυτήτων ανέμου. Η συμπληρωματική (συνεργητική) συμπεριφορά ηλιακού και αιολικού δυναμικού εμφανίζεται και κατά τη διάρκεια του 24-ώρου˙ κατά τη διάρκεια της ημέρας η ηλιοφάνεια συμπληρώνει τη νηνεμία, ενώ κατά τη διάρκεια της νύκτας η αναστολή λειτουργίας της Φ/Β μονάδας δίδει τη θέση της στην Α/Γ.



Σχήμα** 7.10: **Μεταβολή ενεργειακής παραγωγής Α/Γ και Φ/Β μονάδας στην περιοχή του Ελληνικού με χαμηλό αιολικό δυναμικό το μήνα Ιανουάριο

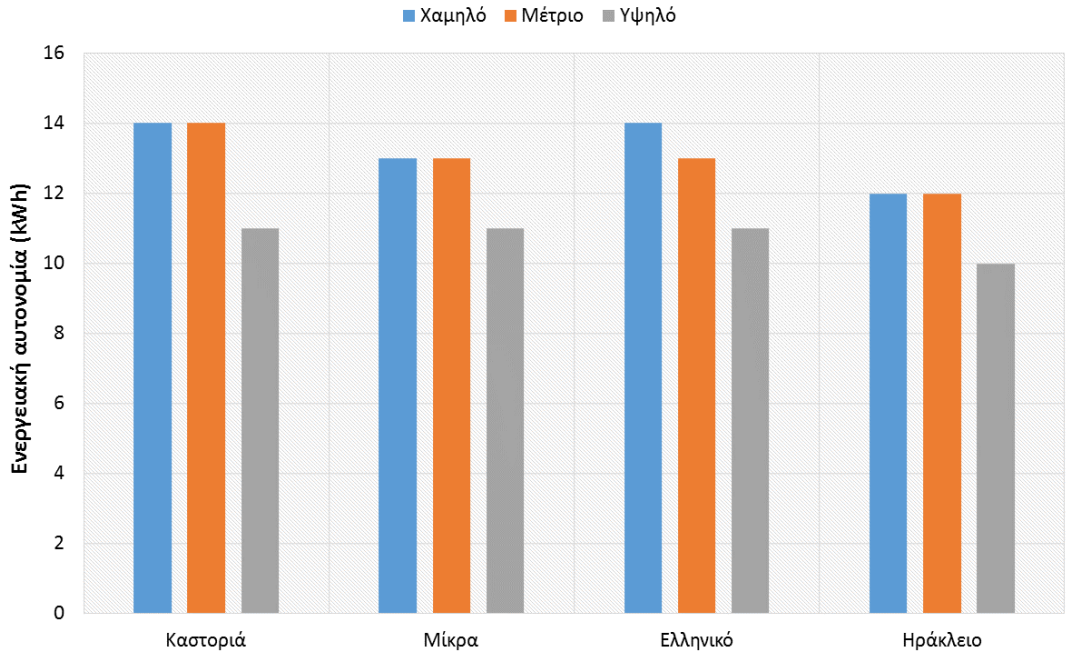
Στο Σχήμα 7.10 διακρίνεται ο τρόπος αλληλοσυμπλήρωσης του αιολικού και ηλιακού δυναμικού σε τρεις διαδοχικές ημέρες του Ιανουαρίου. Κατά τη διάρκεια αυτών των ενδεικτικών ημερών γίνεται ιδιαίτερα εμφανής η σκοπιμότητα συνδυασμού Φ/Β πλαισίων και Α/Γ για την κάλυψη των ηλεκτρικών καταναλώσεων στη χώρα μας.

7.2.4 Ο ρόλος του συστήματος αποθήκευσης

Τα συστήματα αποθήκευσης των υβριδικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν το κλειδί για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας. Σε κάθε περίπτωση, το υβριδικό σύστημα θα πρέπει να παρέχει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, όταν προκύπτει έλλειμα μεταξύ ζήτησης και παραγωγής. Ιδιαίτερη μέριμνα θα πρέπει να λαμβάνεται σε περιόδους συνεχόμενης νηνεμίας με ταυτόχρονη έλλειψη ηλιοφάνειας, όπου το σύστημα αποθήκευσης κατά την έναρξη της συγκεκριμένης περιόδου θα πρέπει να διαθέτει τις απαραίτητες ποσότητες ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τού καταναλωτή έως την επαναλειτουργία των μονάδων παραγωγής. Ο συνδυασμός Φ/Β και Α/Γ βοηθάει στη μείωση των απαιτήσεων αποθήκευσης ενέργειας καθώς, όπως διαπιστώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, σε πολλές περιπτώσεις η μία μορφή ΑΠΕ συμπληρώνει την άλλη.

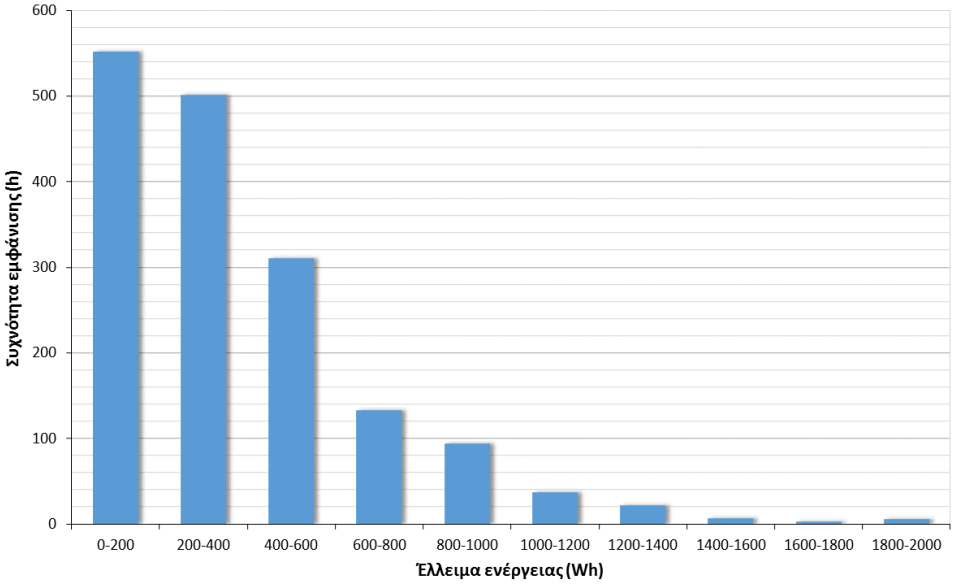
Για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας ενός καταναλωτή απαιτείται συστοιχία συσσωρευτών συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 10 έως 14 kWh, ανάλογα με το αιολικό και το ηλιακό

δυναμικό (Σχήμα 7.11). Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του καταναλωτή είναι 4287 kWh, η μέση ημερήσια κατανάλωση προκύπτει ίση με 11,74 kWh. Σύμφωνα με τις ελάχιστες διαστάσεις των συσσωρευτών, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.11, οι συσσωρευτές, λαμβάνοντας υπόψη ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισής τους έχει καθορισθεί στο 70%, απαιτείται να διαθέτουν την ενέργειά τους για διάστημα 15-20 ωρών.



Σχήμα 7.11: Ελάχιστη απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα συσσωρευτών για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας ενός καταναλωτή σε 4 περιοχές της Ελλάδας θεωρώντας 3 σενάρια αιολικού δυναμικού

Στο Σχήμα 7.12 παρουσιάζεται η συμπεριφορά υβριδικού συστήματος ως προς το έλλειμα ενέργειας που καλείται να καλυφθεί από τους συσσωρευτές.

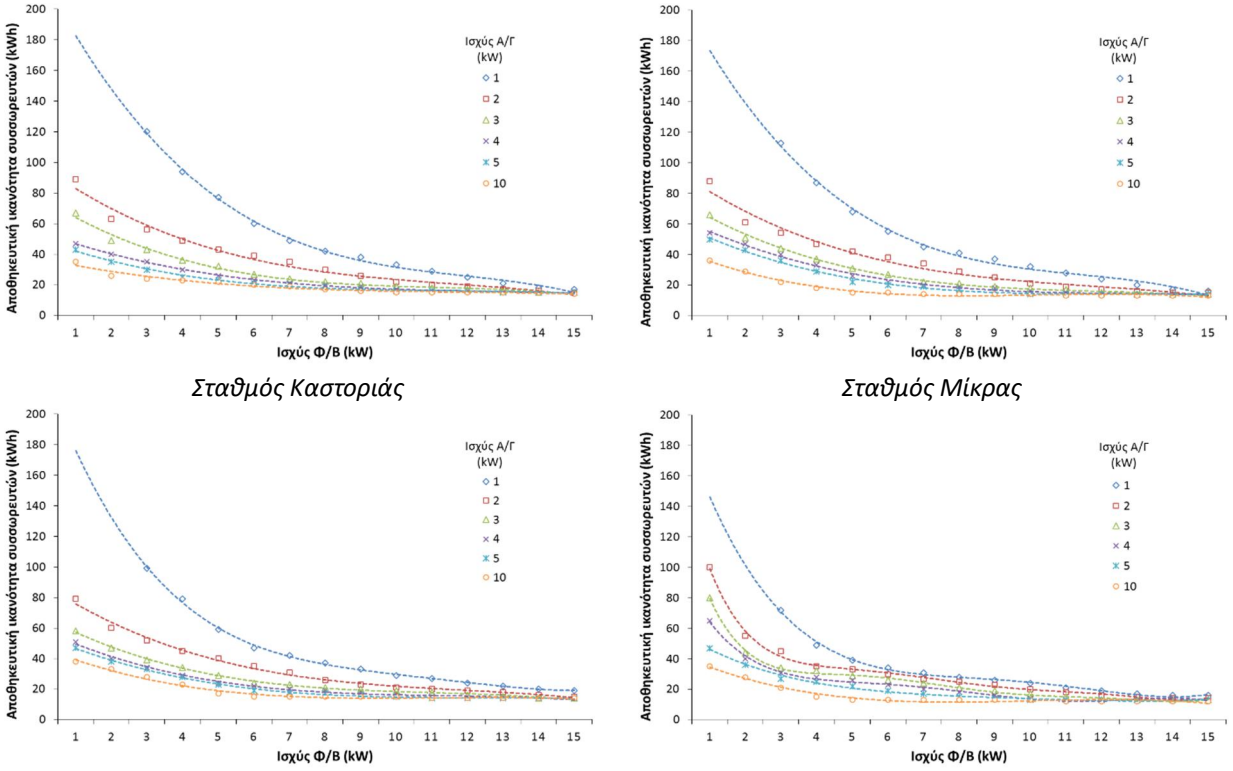


Σχήμα 7.12: Συχνότητα εμφάνισης ελλείματος ενέργειας που καλείται να καλυφθεί από τους συσσωρευτές (περίπτωση Ηρακλείου Κρήτης σε συνδυασμό με χαμηλό αιολικό δυναμικό)

Για τους υπολογισμούς της ενεργειακής αυτονομίας ενός καταναλωτή, θεωρείται ότι το σύστημα αποτελείται από Φ/Β πλαίσια συνολικής ισχύος 5 kW, Α/Γ 9 kW και συσσωρευτές 14 kWh· η προσομοίωση πραγματοποιείται στο σταθμό Ηρακλείου σε συνδυασμό με χαμηλό αιολικό δυναμικό. Όπως διαπιστώνεται από το ιστόγραμμα, η μέγιστη ενέργεια, που καλούνται να καλύψουν οι συσσωρευτές κυμαίνεται μεταξύ 1,8 και 2 kWh, έλλειμα το οποίο εμφανίζεται 6 ώρες μέσα στο έτος. Στο 80% των περιπτώσεων, το έλλειμα ενέργειας είναι μικρότερο των 600 Wh, ενώ μόλις 75 ώρες μέσα στο έτος παρουσιάζεται έλλειμα ενέργειας μεγαλύτερο της 1 kWh. Από την αναλυτική προσομοίωση του υβριδικού συστήματος προκύπτει ότι απαιτείται αποθηκευτική ικανότητα 14 kWh, γεγονός που αναδεικνύει την αναγκαιότητα ελέγχου της ενεργειακής συμπεριφοράς των υβριδικών συστημάτων με ελάχιστο βήμα υπολογισμών τη 1 ώρα, καθώς, παρόλο που η παραπάνω ανάλυση δείχνει μικρά ποσά ελλείματος ενέργειας, όταν το έλλειμα εμφανίζεται σε διαδοχικές ώρες και όταν οι συσσωρευτές βρεθούν σε κατάσταση χαμηλής στάθμης κατά την έναρξη της περιόδου, απαιτούνται σημαντικά ποσά ενέργειας από το σύστημα αποθήκευσης.

7.2.5 Συνδυασμοί αυτονομίας

Η επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας του καταναλωτή από ένα υβριδικό σύστημα, το οποίο συνδυάζει Φ/Β πλαίσια και Α/Γ μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς συνδυασμούς. Φυσικά, ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις του καταναλωτή, καθορίζονται και τα λογικά όρια εντός των οποίων διερευνώνται οι πιθανές λύσεις αυτονομίας. Οι καμπύλες αυτονομίας προκύπτουν από συνδυασμούς Φ/Β-Α/Γ-συσσωρευτών, που εξασφαλίζουν μηδενικές απορρίψεις φορτίου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η αναζήτηση των συνδυασμών προκύπτει με προσομοίωση του συνόλου των συνδυασμών εντός των ορίων αναζήτησης της λύσης. Ειδικότερα, για τις περιοχές μελέτης, αναζητήθηκαν οι λύσεις αυτονομίας για Α/Γ ονομαστικής ισχύος 1 έως 10 kW, Φ/Β μονάδας ονομαστικής ισχύος 1 έως 15 kW και συσσωρευτές χωρητικότητας έως 150 kWh.



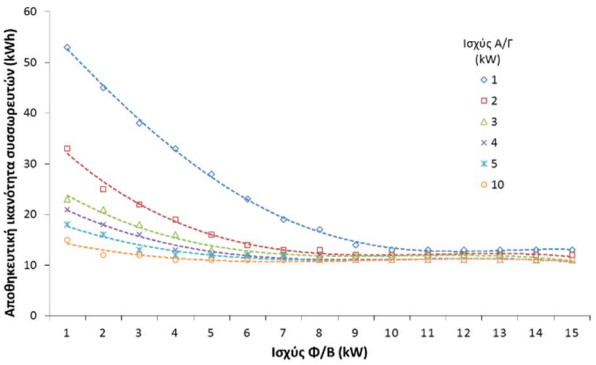
Σταθμός Καστοριάς *Σταθμός Μίκρας*

Σταθμός Ελληνικού *Σταθμός Ηρακλείου*

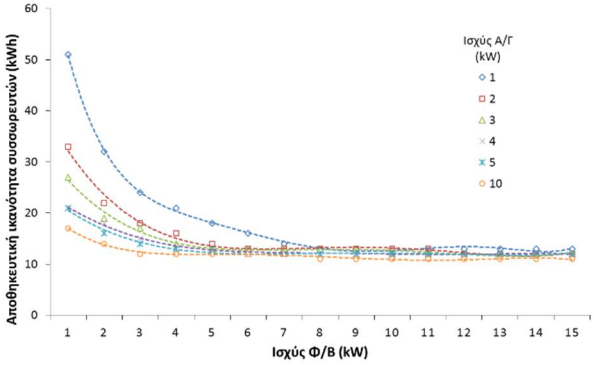
Σχήμα** 7.13: **Καμπύλες αυτονομίας υβριδικών συστημάτων σε συνθήκες χαμηλού αιολικού δυναμικού

Στο Σχήμα 7.13 παρουσιάζονται οι καμπύλες αυτονομίας υβριδικών συστημάτων εγκατεστημένων στις 4 περιοχές μελέτης και υπό συνθήκες χαμηλού αιολικού δυναμικού. Όπως διαπιστώνεται από τα διαγράμματα, τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζονται με μικρή Α/Γ (έως 1 kW) παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις σε μέγεθος συσσωρευτών. Από την άλλη, η αύξηση της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ πέρα των 5 kW φαίνεται ότι επιδρά ελάχιστα στη μείωση της χωρητικότητας των συσσωρευτών. Στις περιοχές με υψηλότερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, η αύξηση του μεγέθους της Φ/Β μονάδας πέρα από τα 10 kW παρουσιάζει σταδιακά σταθεροποίηση του ελάχιστου απαιτούμενου μεγέθους συσσωρευτών.

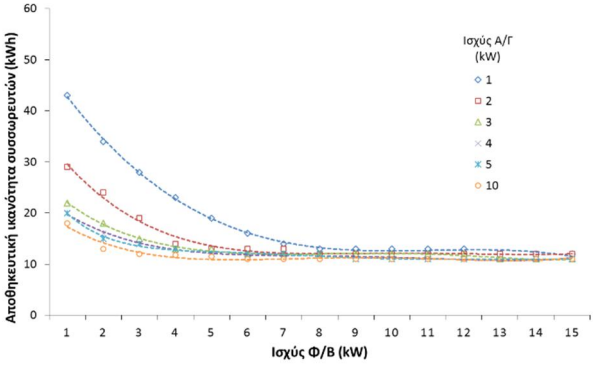
Αντίστοιχα, στο Σχήμα 7.14 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες αυτονομίας στην περίπτωση υψηλού αιολικού δυναμικού. Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις αιολικού δυναμικού, είναι εμφανής η επίδραση της αιολικής παραγωγής στη μείωση των απαιτήσεων ως προς την αποθηκευτική ικανότητα των συσσωρευτών. Η μείωση παρατηρείται σε υβριδικά συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν μικρές Φ/Β μονάδες, καθώς οι καμπύλες αυτονομίας τείνουν ασυμπτωτικά σε μια ελάχιστη δυνατή τιμή αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών πέραν της οποίας δεν είναι εφικτή περαιτέρω μείωση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις υβριδικών συστημάτων με μικρές τιμές ονομαστικής ισχύος Α/Γ, η αύξηση ισχύος της Φ/Β μονάδας μέχρι τα 5 kW συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της χωρητικότητας των συσσωρευτών. Είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ότι καθώς η διάμετρος των Α/Γ που εξετάζονται στη συγκεκριμένη ανάλυση, κυμαίνεται από 2 έως 6 m, οι μεγαλύτερες Α/Γ έχουν αυξημένες απαιτήσεις χώρου ενώ, για λόγους ασφαλείας, πρέπει να τοποθετούνται σε μεγάλο ύψος και σε απόσταση από κατοικίες, σε αντίθεση με τα Φ/Β τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν ακόμη και πάνω σε στέγες κατοικιών.



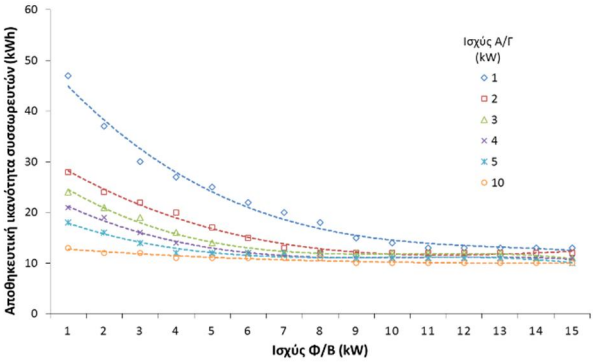
Σταθμός Καστοριάς



Σταθμός Μίκρας



Σταθμός Ελληνικού



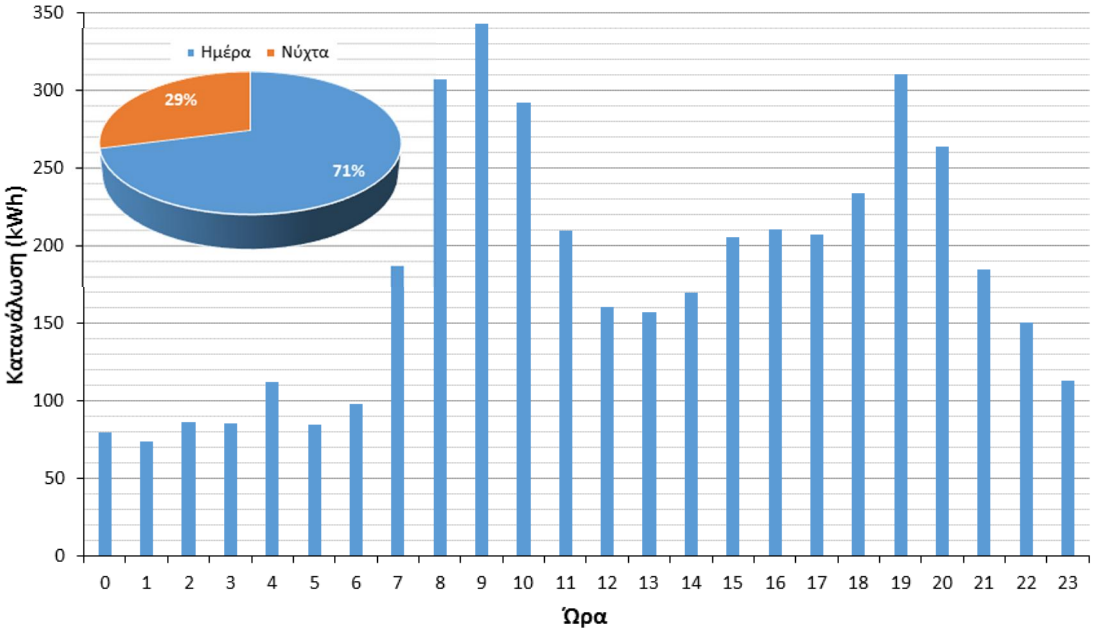
Σταθμός Ηρακλείου

Σχήμα** 7.14: **Όπως Σχήμα** 7.13, **αλλά για συνθήκες υψηλού αιολικού δυναμικού

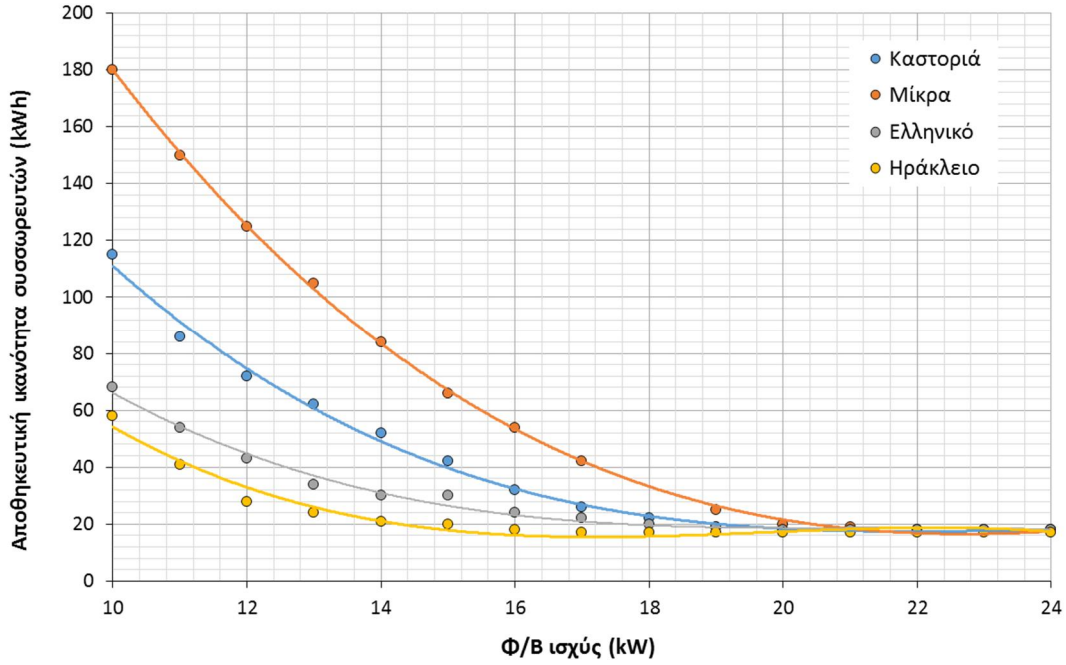
7.2.6 Αυτονομία με χρήση Φ/Β ενέργειας μόνο

Για την αξιολόγηση της συνεισφοράς του ηλιακού δυναμικού στην κάλυψη των ηλεκτρικών ενεργειακών αναγκών αυτόνομων καταναλωτών, διερευνάται η συμπεριφορά της υβριδικής εγκατάστασης όταν περιλαμβάνει αποκλειστικά Φ/Β πλαίσια και συσσωρευτές. Η ελάχιστη αποθηκευτική ικανότητα των συστημάτων αποθήκευσης, όταν λειτουργούν σε συνεργασία με Φ/Β, είναι η μέγιστη ενεργειακή ζήτηση που μπορεί να παρουσιασθεί κατά τις νυκτερινές ώρες. Εξετάζοντας την κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου κατά τη διάρκεια ενός 24-ώρου (Σχήμα 7.15) προκύπτει ότι το 70% των ηλεκτρικών καταναλώσεων εμφανίζονται κατά τις πρωϊνές και απογευματινές ώρες. Η μέγιστη ενεργειακή κατανάλωση κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών, σύμφωνα με το προφίλ κατανάλωσης, είναι περίπου 6,5 kWh. Ωστόσο, οι περιορισμένες ώρες ηλιοφάνειας, κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, αυξάνουν σημαντικά τις διαστάσεις των συσσωρευτών.

Στο Σχήμα 7.16 παρουσιάζονται οι συνδυασμοί Φ/Β πλαισίων και συσσωρευτών που μπορούν να εξασφαλίσουν στον καταναλωτή πλήρη ενεργειακή αυτονομία, καλύπτοντας τις ηλεκτρικές καταναλώσεις τους αδιάλειπτα όλο το έτος. Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 7.16, η αύξηση του αριθμού των Φ/Β πλαισίων μειώνει σημαντικά την απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών, μείωση που γίνεται ιδιαίτερα αισθητή στις περιοχές της Βόρειας Ελλάδας. Ειδικότερα στο σταθμό της Μίκρας, φαίνεται ότι αύξηση της ισχύος των Φ/Β από 10 σε 12 kW μειώνει κατά 40% τις απαιτήσεις των συσσωρευτών (από 180 σε 120 kWh). Η επίδραση του ηλιακού δυναμικού στο μέγεθος της εγκατάστασης φαίνεται με τη μείωση των ελάχιστων διαστάσεων των συσσωρευτών που απαιτούνται προκειμένου να εξασφαλίζεται αυτονομία. Για παράδειγμα, ενώ στην περιοχή της Καστοριάς, με την εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων συνολικής ονομαστικής ισχύος 10 kW, απαιτούνται συσσωρευτές αποθηκευτικής ικανότητας σχεδόν 120 kWh, στο Ηράκλειο για την ίδια Φ/Β μονάδα απαιτούνται 60 kWh.



Σχήμα** 7.15: **Ωριαία κατανομή ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του υπό μελέτη οικιακού καταναλωτή



Σχήμα** 7.16: **Συνδυασμοί Φ/Β πλαισίων και συσσωρευτών που εξασφαλίζουν πλήρη αυτονομία στις περιοχές μελέτης

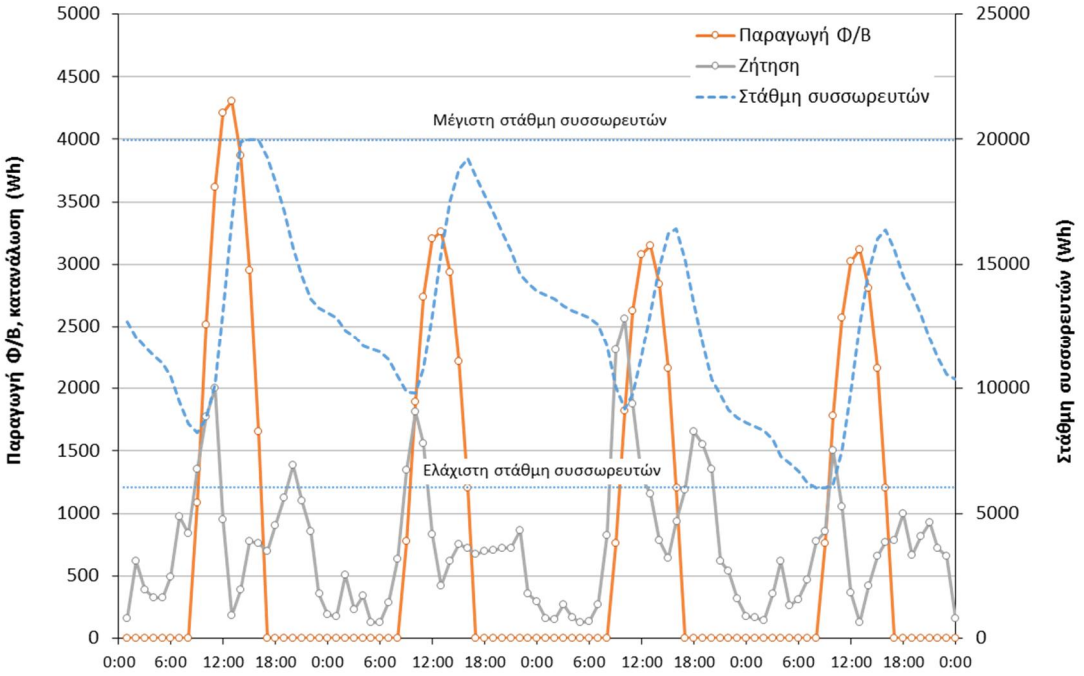
Επίσης, παρατηρώντας το Σχήμα 7.16, διαπιστώνεται ότι η αύξηση της εγκατεστημένης Φ/Β ισχύος πέραν των 20 kW δεν προσφέρει περεταίρω μείωση της απαιτούμενης αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών. Στον Πίνακα 7.II συνοψίζονται οι συνδυασμοί Φ/Β και οι αντίστοιχες ελάχιστες τιμές αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών στις υπό μελέτη περιοχές. Συγκρίνοντας τα στοιχεία του Πίνακα 7.II με τα συμπεράσματα που απορρέουν από το Σχήμας 7.11, προκύπτει ότι η χρήση της Α/Γ μειώνει τις απαιτήσεις σε χωρητικότητα συσσωρευτών κατά 4 έως 9 kWh ανάλογα με την περιοχή και το αιολικό δυναμικό.

Πίνακας** 7.II : **Απαιτούμενη Φ/Β ισχύς για την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων αποθήκευσης προς επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας

Περιοχή	**Ισχύς Φ/Β** (kW)	**Χωρητικότητα συσσωρευτών** (kWh)
Καστοριά	18	20
Μίκρα	22	18
Ελληνικό	20	18
Ηράκλειο	17	17

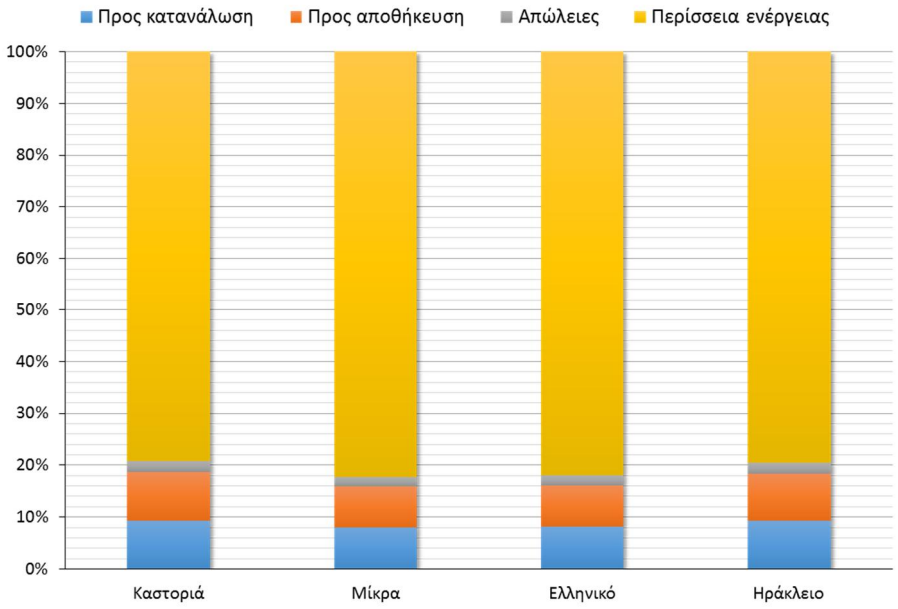
Εξετάζοντας την ανά ώρα ενεργειακή συμπεριφορά του υβριδικού συστήματος παρέχεται η δυνατότητα εντοπισμού των δυσμενών για το σύστημα αποθήκευσης περιόδων του έτους, όπου το σύστημα καλείται να αποδώσει ενέργεια λόγω μειωμένης παραγωγής. Ως παράδειγμα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.17 η ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού σταθμού αποτελούμενου από Φ/Β μονάδα 18 kW και συσσωρευτών 20 kWh στο σταθμό της Καστοριάς, σε διαδοχικές ημέρες το μήνα Ιανουάριο. Η στάθμη των συσσωρευτών μεταβάλλεται από 6 kWh, το οποίο αποτελεί και το ελάχιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (DOD_L = 70%), έως τη μέγιστη χωρητικότητά τους, 20 kWh. Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα, μετά το μεσημέρι της πρώτης ημέρας, οι συσσωρευτές έχουν φορτισθεί πλήρως. Τις επόμενες τρεις ημέρες, λόγω της μειωμένης παραγωγής των

Φ/Β πλαισίων, η αποθηκευμένη στους συσσωρευτές ενέργεια υπολείπεται των ενεργειακών απαιτήσεων της νύκτας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τις πρώτες πρωϊνές ώρες της τέταρτης ημέρας οι συσσωρευτές να φθάσουν στην ελάχιστη στάθμη φόρτισης, αιτιολογώντας τις αυξημένες απαιτήσεις σε αποθηκευτική ικανότητα των συσσωρευτών σε σχέση με τις απόλυτες ενεργειακές ανάγκες κατά τη διάρκεια της νύκτας.



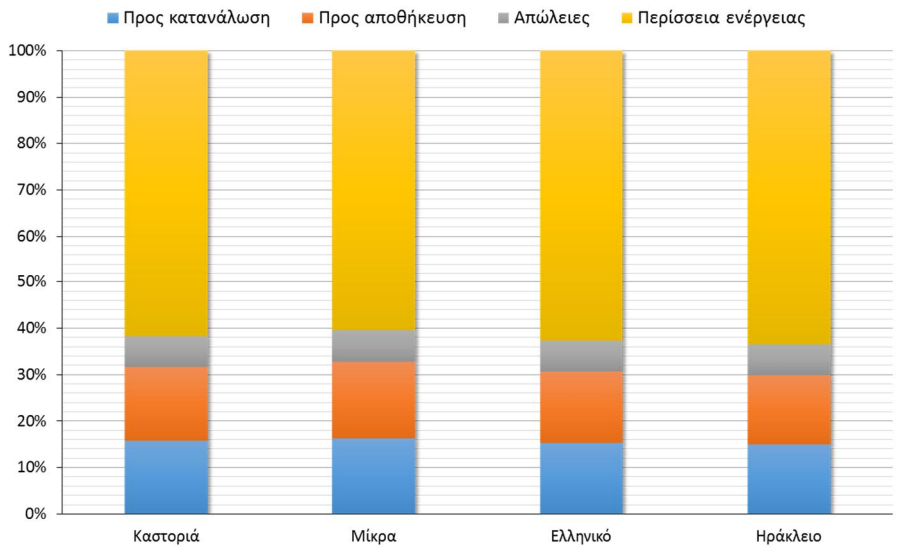
Σχήμα** 7.17 : **Ενεργειακή συμπεριφορά υβριδικού συστήματος Φ/Β-συσσωρευτών (ελαχιστοποιώντας τη συμμετοχή των συσσωρευτών) σε 4 διαδοχικές ημέρες το μήνα Ιανουάριο στην περιοχή της Καστοριάς

Λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 7.5, στο οποίο απεικονίζεται ο συντελεστής φορτίου των Φ/Β μονάδων σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, καθώς και οι συνολικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας του καταναλωτή (4287 kWh), διαπιστώνεται ότι η απαιτούμενη ισχύς των Φ/Β για την παραγωγή της παραπάνω ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από 2,7 έως 3,3 kW. Ως εκ τούτου, για την εξασφάλιση πλήρους αυτονομίας, απαιτείται υπερδιαστασιολόγηση των Φ/Β μονάδων, με συνέπεια την παραγωγή σημαντικά μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέργειας σε σχέση με τις ενεργειακές απαιτήσεις της κατανάλωσης. Βέβαια, θα πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο αξιοποίησης της υπολειπόμενης ενέργειας στην κάλυψη δευτερευόντων φορτίων (π.χ. άντλησης νερού, μονάδας αφαλάτωσης κ.λπ.). Στο Σχήμα 7.18 παρουσιάζεται η κατανομή της παραγόμενης Φ/Β ενέργειας των υβριδικών συστημάτων του Πίνακα 7.II. Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα, μόλις το 20% της παραγόμενης ενέργειας απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, ενώ το υπόλοιπο 80% μένει αναξιοποίητο. Τα ποσοστά διαφοροποιούνται ελάχιστα μεταξύ των διαφορετικών περιοχών καθώς παραμένουν αμετάβλητες οι ενεργειακές ανάγκες του καταναλωτή.



Σχήμα** 7.18: **Κατανομή παραγόμενης Φ/Β ενέργειας υβριδικού συστήματος Φ/Β-συσσωρευτών ελαχιστοποιώντας τη συμμετοχή των συσσωρευτών

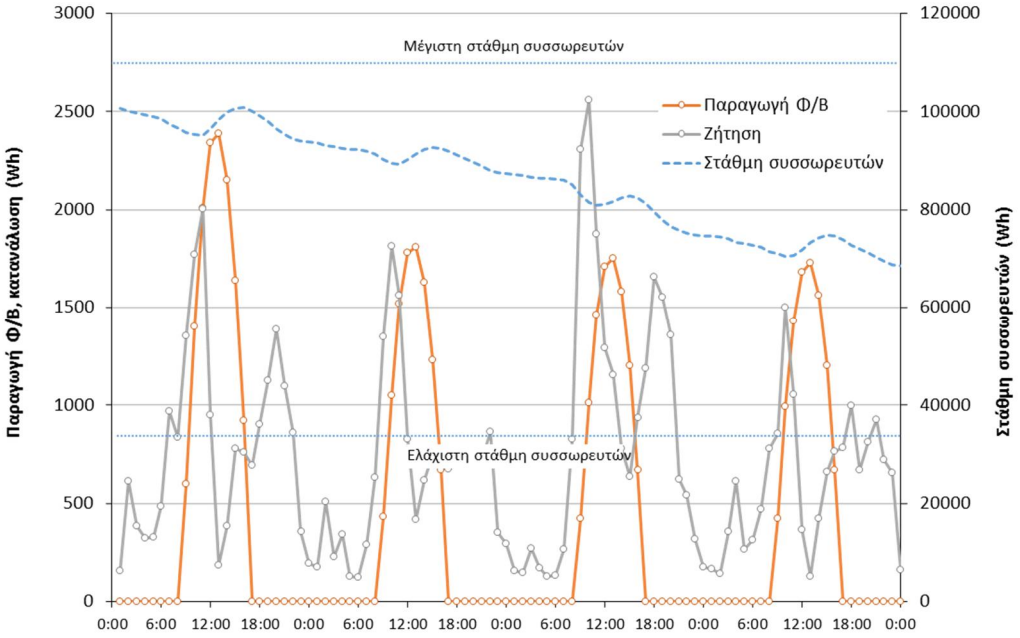
Για τη μείωση της περίσσειας[1] Φ/Β ενέργειας απαιτείται αυξημένη συμμετοχή του συστήματος αποθήκευσης. Στο Σχήμα 7.19 παρουσιάζεται, κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 7.18, η κατανομή της Φ/Β ενέργειας υβριδικών συστημάτων που αποτελούνται από Φ/Β 10 kW και την ελάχιστη χωρητικότητα συσσωρευτών με την οποία εξασφαλίζεται ενεργειακή αυτονομία του συστήματος: για το σταθμό της Καστοριάς 115 kWh, της Μίκρας 180 kWh, του Ελληνικού 68 kWh και του Ηρακλείου Κρήτης 58 kWh.



Σχήμα** 7.19: **Όπως στο Σχήμα** 7.18, **αλλά με αυξημένη συμμετοχή των συσσωρευτών

[1] Η περίσσεια ενέργειας αναφέρεται στην ποσότητα ενέργειας, η οποία, τελικά, δεν παρήχθη από τη Φ/Β μονάδα καθώς δεν μπορούσε να απορροφηθεί από την κατανάλωση ή το σύστημα αποθήκευσης. Ως εκ τούτου, αφορά μη παραγόμενη ενέργεια αν και το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό επέτρεπε την παραγωγή της.

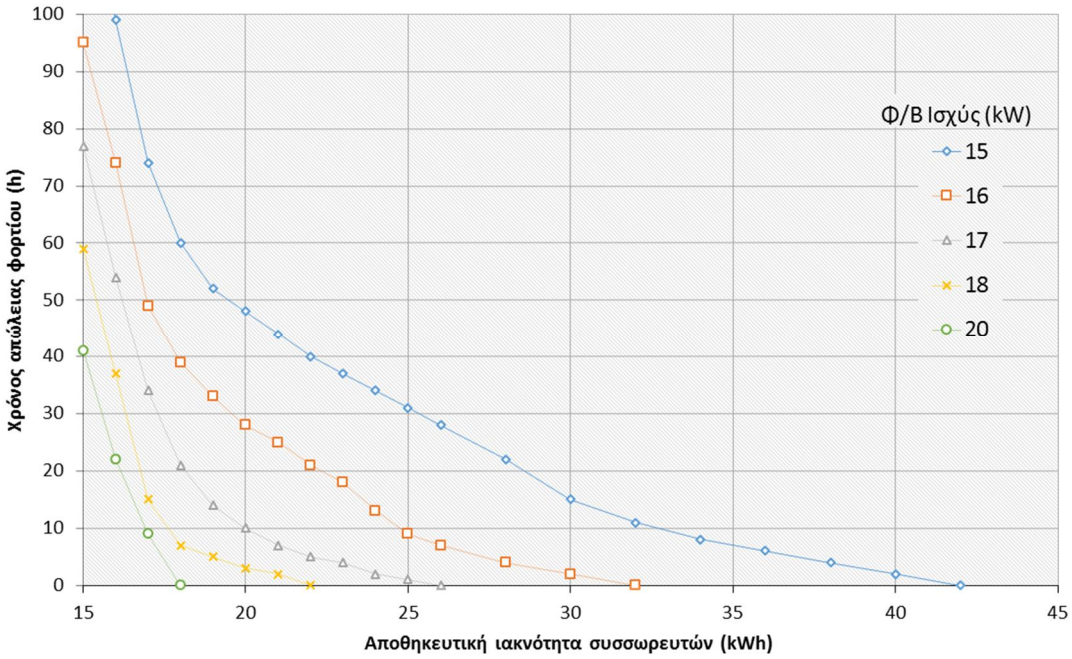
Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα, η περίσσεια Φ/Β ενέργειας μειώνεται κατά 20%, μείωση για την οποία απαιτήθηκε αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών 6-10 φορές στις περιοχές της Βόρειας Ελλάδας, ενώ στις νοτιότερες περιοχές η αύξηση περιορίσθηκε στις 3-4 φορές της ελάχιστης αποθηκευτικής ικανότητας. Από τη σύγκριση των δύο γραφημάτων (Σχήμα 7.18 και Σχήμα 7.19) διαπιστώνεται ότι το ποσοστό της Φ/Β ενέργειας, που οδηγείται απ' ευθείας στην κατανάλωση σε σχέση με τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες, παραμένει αμετάβλητο, καθώς και στις δύο περιπτώσεις υβριδικών συστημάτων, όπως και το σύνολο των σταθμών, το 50% της κατανάλωσης καλύπτεται απ' ευθείας από τα Φ/Β, ενώ το υπόλοιπο 50% καλύπτεται μέσω των συσσωρευτών.



Σχήμα** 7.20: **Όπως στο Σχήμα** 7.17, **αλλά με αυξημένη συμμετοχή των συσσωρευτών

Στο Σχήμα 7.20 παρουσιάζεται η ενεργειακή συμπεριφορά του υβριδικού συστήματος Φ/Β-συσσωρευτών στο σταθμό της Καστοριάς για την ίδια χρονική περίοδο με εκείνη του Σχήματος 7.17. Συγκρίνοντας τη μεταβολή της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών στις δύο περιπτώσεις (διακεκομμένη γραμμή κυανού χρώματος), διαπιστώνεται η βοήθεια που παρέχει στο σύστημα η αύξηση της χωρητικότητας των συσσωρευτών, καθώς, όπως είναι αναμενόμενο, η αποθηκευμένη ενέργειά τους μπορεί να καλύψει διαδοχικές περιόδους μειωμένης ηλιοφάνειας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επίσης, στην περίπτωση χρήσης συσσωρευτών περιορισμένης χωρητικότητας αυξάνεται ο αριθμός κύκλων φόρτισης-εκφόρτισής τους, μειώνοντας το χρόνο ζωής τους και αυξάνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων αντικαταστάσεών τους εντός του ωφέλιμου χρόνου λειτουργίας του υβριδικού συστήματος.

Για τη μείωση των διαστάσεων του υβριδικού συστήματος, εξετάζονται περιπτώσεις μη ικανοποίησης της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας (απώλεια φορτίου) σε συγκεκριμένες οριακές συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα** 7.21: **Μεταβολή των διαστάσεων Φ/Β και συσσωρευτών σε περιπτώσεις απώλειας φορτίου στην περιοχή της Καστοριάς

Στο Σχήμα 7.21 εξετάζονται περιπτώσεις χρόνου απώλειας φορτίου από 0 ώρες (πλήρης αυτονομία) έως και 100 ώρες το έτος (δηλαδή μόλις το 1,14% του χρόνου) σε περιοχή της Βόρειας Ελλάδας με χαμηλό ηλιακό δυναμικό. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται οι ώρες απώλειας φορτίου, ενώ κάθε διαφορετική καμπύλη αντιπροσωπεύει Φ/Β μονάδα συγκεκριμένης ονομαστικής ισχύος. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η αποθηκευτική ικανότητα των συσσωρευτών. Από τις καμπύλες διαπιστώνεται ότι, με απώλεια φορτίου μόλις 10 ώρες κατά τη διάρκεια του έτους, μειώνεται η χωρητικότητα των συσσωρευτών έως και 10 kWh, μείωση η οποία είναι μεγαλύτερη της μείωσης που προκαλεί η προσθήκη Α/Γ. Όσο μειώνονται οι διαστάσεις των συσσωρευτών, τόσο εντονότερη είναι η αύξηση των ωρών απώλειας φορτίου. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ώρες απώλειας φορτίου αφορούν δυσμενείς καταστάσεις λειτουργίας του υβριδικού συστήματος και, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, μεμονωμένες περιπτώσεις διάσπαρτων διαστημάτων μέσα στο έτος.

7.3 Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης

7.3.1 Οικονομικά δεδομένα

Η οικονομική αξιολόγηση των υβριδικών συστημάτων πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας ως χρόνο ωφέλιμης λειτουργίας τους τα 20 χρόνια. Το χρονικό αυτό διάστημα αποτελεί τη βάση για την οικονομική αξιολόγηση ενεργειακών συστημάτων˙ ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο χρόνος ζωής των Φ/Β πλαισίων εκτιμάται ότι υπερβαίνει τα 25 χρόνια. Το οικονομικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του υβριδικού συστήματος, βασίζεται σε σταθερή μεταβολή των οικονομικών παραμέτρων για όλη την περίοδο λειτουργίας της εγκατάστασης, καθώς κύριο στόχο της οικονομικής ανάλυσης δεν αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης των οικονομικών παραμέτρων στην οικονομική αξιολόγηση του συστήματος, αλλά η μεταβολή της οικονομικής απόδοσης των υβριδικών συστημάτων εξαιτίας της ενεργειακής τους συμπεριφοράς.

Για το σκοπό αυτό, τα επιτόκια, τα οποία χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη διαχρονική μεταβολή των μεγεθών, είναι σταθερά και η τιμή τους θεωρείται ως μέση διαχρονική. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται οι μέσες ετήσιες τιμές: του πληθωρισμού, g, του πληθωρισμού συντήρησης και λειτουργίας της εγκατάστασης, g_m, του πληθωρισμού ετήσιας αναπροσαρμογής του κόστους αντικατάστασης των συσσωρευτών, g_b, του βοηθητικού εξοπλισμού, g_e, και του κόστους κεφαλαίου, i. Στον Πίνακα 7.ΙΙΙ συγκεντρώνονται οι μέσες ετήσιες τιμές των επιτοκίων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα οικονομική ανάλυση.

Πίνακας** 7.III: **Τιμές επιτοκίων της οικονομικής ανάλυσης

Επιτόκιο	g	g_m	g_b	g_e	i
Τιμή	3%	2%	2%	2%	8%

Χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων των σχέσεων υπολογισμού του αρχικού κόστους των υβριδικών συστημάτων (Πίνακας 6.Ι) υπολογίζεται το αρχικό κόστος για κάθε πιθανό συνδυασμό Φ/Β, Α/Γ και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού των εγκαταστάσεων. Αρχικά, κατά τον υπολογισμό του αρχικού κόστους των εγκαταστάσεων, δεν λαμβάνεται υπόψη η επιδότηση αρχικού κεφαλαίου, ενώ η επίδραση της επιδότησης στο κόστος παραγωγής των εγκαταστάσεων εξετάζεται σε ξεχωριστή ενότητα.

Για τον υπολογισμό του κόστους συντήρησης και λειτουργίας της εγκατάστασης, λαμβάνεται η μέση ετήσια διαχρονική τιμή του συντελεστή σταθερού κόστους συντήρησης και λειτουργίας της Φ/Β μονάδας, m_1, ίσος με 1,5% και του υπόλοιπου εξοπλισμού της εγκατάστασης, m_2, ίσος με 3%. Ο υπολογισμός του μεταβλητού κόστους συντήρησης και λειτουργίας του υβριδικού συστήματος συμπεριλαμβάνει τον απαιτούμενο αριθμό αντικαταστάσεων των συσσωρευτών και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που έχουν χρόνο ζωής μικρότερο του διαστήματος για το οποίο πραγματοποιείται οικονομική ανάλυση. Οι επιμέρους συντελεστές του μεταβλητού κόστους συντήρησης και λειτουργίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.IV.

Πίνακας** 7.IV: **Συντελεστές υπολογισμού του μεταβλητού κόστους συντήρησης και λειτουργίας του υβριδικού συστήματος

Εξοπλισμός	n_k	r_k	ρ_k
Συσσωρευτές	10 έτη	80%	95%
Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός	10 έτη	80%	95%

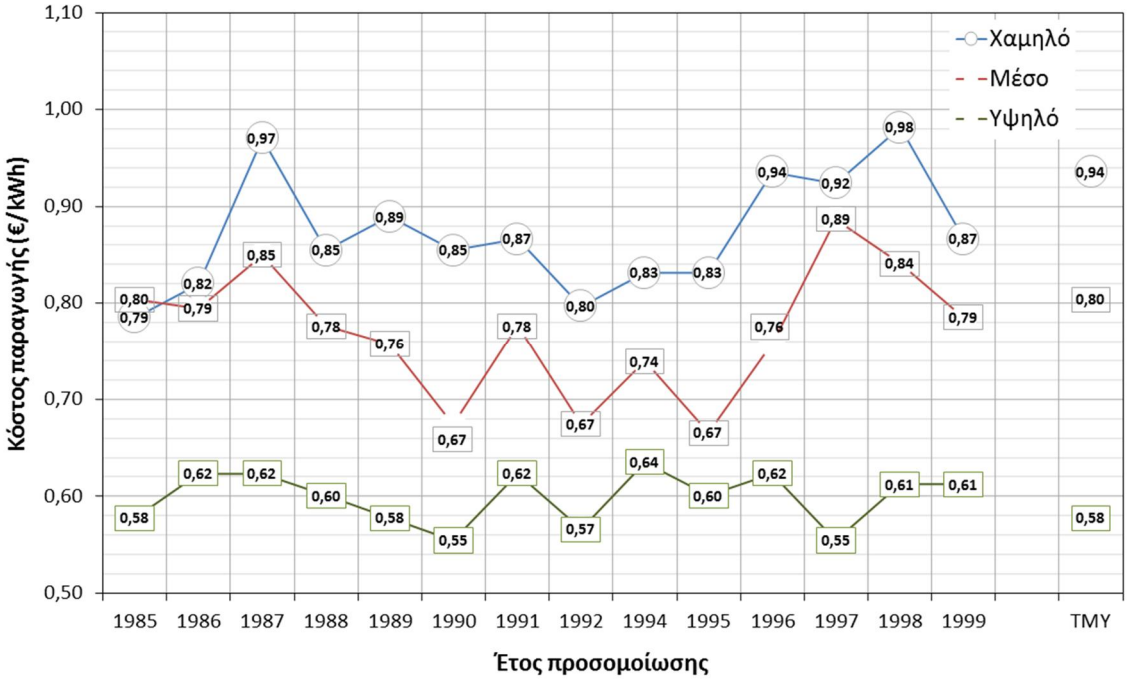
Τέλος, θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι, στο οικονομικό μοντέλο της παρούσας διατριβής, δεν λαμβάνεται υπόψη η παροχή δανείου για την υλοποίηση της εγκατάστασης, οπότε το σύνολο του κεφαλαίου, που απαιτείται για την υλοποίηση της εγκατάστασης, θεωρείται ότι το καταβάλλει ο ιδιοκτήτης της κατοικίας.

Για τον προσδιορισμό του ελάχιστου κόστους παραγωγής (€/kWh) κάθε μιας από τις υπό εξέταση περιπτώσεις, πραγματοποιείται προσομοίωση του υβριδικού συστήματος με ωριαίο βήμα για ένα έτος λειτουργίας προκειμένου να προσδιορισθεί η ενεργειακή συμπεριφορά της κάθε περίπτωσης. Στη συνέχεια, τα ενεργειακά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό της οικονομικής απόδοσης του συστήματος σε βάθος 20-ετίας. Οι υπό εξέταση περιπτώσεις καθορίζονται από τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου, οπότε κάθε τιμή κόστους παραγωγής αφορά περιοχή με συγκεκριμένο ηλιακό και αιολικό δυναμικό. Ο αριθμός των συνδυασμών, που εξετάζονται για την επίτευξη του συνδυασμού Φ/Β-Α/Γ-συσσωρευτών με το ελάχιστο κόστος παραγωγής, είναι τουλάχιστον 3750 προερχόμενος από 15 περιπτώσεις Φ/Β μονάδων σε συνδυασμό με 10

περιπτώσεις Α/Γ και 25 περιπτώσεις συσσωρευτών. Ο αριθμός των επαναλήψεων που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος για την επίτευξη των ενεργειακών αποτελεσμάτων ανά ώρα είναι μεγαλύτερος των 33 εκατομμυρίων επαναλήψεων (8760 επαναλήψεων για κάθε συνδυασμό).

7.3.2 Σύγκριση ΤΜΕ με αντίστοιχες πραγματικές χρονοσειρές

Λαμβάνοντας υπόψη τις χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας από τις οποίες συγκροτήθηκαν τα ΤΜΕ στις υπό μελέτη περιοχές, εξετάζεται η μεταβολή του κόστους παραγωγής ανάλογα με το έτος που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση. Στο Σχήμα 7.22 παρουσιάζεται η μεταβολή του ελάχιστου κόστους παραγωγής, που επιτυγχάνεται κατά τη διερεύνηση διαφορετικών συνδυασμών υβριδικών εγκαταστάσεων με χρήση των πραγματικών μετεωρολογικών δεδομένων αλλά και του ΤΜΕ. Η εμφανιζόμενη μεταβολή του κόστους παραγωγής αφορά περιπτώσεις συνδυασμών υβριδικών εγκαταστάσεων που εξασφαλίζουν στον καταναλωτή ενεργειακή αυτονομία όλες τις ώρες του έτους. Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το εκτιμώμενο κόστος παραγωγής διαφέρει από έτος σε έτος, παρόλο που αφορά την ίδια περιοχή. Κατά συνέπεια, η χρήση μεμονωμένων ετών στην προσομοίωση λειτουργίας ενεργειακών εγκαταστάσεων βασισμένων σε ΑΠΕ, παρουσιάζει αποκλίσεις κατά τη μακροχρόνια αξιολόγηση των συστημάτων.

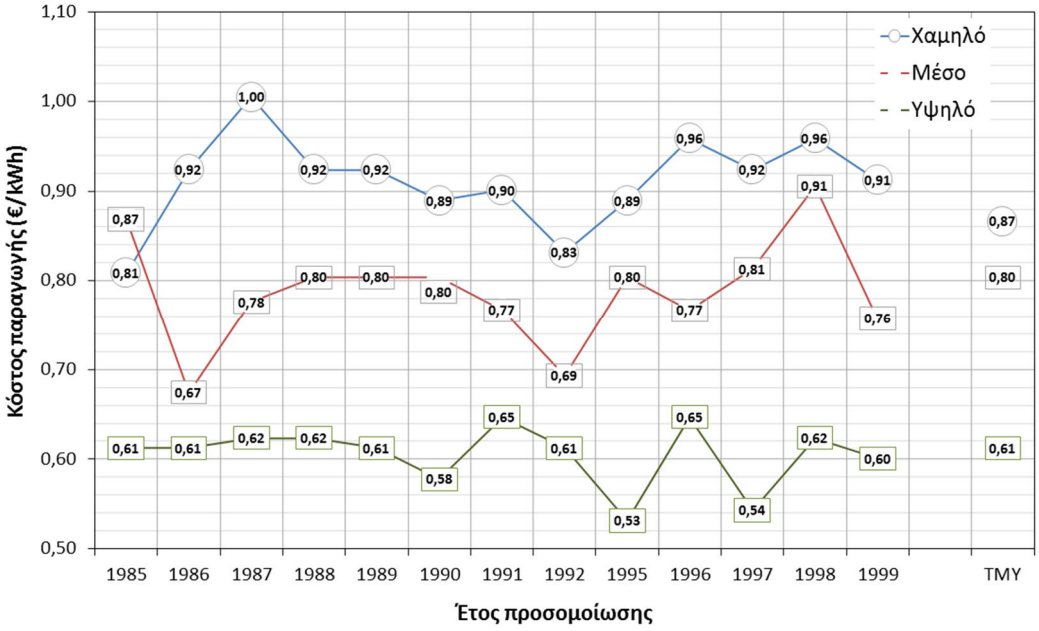


Σχήμα** 7.22 : **Μεταβολή του κόστους παραγωγής υβριδικού συστήματος στην Καστοριά, ανάλογα με τις τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και** 3 **σενάρια αιολικού δυναμικού

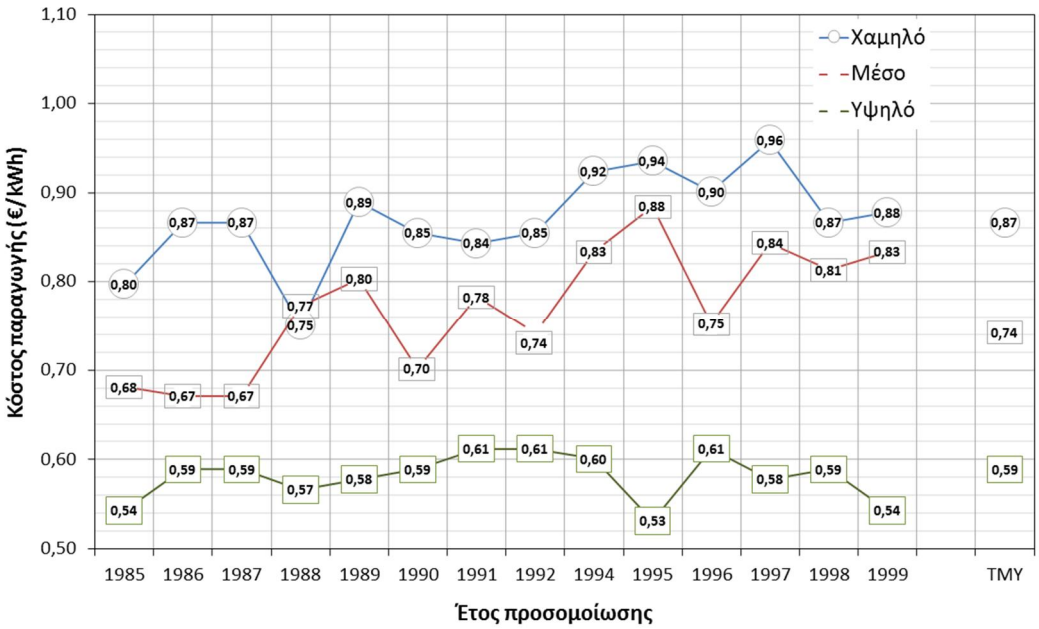
Ειδικότερα, στο σταθμό της Καστοριάς με χαμηλό αιολικό δυναμικό, το κόστος παραγωγής κυμαίνεται από 0,79 €/kWh, εάν χρησιμοποιηθεί η χρονοσειρά ατμοσφαιρικών παραμέτρων του έτους 1985, έως 0,98 €/kWh για τη χρονοσειρά τού 1998. Με τη μεταξύ τους απόκλιση να είναι 0,19 €/kWh (σχεδόν 25%) γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση χρονοσειρών συγκεκριμένων ετών εμπεριέχει πάντα την πιθανότητα το έτος που χρησιμοποιείται να μην είναι αντιπροσωπευτικό του κλίματος της περιοχής μελέτης. Εξετάζοντας το κόστος παραγωγής, που προκύπτει από τη χρήση του ΤΜΕ, διαπιστώνεται ότι η τιμή του είναι εντός των ορίων μεταβολής των αντίστοιχων τιμών από τα έτη από τα οποία προήλθε και βρίσκεται πολύ κοντά στη μέση τιμή της 15ετίας.

Εξετάζοντας συνολικά τα διαγράμματα των Σχημάτων 7.22 έως 7.25, διαπιστώνεται ότι το αιολικό δυναμικό έχει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόστους παραγωγής, επίδραση η οποία μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του ηλιακού δυναμικού. Ειδικότερα, η διαφορά κόστους παραγωγής, που προκύπτει μεταξύ χαμηλού και υψηλού αιολικού δυναμικού για τα ΤΜΕ στο σταθμό της Καστοριάς, είναι 0,36 €/kWh, ενώ στο σταθμό του Ηρακλείου 0,22 €/kWh. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, στις περιοχές με χαμηλό ηλιακό δυναμικό, αυξάνεται η συμμετοχή της Α/Γ στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, ενώ σε περιοχές με αυξημένο ηλιακό δυναμικό η Φ/Β μονάδα υποβαθμίζει τη συμμετοχή της Α/Γ. Επίσης, η επίδραση του αιολικού δυναμικού στη διαμόρφωση του κόστους παραγωγής παρατηρείται και στη διακύμανση των τιμών μεταξύ των διαφορετικών ετών. Ειδικότερα, ενώ η μεταβολή του κόστους παραγωγής, στις περιπτώσεις χαμηλού αιολικού δυναμικού κυμαίνεται μεταξύ 0,16 €/kWh (στο σταθμό του Ηρακλείου) και 0,19 €/kWh (στο σταθμό της Καστοριάς), στις περιπτώσεις υψηλού αιολικού δυναμικού, η αντίστοιχη μεταβολή είναι μεταξύ 0,07 €/kWh και 0,09 €/kWh.

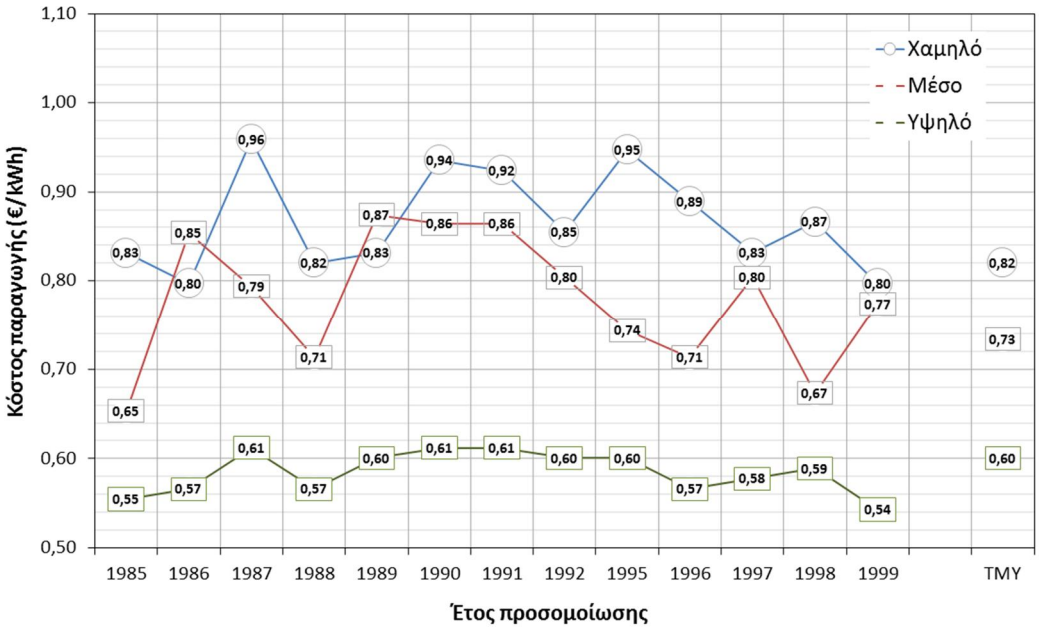
Συγκρίνοντας το κόστος παραγωγής μεταξύ των σταθμών με χαμηλό αιολικό δυναμικό διαπιστώνεται ότι μεταξύ Βόρειας και Νότιας Ελλάδας οι τιμές κυμαίνονται από 0,94 €/kWh έως 0,82 €/kWh, δηλαδή μεταβολή περίπου 15%. Οι διαφορές στο κόστος παραγωγής προκύπτουν από το γεγονός ότι, για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας του καταναλωτή στην Καστοριά απαιτείται υβριδικό σύστημα το οποίο αποτελείται από Α/Γ 5 kW, Φ/Β μονάδα 6 kW και συσσωρευτές αποθηκευτικής ικανότητας 21 kWh. Για τον ίδιο καταναλωτή, σε αντίστοιχες συνθήκες αιολικού δυναμικού, στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης, επιτυγχάνεται ενεργειακή αυτονομία με υβριδικό σύστημα το οποίο αποτελείται από Α/Γ 9 kW, Φ/Β μονάδα 5 kW και συσσωρευτές 14 kWh. Συγκρίνοντας τα δύο υβριδικά συστήματα διαπιστώνεται ότι η αύξηση του ηλιακού δυναμικού επιφέρει μικρή μείωση της ισχύος της Φ/Β μονάδας και σημαντική μείωση του αριθμού των συσσωρευτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ανηγμένο κόστος της Α/Γ (€/kW) είναι μικρότερο του αντίστοιχου της Φ/Β μονάδας και ως εκ τούτου το μοντέλο επιλέγει να διατηρήσει τη Φ/Β μονάδα σε χαμηλές τιμές ισχύος και να αυξήσει την ισχύ της Α/Γ προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της χωρητικότητας των συσσωρευτών.



Σχήμα** 7.23: **Όπως στο Σχήμα** 7.22, **αλλά στη Μίκρα



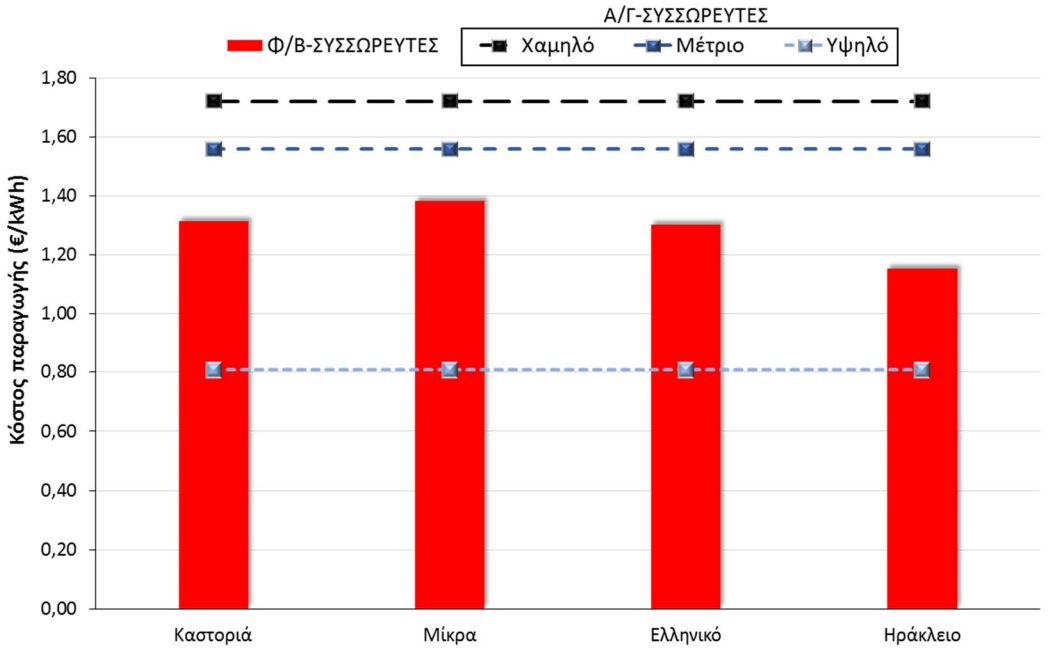
Σχήμα** 7.24: **Όπως στο Σχήμα** 7.22, **αλλά στο Ελληνικό



Σχήμα** 7.25: **Όπως στο Σχήμα** 7.22, **αλλά στο Ηράκλειο Κρήτης

7.3.3 Επίδραση των ΑΠΕ στο κόστος παραγωγής

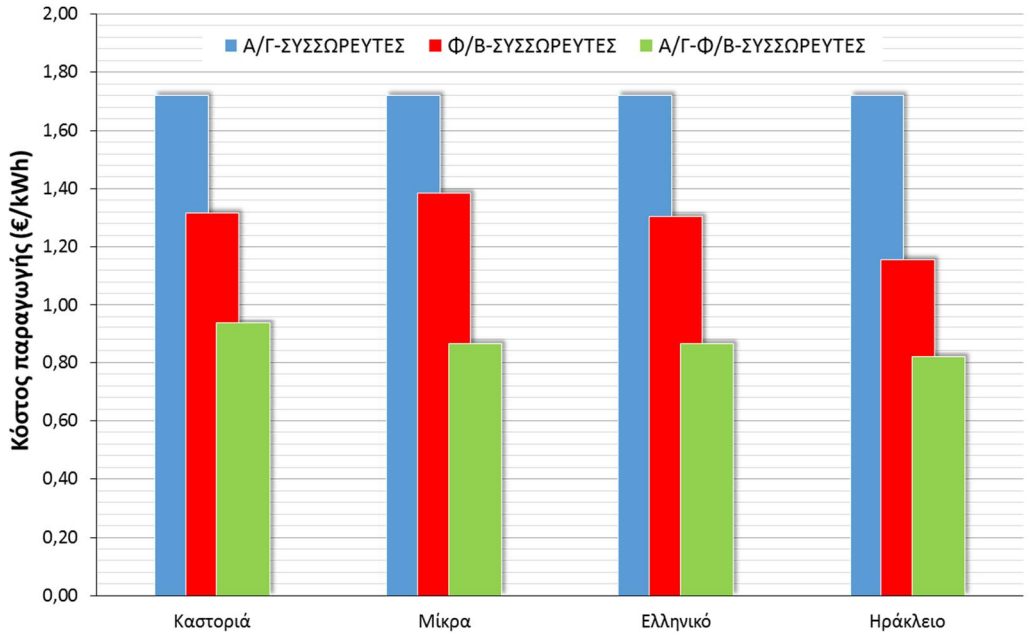
Η χρήση των υβριδικών συστημάτων ευνοεί σημαντικά τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην κάλυψη ενεργειακών αναγκών αυτόνομων καταναλωτών. Διερευνάται, στη συνέχεια, πώς διαμορφώνεται το κόστος παραγωγής στην περίπτωση συστημάτων που αποτελούνται είτε από Φ/Β μονάδα και συσσωρευτές, είτε από Α/Γ και συσσωρευτές.



Σχήμα** 7.26: **Διαμόρφωση κόστους παραγωγής σε περιπτώσεις μεμονωμένης χρήσης Φ/Β και Α/Γ

Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 7.26, το κόστος παραγωγής ενεργειακών μονάδων που αποτελούνται μόνο από Φ/Β ή μόνο από Α/Γ είναι σημαντικά υψηλότερο, ξεπερνώντας, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, το 1 €/kWh. Επίσης, παρατηρείται ότι, σε περιοχές με χαμηλό ή μέσο αιολικό δυναμικό, ο συνδυασμός Φ/Β-συσσωρευτών αποτελεί οικονομικότερη λύση σε σχέση με την περίπτωση χρήσης Α/Γ-συσσωρευτών με τη διαφορά κόστους να είναι μεγαλύτερη των 0,20 €/kWh. Η χρήση μόνο Α/Γ ενδείκνυται στις περιπτώσεις υψηλού αιολικού δυναμικού που σε κάθε περίπτωση το κόστος παραγωγής εμφανίζει μείωση μεγαλύτερη των 0,40 €/kWh σε σχέση με την επιλογή των Φ/Β. Η διαφορά κόστους παραγωγής μεταξύ της επιλογής Φ/Β και Α/Γ προκύπτει από την απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών προκειμένου να επιτευχθεί ενεργειακή αυτονομία. Λόγω της αυξημένης στοχαστικής συμπεριφοράς του ανέμου, στα αυτόνομα συστήματα, που χρησιμοποιούν μόνο Α/Γ, αυξάνονται σημαντικά οι απαιτήσεις σε συσσωρευτές. Στην Καστοριά, για παράδειγμα, η αυτονομία επιτυγχάνεται, είτε από ενεργειακή μονάδα που αποτελείται από Φ/Β 19 kW και συσσωρευτές 19 kWh, είτε από Α/Γ 21 kW και συσσωρευτές 45 kWh (στην περίπτωση χαμηλού αιολικού δυναμικού). Στην περίπτωση υψηλού αιολικού δυναμικού, στην ίδια περιοχή, η επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας μπορεί να επιτευχθεί με Α/Γ 7 kW και συσσωρευτές 14 kWh, καθώς ο αριθμός των ωρών όπου η Α/Γ βρίσκεται εκτός λειτουργίας, λόγω χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, μειώνεται σημαντικά.

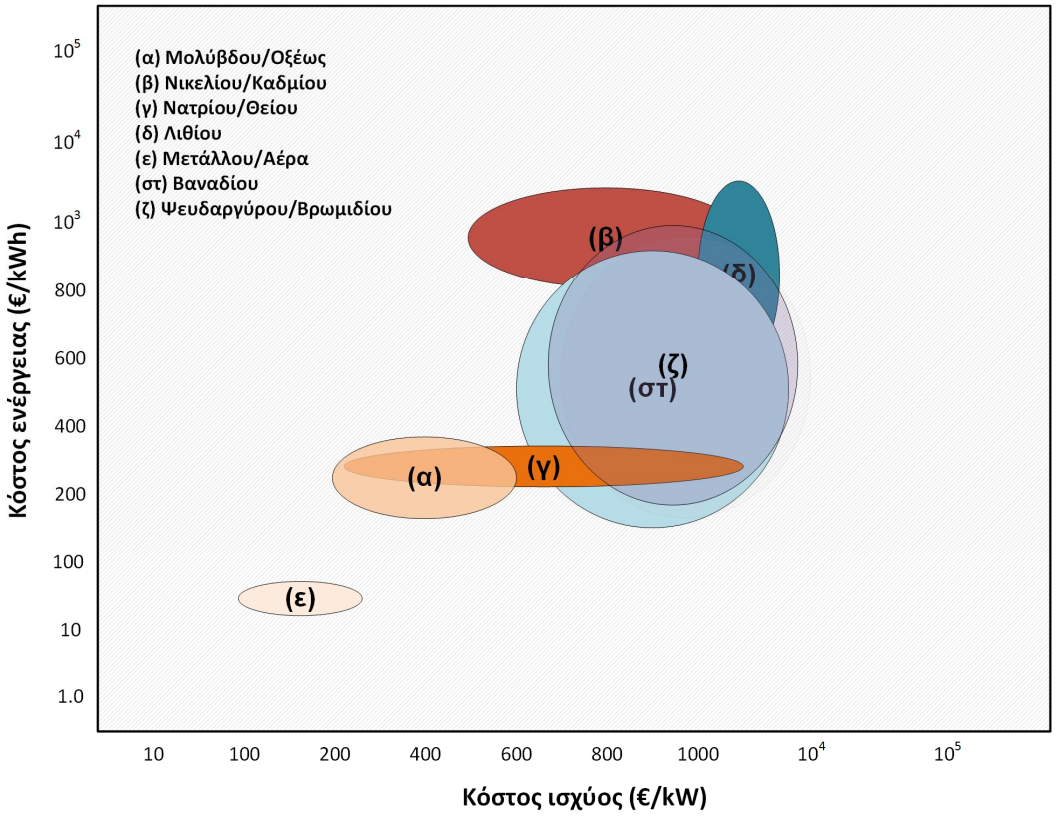
Συγκρίνοντας όλες τις δυνατές περιπτώσεις κόστους παραγωγής, που προκύπτουν από τη μεμονωμένη χρήση Φ/Β και Α/Γ καθώς και σε συνεργασία των δύο, προκύπτει το Σχήμα 7.27. Στο συγκεκριμένο σχήμα εξετάζεται η περίπτωση χαμηλού αιολικού δυναμικού. Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα, η συμμετοχή Φ/Β μονάδων στα αυτόνομα συστήματα, που βασίζονται μόνο σε Α/Γ, μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής κατά 50%, ακόμη και όταν η περιοχή διαθέτει χαμηλό αιολικό δυναμικό. Αντίστοιχα, η χρήση Α/Γ στα αυτόνομα συστήματα, που βασίζονται μόνο σε Φ/Β, μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής μέχρι και στο 60% της αρχική τιμής, ακόμα και αν η περιοχή δεν διαθέτει υψηλό αιολικό δυναμικό.



Σχήμα** 7.27: **Σύγκριση κόστους παραγωγής διαφορετικών συνδυασμών Φ/Β, Α/Γ και συσσωρευτών σε περίπτωση χαμηλού αιολικού δυναμικού

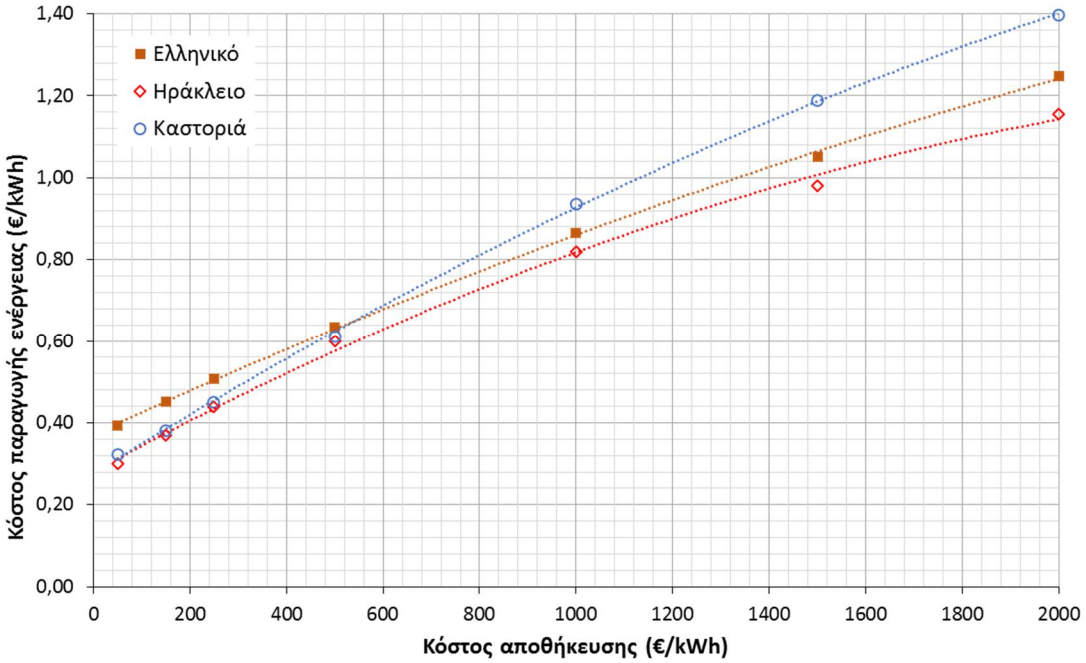
7.3.4 Επίδραση του αρχικού κόστους αποθήκευσης

Σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση του κόστους παραγωγής ενός υβριδικού συστήματος αποτελεί το κόστος του συστήματος αποθήκευσης. Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται σημαντική πρόοδος στον τομέα έρευνας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, αυξάνοντας τις επιλογές μέσων αποθήκευσης πέρα από τα συμβατικά συστήματα. Ως εκ τούτου, διαμορφώνεται με αυτό τον τρόπο ένα εύρος κόστους τού συστήματος αποθήκευσης ανάλογα με το είδος του. Στο Σχήμα 7.28 αποτυπώνεται το κόστος διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης (αναπαραγωγή από Zafirakis 2010) από όπου διαπιστώνεται το μεγάλο εύρος κόστους για τις διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης. Για τους παραπάνω λόγους εξετάζεται η επίδραση του κόστους παραγωγής τών υβριδικών συστημάτων στην παρούσα διατριβή από τη μεταβολή του κόστους του επιλεγόμενου συστήματος αποθήκευσης.

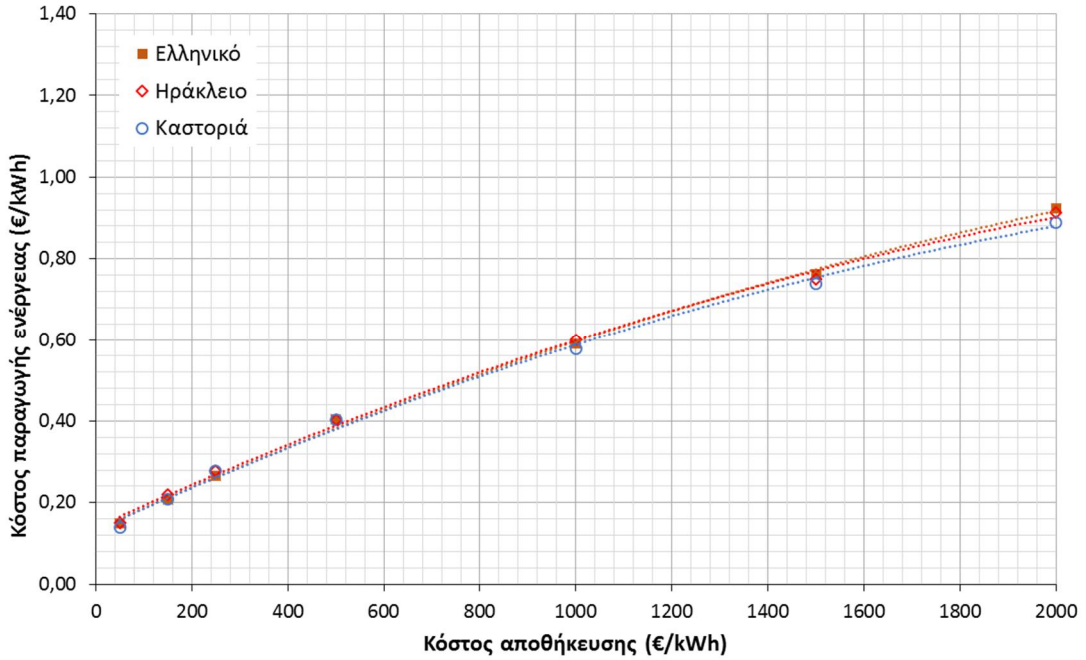


***Σχήμα** 7.28: **Κόστος συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας** (**αναπαραγωγή από** Zafirakis 2010)*

Εξετάζονται οι περιπτώσεις χαμηλού (Σχήμα 7.29) και υψηλού αιολικού δυναμικού (Σχήμα 7.30) για τις θέσεις των σταθμών Καστοριάς, Ελληνικού και Ηρακλείου Κρήτης. Το μειωμένο ηλιακό δυναμικό, σε συνδυασμό με το χαμηλό αιολικό δυναμικό στο σταθμό της Καστοριάς, καθιστά το σύστημα αποθήκευσης σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση του κόστους παραγωγής των υβριδικών συστημάτων. Στην περίπτωση της Καστοριάς, ο ρυθμός αύξησης του κόστους παραγωγής είναι κατά μέσο όρο 0,60 € ανά 100 € αύξηση του κόστους αποθήκευσης. Αντίστοιχα, στους σταθμούς του Ελληνικού και του Ηρακλείου, το κόστος παραγωγής αυξάνεται κατά 0,50 € περίπου ανά 100 € αύξηση του κόστους αποθήκευσης. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση της σχέσης μεταβολής του κόστους παραγωγής ως προς το κόστος αποθήκευσης, μέσω μοντέλου παλινδρόμησης, είναι πολυωνυμική καμπύλη 2^{ου} βαθμού, όπως προκύπτει από τα διαγράμματα των Σχημάτων 7.29 και 7.30. Ως εκ τούτου, ο ρυθμός αύξησης του κόστους παραγωγής μειώνεται με την αύξηση του κόστους αποθήκευσης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην περίπτωση της Καστοριάς, η ενεργειακή αυτονομία του υβριδικού συστήματος βασίζεται σε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αυξημένων διαστάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στις περιπτώσεις ιδιαίτερα χαμηλού κόστους αποθήκευσης, το κόστος παραγωγής στην Καστοριά να γίνεται ανταγωνιστικό τού αντίστοιχου σε περιοχές με υψηλότερο ηλιακό δυναμικό, όπως το Ελληνικό, όπου αυξάνεται η συμμετοχή τών Φ/Β.



Σχήμα** 7.29: **Μεταβολή του κόστους παραγωγής για διαφορετικές επιλογές κόστους συστήματος αποθήκευσης σε συνθήκες χαμηλού αιολικού δυναμικού



Σχήμα** 7.30: **Όπως στο Σχήμα** 7.29, **αλλά σε συνθήκες υψηλού αιολικού δυναμικού

Στην περίπτωση υψηλού αιολικού δυναμικού (Σχήμα 7.30) διαπιστώνεται ότι οι καμπύλες μεταβολής του κόστους παραγωγής ως προς το κόστος αποθήκευσης, σχεδόν ταυτίζονται για τις τρεις περιπτώσεις σταθμών. Το κόστος παραγωγής κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με την περίπτωση χαμηλού αιολικού δυναμικού, όπως άλλωστε ήταν και αναμενόμενο, αφού

μειώνονται οι απαιτήσεις αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 7.29 και 7.30, διαπιστώνεται ότι η διαφορά κόστους παραγωγής μεταξύ υψηλού και χαμηλού αιολικού δυναμικού, στις περιπτώσεις χαμηλού κόστους αποθήκευσης, είναι μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη διαφορά στις περιπτώσεις υψηλού κόστους αποθήκευσης. Ειδικότερα, το μέσο κόστος παραγωγής στις υπό εξέταση περιοχές με χαμηλό αιολικό δυναμικό, για χαμηλό κόστος αποθήκευσης, είναι 0,34 €/kWh, ενώ για τις ίδιες περιοχές και για υψηλό αιολικό δυναμικό αυτό είναι μειωμένο κατά 0,19 €/kWh. Αντίστοιχα, το μέσο κόστος παραγωγής για τις υπό εξέταση περιοχές με υψηλό κόστος αποθήκευσης είναι 1,27 €/kWh, το οποίο μειώνεται κατά 0,36 €/kWh στις περιπτώσεις υψηλού αιολικού δυναμικού, μία μείωση σχεδόν διπλάσια από την αντίστοιχη χαμηλού αιολικού δυναμικού.

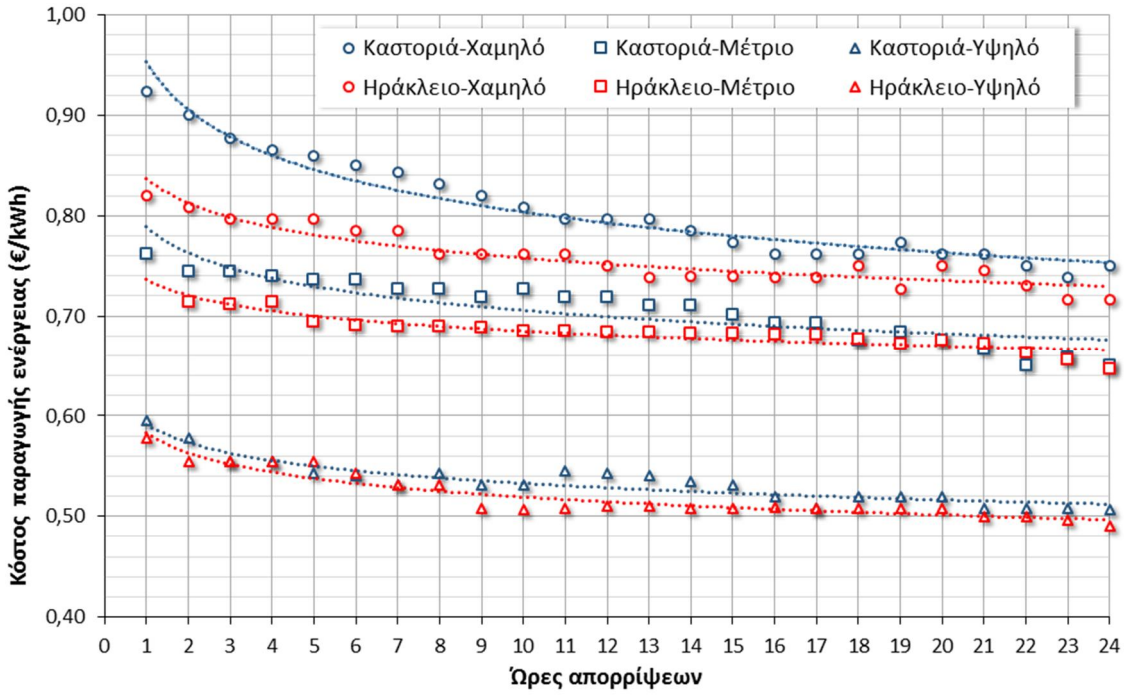
Σύμφωνα με τα παραπάνω, το αρχικό κόστος του συστήματος αποθήκευσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση του κόστους παραγωγής των υβριδικών συστημάτων. Παρόλα αυτά, η επιλογή του συστήματος αποθήκευσης θα πρέπει να βασίζεται και σε άλλα κριτήρια, όπως αξιοπιστία, κόστος λειτουργίας, χρόνος ζωής και ωριμότητα της τεχνολογίας, που αποτελούν εξίσου σημαντικές παραμέτρους.

7.3.5 Μείωση κόστους με επιτρεπόμενες απορρίψεις φορτίου

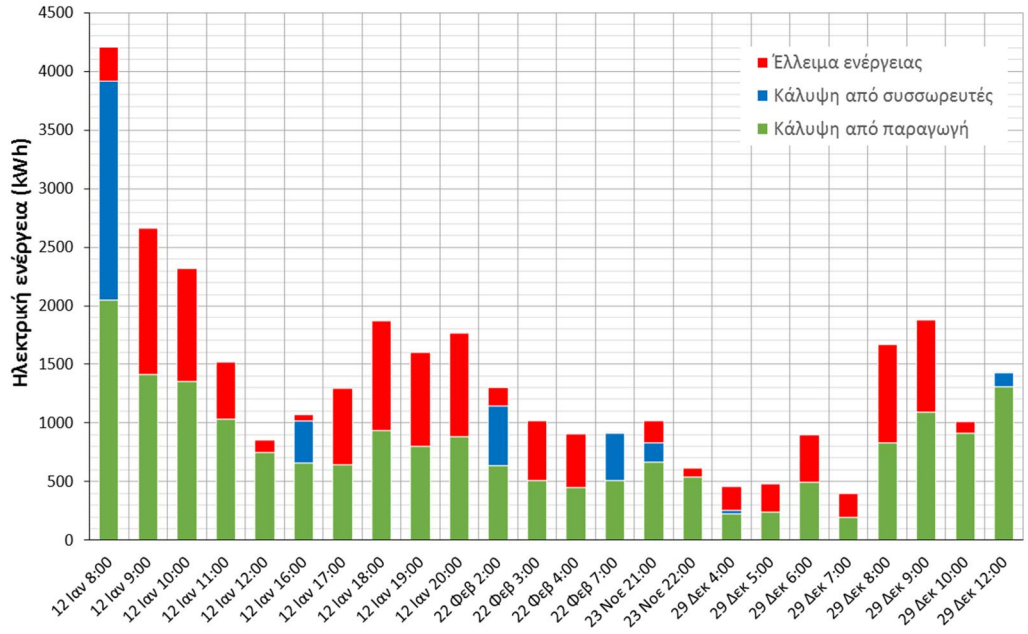
Σε όλες τις προηγούμενες οικονομικές αναλύσεις, το κόστος παραγωγής αφορά υβριδικά συστήματα ικανά να εξασφαλίσουν ενεργειακή αυτονομία στον καταναλωτή. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα διαστασιολογείται για να παρέχει αδιάκοπα ηλεκτρική ενέργεια στην κατανάλωση χωρίς να παρουσιάζεται έλλειμα ενέργειας (μηδενικές απορρίψεις φορτίου). Ένας τρόπος συμπίεσης του κόστους παραγωγής είναι η αύξηση του επιτρεπόμενου αριθμού ωρών απορρίψεων από 0 (περίπτωση αυτονομίας) έως έναν αποδεκτό αριθμό. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός μπορεί να προκύψει, είτε από τα επιθυμητά επίπεδα συμπίεσης του κόστους, είτε από τον αριθμό απορρίψεων πέραν του οποίου δεν προκαλείται σημαντική οικονομική ζημία στον καταναλωτή, είτε από τις ώρες όπου η κατανάλωση μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες από ένα εφεδρικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής για τις ακραίες περιπτώσεις λειτουργίας του υβριδικού συστήματος.

Στο Σχήμα 7.31 παρουσιάζεται η μεταβολή του κόστους παραγωγής με την αύξηση του επιτρεπόμενου αριθμού απορρίψεων έως και 24 ώρες κατά τη διάρκεια ενός έτους. Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι σε περιπτώσεις χαμηλής ηλιοφάνειας και χαμηλού αιολικού δυναμικού, το κόστος παραγωγής μπορεί να μειωθεί άνω του 20% φθάνοντας τα 0,76 €/kWh. Ακόμη μικρότερες τιμές μπορούν να επιτευχθούν σε περιοχές με υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό, όπου το κόστος παραγωγής μειώνεται κάτω των 0,50 €/kWh.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ώρες απόρριψης φορτίου δεν είναι απαραίτητα διαδοχικές, αλλά, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, εμφανίζονται σε διαφορετικές περιόδους μέσα στο έτος. Για παράδειγμα, στις δυσμενείς περιόδους στο σταθμό της Καστοριάς (Σχήμα 7.32), ο μέγιστος αριθμός ωρών διαδοχικών περικοπών ισούται με επτά, οι οποίες εμφανίσθηκαν τις πρώτες πρωϊνές ώρες στις 29 Δεκεμβρίου. Η δεύτερη ημέρα με σημαντικές περικοπές είναι η 12^{η} Ιανουαρίου όπου για δύο 5ωρα, ένα τις πρωϊνές και ένα τις απογευματινές ώρες, το υβριδικό σύστημα δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες του καταναλωτή.



Σχήμα** 7.31 : **Μεταβολή του κόστους παραγωγής με την αύξηση των ωρών απορρίψεων φορτίου σε περιπτώσεις χαμηλού, μέτριου και υψηλού αιολικού δυναμικού



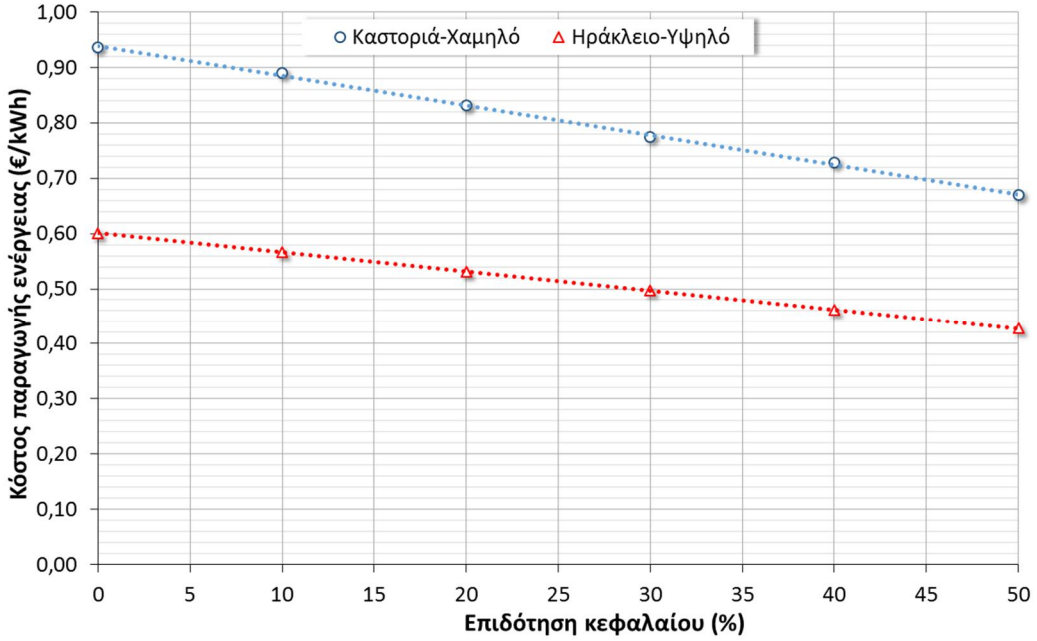
Σχήμα** 7.32: **Ισοζύγιο ενέργειας τις ώρες απόρριψης φορτίου στο σταθμό της Καστοριάς σε συνθήκες χαμηλού αιολικού δυναμικού

Επίσης, σημαντικό στοιχείο αποτελεί ότι ως ώρες απόρριψης καταγράφονται οι περιπτώσεις όπου παρουσιάζεται έλλειμα ενέργειας, χωρίς όμως να προσδιορίζεται η ενέργεια που υπολείπεται σε σχέση με την κατανάλωση. Κατά συνέπεια, με τη χρήση ενός συστήματος διαχείρισης φορτίων, το οποίο κατατάσσει τις καταναλώσεις σε κατηγορίες ανάλογα με την κρισιμότητά τους, δί-

δεται η δυνατότητα στις περιόδους, όπου παρουσιάζεται έλλειμα ενέργειας, να απενεργοποιούνται δευτερεύοντα φορτία, μειώνοντας σημαντικά τις ενδεχόμενες οικονομικές επιπτώσεις στον καταναλωτή. Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 7.32, σε ορισμένες περιπτώσεις το έλλειμα ενέργειας είναι μικρότερο του 50% της ζήτησης, ενώ στην περίπτωση της 29ης Δεκεμβρίου, στις 12:00, το παρατηρούμενο έλλειμα είναι μικρότερο του 1% της ζήτησης στη συγκεκριμένη ώρα.

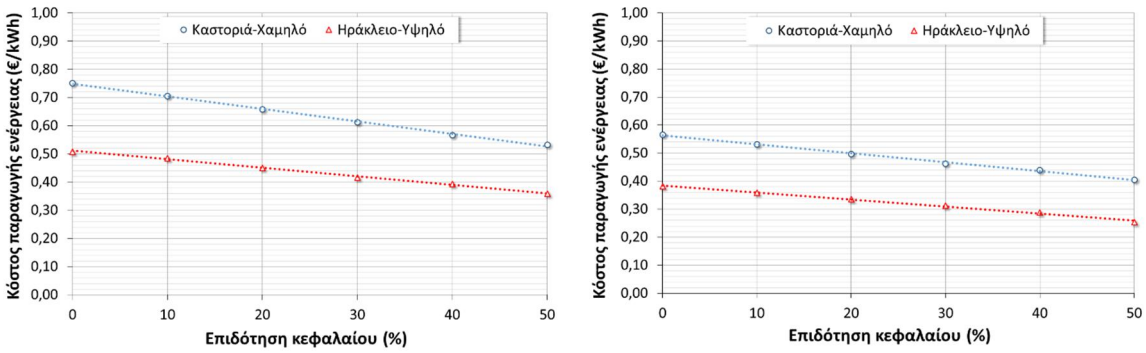
7.3.6 Διαμόρφωση κόστους παραγωγής με επιδότηση αρχικού κεφαλαίου

Η οικονομική απόδοση και η βιωσιμότητα των ενεργειακών εγκαταστάσεων που βασίζονται σε ΑΠΕ μπορεί να αλλάξει σημαντικά με την οικονομική ενίσχυση/κίνητρα της πολιτείας υπό τη μορφή επιδότησης του αρχικού κεφαλαίου που απαιτείται για την υλοποίηση της εγκατάστασης. Λαμβάνοντας υπόψη την υποβάθμιση του περιβάλλοντος, που προκαλεί η χρήση συμβατικών καυσίμων στον τομέα τής ηλεκτροπαραγωγής, η επιδότηση των υβριδικών συστημάτων θεωρείται ανταποδοτικό όφελος για τις μακροοικονομικές επιπτώσεις της ρύπανσης. Ως εκ τούτου, εξετάζονται, στη συνέχεια, διαφορετικά σενάρια επιδότησης έως και 50% για τις δύο πιο ακραίες περιπτώσεις ανανεώσιμου δυναμικού, που αφορούν στην περίπτωση χαμηλού ηλιακού και αιολικού δυναμικού και αντίστοιχα υψηλού ηλιακού και αιολικού δυναμικού (Σχήμα 7.33).



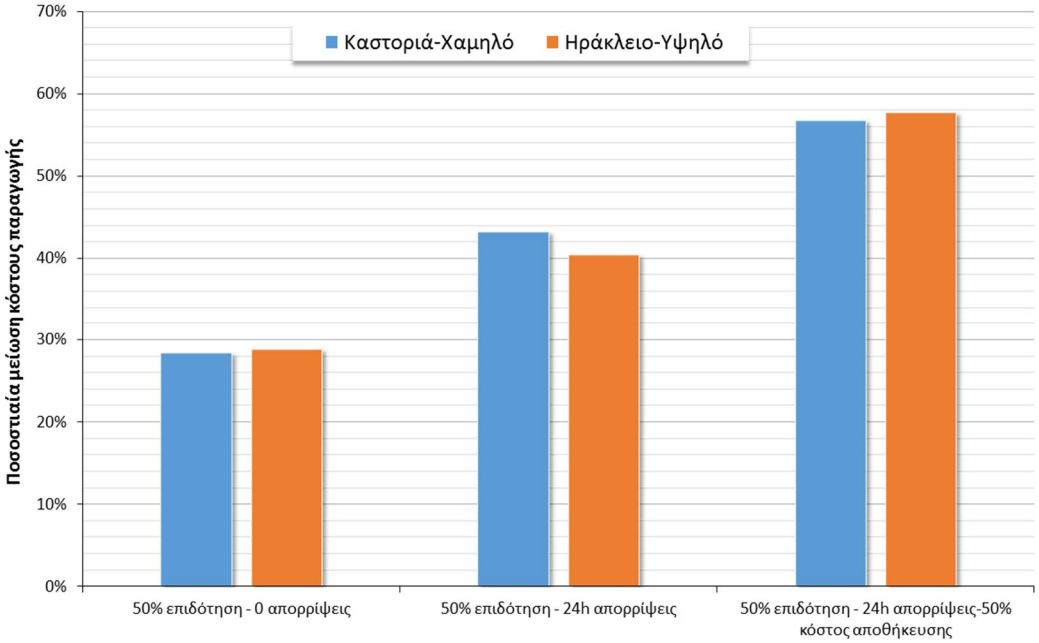
Σχήμα** 7.33: **Επίδραση της επιδότησης του αρχικού κόστους του υβριδικού συστήματος στο κόστος παραγωγής για πλήρη αυτονομία στις περιπτώσεις χαμηλού και υψηλού αιολικού/ηλιακού δυναμικού

Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 7.33, το κόστος παραγωγής μειώνεται κατά 0,27 €/kWh στην περίπτωση χαμηλού ανανεώσιμου δυναμικού και κατά 0,17 €/kWh στην περίπτωση υψηλού. Για τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται και το προφίλ του καταναλωτή, προκύπτει μεταβολή του κόστους παραγωγής αυτόνομων υβριδικών συστημάτων στην Ελλάδα από 0,40 έως 0,70 €/kWh με επιδότηση αρχικού κεφαλαίου κατά 50%.



Σχήμα** 7.34: **Επίδραση της επιδότησης του αρχικού κόστους του υβριδικού συστήματος στο κόστος παραγωγής – περίπτωση επιτρεπόμενης απόρριψης φορτίου έως** 24 **ώρες το έτος (α) και επιπρόσθετα επιλογή αποθήκευσης κόστους μειωμένο κατά** 50% **(β) στις περιπτώσεις χαμηλού και υψηλού αιολικού/ηλιακού δυναμικού

Σύμφωνα με τα σενάρια που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, εξετάζεται πλέον αθροιστικά η μείωση του κόστους που μπορεί να επιτευχθεί με την υιοθέτηση επιτρεπόμενου αριθμού περικοπών έως και 24 ώρες μέσα στο έτος, καθώς επίσης και η περίπτωση επιλογής συστήματος αποθήκευσης με κόστος 50% μικρότερο του βασικού σεναρίου (Σχήμα 7.34). Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα, το κόστος παραγωγής μειώνεται σε 0,25 €/kWh, κόστος το οποίο είναι χαμηλότερο από την επιλογή χρήσης ηλεκτρογεννήτριας πετρελαίου, λαμβάνοντας υπόψη τυπικές τιμές βαθμού απόδοσης, κόστους και θερμογόνου δύναμης καυσίμου και κόστος ετήσιας συντήρησης (Καλδέλλης & Καββαδίας 2005).



Σχήμα** 7.35: **Μείωση κόστους παραγωγής με επιδότηση** 50% **για διαφορετικά σενάρια κόστους και λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων σε σχέση με την αρχική τιμή στις περιπτώσεις χαμηλού και υψηλού αιολικού/ηλιακού δυναμικού

Από τα Σχήματα 7.33 και 7.34 προκύπτει ότι τα εξεταζόμενα σενάρια έχουν διαφορετική επίπτωση στη μείωση του κόστους παραγωγής. Στο Σχήμα 7.35 συγκεντρώνονται οι μειώσεις τιμών που επιτυγχάνονται με επιδότηση του αρχικού κεφαλαίου κατά 50% εφαρμοζόμενη μεμονωμένα

και σε συνδυασμό με την αύξηση των επιτρεπόμενων απορρίψεων έως 24 ώρες και την επιλογή συστήματος αποθήκευσης με κόστος μειωμένο κατά 50%. Οι τιμές του διαγράμματος αφορούν τη μείωση που επιτυγχάνεται, σε σχέση με το βασικό σενάριο, το οποίο αφορά πλήρη ενεργειακή αυτονομία της εγκατάστασης, χωρίς επιδότηση αρχικού κεφαλαίου και αρχικό κόστος συστήματος αποθήκευσης ίσο με 1000 €/kWh. Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 7.35, το κόστος παραγωγής μειώνεται κυρίως με την επιδότηση του αρχικού κεφαλαίου, που είναι αναμενόμενο, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα έξοδα συντήρησης ενός υβριδικού συστήματος αποτελούν μικρό ποσοστό του απαιτούμενου αρχικού κεφαλαίου.

7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία

Η προσομοίωση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ προσελκύει το ενδιαφέρον των ερευνητών εδώ και δεκαετίες. Ειδικότερα τα τελευταία χρόνια, με τις δυνατότητες που παρέχουν τα υπολογιστικά συστήματα σε συνδυασμό με το χαμηλό τους κόστος, διευκόλυνε τη δημιουργία και τον έλεγχο μοντέλων και προγραμμάτων, τα οποία απαιτούνται για την προσομοίωση των υβριδικών συστημάτων. Στη βιβλιογραφία υπάρχει σημαντικός αριθμός μεθόδων προσομοίωσης της λειτουργίας υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ. Οι Nema et al. (2009), Erdinc & Uzunoglu (2012), Ekren & Ekren (2010) συγκεντρώνουν τις περισσότερες από τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί διαχρονικά για υβριδικά συστήματα τα οποία συνδυάζουν Φ/Β-Α/Γ- συσσωρευτές. Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικές εργασίες ερευνητικών ομάδων, που έχουν, ως αντικείμενο τη διαστασιολόγηση και οικονομική αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων Α/Γ-Φ/Β, σε περιοχές που πλησιάζουν τα χαρακτηριστικά ηλιακού και αιολικού δυναμικού με τα αντίστοιχα της παρούσας διατριβής, καθώς επίσης και ενεργειακές καταναλώσεις κλίμακας οικιακών καταναλωτών.

Οι Dalwadi et al. (2011) χρησιμοποίησαν το λογισμικό Homer[2] για την προσομοίωση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος που περιλάμβανε Α/Γ 1 kW, Φ/Β συνολικής ισχύος 2 kW και συσσωρευτές 2,4 kWh στην περιοχή Βαντοντάρα στο Γκουτζαράτ της Ινδίας. Η ετήσια ηλιακή ενέργεια στην περιοχή ήταν 2018 kWh/m^2 και η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου ίση με 3,74 m/s. Το υβριδικό σύστημα σχεδιάσθηκε για να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε οικιακό καταναλωτή με συνολικές ετήσιες ηλεκτρικές ανάγκες 1825 kWh. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ερευνητών, το κόστος παραγωγής του υβριδικού συστήματος ήταν ίσο με 0,78 €/kWh, ωστόσο, από τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων τους, προκύπτει ότι το συγκεκριμένο υβριδικό σύστημα δεν παρείχε πλήρη αυτονομία, καθώς ηλεκτρική ενέργεια 0,564 kWh κατά τη διάρκεια ενός έτους δεν μπόρεσε να ικανοποιηθεί.

Οι Panayiotou et al. (2012), αξιοποιώντας το λογισμικό TRNSYS, μελέτησαν το κόστος υβριδικού συστήματος στη Λευκωσία της Κύπρου και στη Νίκαια της Γαλλίας. Οι συνολικές ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του οικιακού καταναλωτή, που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές, ήταν ίσες με 8760 kWh. Η ετήσια ηλιακή ενέργεια στην περιοχή της Λευκωσίας ήταν ίση με 1790 kWh/m^2, ενώ η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, σύμφωνα με τους Pashardes & Christofides (1995) μικρότερη των 3 m/s. Αντίστοιχα, στη Νίκαια η ετήσια ηλιακή ενέργεια ήταν ίση με 1482 kWh/m^2 και η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου 4 m/s (World Weather & Climate Information 2015). Στην περιοχή της Λευκωσίας το υβριδικό σύστημα παρείχε πλήρη αυτονομία με το ελάχιστο κόστος περιλαμβάνοντας Α/Γ 1,5 kW, Φ/Β ισχύος 10,98 kW και συσσωρευτές 108 kWh. Το συνολικό κόστος για 25-ετή λειτουργία του υβριδικού συστήματος ανήλθε στα 103700 € από το οποίο προκύπτει ένα μέσο κόστος παραγωγής 0,437 €/kWh. Το αντίστοιχο υβριδικό σύστημα στη Νίκαια περιλάμβανε Α/Γ

[2] Λογισμικό που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση υβριδικών συστημάτων και έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο NREL.

4,8 kW, Φ/Β συνολικής ισχύος 9,9 kW και συσσωρευτές 108 kWh. Το συνολικό κόστος για 25 χρόνια λειτουργίας τού υβριδικού συστήματος εκτιμήθηκε από τους ερευνητές ίσο με 104973 €, δηλαδή μέσο κόστος παραγωγής 0,473 €/kWh.

Οι Diaf et al. (2008) χρησιμοποίησαν βασικές σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία Α/Γ, Φ/Β και συσσωρευτών για την προσομοίωση υβριδικού συστήματος σε τρεις περιοχές της Κορσικής, στο Αιάκιο, στο Κάλβι και στο Καπ Κορς. Η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου ήταν (όπως προκύπτει από τα διαγράμματα ενδοετήσιας κατανομής μέσης μηνιαίας ταχύτητας ανέμου που παρουσιάζουν οι ερευνητές) 3, 4 και 7 m/s, αντίστοιχα, ενώ η μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια 1300-1350 kWh/m^2. Το υβριδικό σύστημα σχεδιάσθηκε για να παρέχει αυτονομία σε οικιακό καταναλωτή με συνολικές ετήσιες ηλεκτρικές ανάγκες ίσες με 1095 kWh. Το κόστος παραγωγής υπολογίσθηκε από τους ερευνητές ίσο με 0,806 €/kWh στο Καπ Κορς, 1,256 €/kWh στο Κάλβι και 1,265 €/kWh στο Αιάκιο.

Στην Ελλάδα, οι Fantidis et al. (2011) παρουσίασαν μία μελέτη περίπτωσης υβριδικού συστήματος στη Σαμοθράκη με μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια 1536 kWh/m^2 και μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στα 6 m/s περίπου. Για την προσομοίωση του υβριδικού συστήματος οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το λογισμικό Homer. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, το υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από Α/Γ 2,5 kW, Φ/Β ισχύος 3 kW και συσσωρευτές χωρητικότητας 41,85 kWh, είναι η καλύτερη λύση για την ηλεκτροδότηση οικιακού καταναλωτή, με κόστος παραγωγής 0,312 kWh/m^2.

Από τις παραπάνω εργασίες διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής βρίσκονται εντός των αναμενόμενων ορίων και δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Φυσικά θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη ότι εφόσον δεν χρησιμοποιηθούν τα ίδια δεδομένα, στις διαφορετικές προσεγγίσεις ενεργειακής και οικονομικής αξιολόγησης των υβριδικών συστημάτων, τα αποτελέσματα δεν δύναται να ταυτίζονται.

Βιβλιογραφία

Dalwadi, P., Shrinet, V., Mehta, C.R. & Shah, P., 2011. Optimization of solar-wind hybrid system for distributed generation. *2011 Nirma University International Conference on Engineering*, pp.1–4.

Diaf, S., Belhamel, M., Haddadi, M. & Louche, A., 2008. Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island. *Energy Policy*, 36(2), pp.743–754.

Ekren, O. & Ekren, B.Y., 2010. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. *Applied Energy*, 87(2), pp.592–598.

Erdinc, O. & Uzunoglu, M., 2012. Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), pp.1412–1425.

Fantidis, J.G., Bandekas, D. V, Potolias, C. & Vordos, N., 2011. The Effect Of The Financial Crisis On Electricity Cost For Remote Consumers : Case Study Samothrace (Greece). *International Journal of Renewable Energy Research*, 1(4), pp.281–289.

Kaldellis, J.K. & Kavadias, K.A., 2007. Cost–benefit analysis of remote hybrid wind–diesel power stations: Case study Aegean Sea islands. Energy Policy, 35(3), pp.1525–1538.

Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A. & Koronakis, P.S., 2007. Comparing wind and photovoltaic stand-alone power systems used for the electrification of remote consumers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(1), pp.57–77.

Kavadias, K.A., 2012. Stand-Alone, Hybrid Systems. In A. Sayigh, ed. Comprehensive Renewable Energy. Ocford: Elsevier, pp. 623–656.

Kavadias, K.A., Kaldellis, J.K. & Komninoglou, A., 2001. Wind energy surplus management for remote consumers using a water pumping storage system. In European Wind Energy Conference and Exhibition. Bella Center, Copenhagen, Denmark: EWEA, pp. 972–975.

Nema, P., Nema, R.K. & Rangnekar, S., 2009. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), pp.2096–2103.

Panayiotou, G., Kalogirou, S. & Tassou, S., 2012. Design and simulation of a PV and a PV-Wind standalone energy system to power a household application. *Renewable Energy*, 37(1), pp.355–363.

Pashardes, S. & Christofides, C., 1995. Statistical analysis of wind speed and direction in Cyprus. *Solar Energy*, 55(5), pp.405–414.

World Weather & Climate Information, 2015. Weather and Climate: Nice, France, average monthly Wind Speed. https://weather-and-climate.com/average-monthly-Wind-speed,nice,France.

Zafirakis, D., 2010. Overview of energy storage technologies for RES. In *Stand-alone and hybrid wind energy systems. Technology, energy storage and applications*. Woodhead Publishing.

ΔΕΗ, 1986. Μετρήσεις για την Αξιολόγηση του Αιολικού Δυναμικού της Ελλάδας, 1980-1985, Αθήνα.

Καλδέλλης, Ι.Κ. & Καββαδίας, Κ.Α., 2005. *Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας (Αιολική Ενέργεια – Μικρά Υδροηλεκτρικά)*, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης.

Επίλογος – Συμπεράσματα

Στις σύγχρονες κοινωνίες η ενέργεια αποτελεί βασικό αγαθό για την οικονομική ανάπτυξη και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων. Ωστόσο ακόμη και σήμερα, διανύοντας τον 21ο αιώνα και μετά από 200.000 χρόνια ύπαρξης του σύγχρονου ανθρώπινου είδους πάνω στον πλανήτη, σημαντικό ποσοστό του πληθυσμού παραμένει χωρίς πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Ακόμη και στην Ευρώπη περίπου 500.000 κάτοικοι στερούνται άμεσης πρόσβασης σε ηλεκτρικό δίκτυο, καλύπτοντας τις ενεργειακές τους ανάγκες με παραδοσιακούς τρόπους. Παράλληλα, τα αναπτυσσόμενα κράτη αυξάνουν εκθετικά τις ενεργειακές τους καταναλώσεις βασίζοντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ορυκτά καύσιμα με αποτέλεσμα τον περιορισμό των διαθέσιμων αποθεμάτων ενέργειας του πλανήτη. Η χρήση των ορυκτών καυσίμων έχει συνδεθεί άμεσα με την κλιματική αλλαγή, αλλά και με τις πολιτικο-οικονομικές διαταραχές μεταξύ των κρατών, με αρνητικές συνέπειες στις περιοχές που συγκεντρώνουν μεγάλες ποσότητες ενεργειακών αποθεμάτων καθώς παρουσιάζουν, στην πλειοψηφία τους, πολιτική αστάθεια και συνεχείς πολεμικές συγκρούσεις.

Η τεχνολογική εξέλιξη οδήγησε τον άνθρωπο στη δημιουργία νέων μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κύριο χαρακτηριστικό τους την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) του πλανήτη. Ωστόσο, το αυξημένο αρχικό κόστος επένδυσης που απαιτείται αλλά και η στοχαστική συμπεριφορά της πηγής ενέργειας που αξιοποιείται, περιορίζουν τη συμμετοχή τους στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο. Η λύση που προτείνεται για την αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ είναι τα υβριδικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν περισσότερες της μιας τεχνολογίες ώστε η μία πηγή ενέργειας να συμπληρώνει την έλλειψη διαθεσιμότητας της άλλης. Τα υβριδικά συστήματα ΑΠΕ βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε καταναλωτές οι οποίοι δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρικό δίκτυο παρέχοντάς τους, με βέλτιστο σχεδιασμό, αδιάλειπτη και καλής ποιότητας ηλεκτρική ενέργεια.

Για την επιτυχή διαστασιολόγηση των υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ απαιτείται η διαθεσιμότητα μακροχρόνιων και αξιόπιστων μετρήσεων των φυσικών μεγεθών από τις οποίες εξαρτάται η ενεργειακή τους παραγωγή (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία αέρα, ταχύτητα ανέμου κ.λπ.). Προς αυτή την κατεύθυνση, στην παρούσα διατριβή η έρευνα είχε δύο στόχους: ο πρώτος στόχος αφορά στη δημιουργία αξιόπιστων χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων, που μπορούν να αξιοποιηθούν στις προσομοιώσεις λειτουργίας υβριδικών συστημάτων που βασίζονται στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας αλλά και γενικότερα στη μακροχρόνια αξιολόγηση ηλιακών συστημάτων και ο δεύτερος στόχος στη διερεύνηση της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης των υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ στον ελλαδικό χώρο.

Για την επίτευξη των στόχων, στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε έρευνα σε διάφορους τομείς, με εξίσου σημαντικά συμπεράσματα, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το εκάστοτε αντικείμενο που αφορούν. Ειδικότερα, η παρούσα διατριβή περιλαμβάνει: μία δομημένη μεθοδολογία που μπορεί να ακολουθηθεί για τη δημιουργία αξιόπιστων χρονοσειρών μετεωρολογικών παραμέτρων και τυπικών μετεωρολογικών ετών (ΤΜΕ), τα κριτήρια και τη μέθοδο

χωρικής παρεμβολής που μπορούν με αξιόπιστο τρόπο να περιγράψουν τη χωρική κατανομή του ηλιακού δυναμικού στην ελληνική επικράτεια, συγκεκριμένη μεθοδολογία για την ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ που αξιοποιούν την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, την ενεργειακή και οικονομική απόδοση των υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ σε διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας εντοπίζοντας τα όρια μεταβολής του μεγέθους και του κόστους που μπορεί να επιτευχθεί υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες κάτω από τις οποίες εξετάζεται η λειτουργία τους.

Πιο συγκεκριμένα, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ✓ Ο ποιοτικός έλεγχος των πρωτογενών μετρήσεων των μετεωρολογικών παραμέτρων από τους σταθμούς της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) έδειξε ότι, όσον αφορά στις παραμέτρους των οποίων οι τιμές προκύπτουν από άμεση καταγραφή των ενδείξεων των οργάνων μέτρησης (θερμοκρασία αέρα, ατμοσφαιρική πίεση), οι ακραίες τιμές που μπορεί να εμφανιστούν είναι ελάχιστες οπότε θα μπορούσαν να εξαιρεθούν από τον έλεγχο. Ωστόσο, θα πρέπει να δίνεται προσοχή στις τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης, καθώς στη βάση δεδομένων εμφανίστηκαν τιμές εκτός ορίων μεταβολής της με συγκεκριμένη τιμή που πιθανώς προστέθηκε για τον εντοπισμό εσφαλμένων καταγραφών. Το μέγεθος της σχετικής υγρασίας που προκύπτει έμμεσα από καταγραφή θερμοκρασίας ξηρού και υγρού θερμομέτρου και ατμοσφαιρικής πίεσης παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό ακραίων τιμών και ως προς τα όρια μεταβολής αλλά και ως προς τα όρια μέγιστης 3-ωριαίας μεταβολής.
- ✓ Για την αξιόπιστη συμπλήρωση των ελλειπουσών 3-ωριαίων τιμών μετεωρολογικών παραμέτρων απαιτείται ομαδοποίηση των κενών ανάλογα με τον αριθμό διαδοχικών 3-ώρων που εμφανίζονται. Η πρώτη ομάδα αφορά μοναδιαία κενά, η δεύτερη ομάδα έως και 3 διαδοχικά κενά και η τρίτη ομάδα περισσότερα από 3 διαδοχικά κενά. Η πρώτη και η δεύτερη ομάδα μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη ίδια μέθοδο για όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους με 3-ωριαία καταγραφή. Τα μεμονωμένα κενά μπορούν να συμπληρωθούν με γραμμική παρεμβολή, ενώ η βέλτιστη μέθοδος για τη συμπλήρωση έως και 3 διαδοχικών κενών αποτελεί η παρεμβολή Hermite. Στις περιπτώσεις μεγαλύτερου αριθμού διαδοχικών κενών, οι χρονοσειρές θερμοκρασίας αέρα συμπληρώνονται με αξιοπιστία με τη μέθοδο βηματικής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των χρονοσειρών γειτονικών σταθμών, ενώ για τη συμπλήρωση των χρονοσειρών σχετικής υγρασίας απαιτείται η μέθοδος της μέσης ενδοημερήσιας μεταβολής. Η συμπλήρωση των διαδοχικών κενών στις χρονοσειρές της ατμοσφαιρικής πίεσης γίνεται με τη μέθοδο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των γειτονικών σταθμών, όχι όμως στις 3-ωριαίες χρονοσειρές αλλά σε υποσύνολα που προκύπτουν από ομαδοποίηση των μετρήσεων ανά ώρα και μήνα μέτρησης.
- ✓ Η συμπλήρωση των κενών σε χρονοσειρές ημερήσιων τιμών ηλιοφάνειας επιτυγχάνεται σε δύο στάδια. Αρχικά, χρησιμοποιείται η μέθοδος της βηματικής πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης επιλέγοντας χρονοσειρές άλλων σταθμών, οι οποίοι αποτελούν στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές. Στη συνέχεια, τα παραμένοντα κενά μπορούν να αντιμετωπισθούν με τη δημιουργία νέων μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με ανεξάρτητες μεταβλητές τις παρατηρήσεις ημερήσιας ηλιοφάνειας του προηγούμενου και του επόμενου μήνα από το μήνα όπου εμφανίζονται τα κενά.
- ✓ Για τη μετατροπή των χρονοσειρών 3-ωριαίων παρατηρήσεων ατμοσφαιρικών παραμέτρων σε ωριαίες χρονοσειρές, οι μέθοδοι γραμμικής παρεμβολής και κυβικών τμηματικά πολυωνυμικών καμπυλών (splines) δίνουν εξίσου μεγάλη ακρίβεια, ως εκ τούτου προτείνεται η μέθοδος γραμμικής παρεμβολής που είναι και πιο απλή στην εφαρμογή της.

- ✓ Για τον υπολογισμό ηλιακής ακτινοβολίας, το Μετεωρολογικό Μοντέλο Ακτινοβολίας (Meteorological Radiation Model, MRM) (Kambezidis & Psiloglou 2008), της Ομάδας Ατμοσφαιρικής Έρευνας του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, υπό συνθήκες ανέφελου και νεφοσκεπούς ουρανού, με ικανοποιητική ακρίβεια για χρήση σε ενεργειακές εφαρμογές. Από τον έλεγχο των ελάχιστων δεδομένων που θα πρέπει να εισάγονται στο μοντέλο, προκειμένου να παράγει εξίσου αξιόπιστες τιμές, προέκυψε ότι οι σημαντικότερες παράμετροι είναι η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία και οι τιμές ηλιοφάνειας. Η χρήση τιμών ημερήσιας ηλιοφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει καταγραφή ωριαίων τιμών, καθώς σε μηνιαία και ετήσια βάση δεν διαφοροποιούνται σημαντικά τα αποτελέσματα. Επίσης, κατά την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου προέκυψε ότι οι προεπιλεγμένες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης, συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού O_3, μέσης ετήσιας συγκέντρωσης CO_2 και συντελεστή λευκαύγειας του εδάφους, που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο, έχουν μικρή επίδραση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι προεπιλεγμένες τιμές χωρίς να μεταβάλλεται σημαντικά η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- ✓ Για τη μακροχρόνια ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση ενεργειακών συστημάτων ΑΠΕ, η χρήση μεμονωμένων ετών μπορεί να παρουσιάσει σημαντικές αποκλίσεις αφού το έτος που χρησιμοποιείται δεν αντιπροσωπεύει το μέσο κλίμα της περιοχής. Επίσης, η επιλογή της χρήση μιας μέσης ενδοετήσιας χρονοσειράς δεδομένων καθιστά αδύνατο τον εντοπισμό ακραίων τιμών, οι οποίες πολύ πιθανόν να εμφανιστούν σε κάποιες παραμέτρους. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η παραγωγή ωριαίων χρονοσειρών του Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους (ΤΜΕ). Τα ΤΜΕ συγκροτούνται από 12 μήνες με πραγματικά δεδομένα προερχόμενα από τη διαθέσιμη βάση δεδομένων και αντιπροσωπεύουν τις κλιματολογικές συνθήκες που θεωρούνται χαρακτηριστικές κατά τη διάρκεια της μακρόχρονης περιόδου. Για τα ελληνικά κλιματικά δεδομένα, η μέθοδος συγκρότησης Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους (ΤΜΕ) Sandia (Hall et al. 1978) με την τροποποίηση των Pissimanis et al. (1988) και των Argiriou et al. (1999) μπορεί να εφαρμοστεί με αξιοπιστία. Επίσης, από τον έλεγχο των ΤΜΕ που δημιουργήθηκαν προέκυψε ότι η χρονική περίοδος των 15 ετών αποτελεί ικανοποιητικό διάστημα για τη δημιουργία ωριαίων χρονοσειρών ΤΜΕ τα οποία να αντιπροσωπεύουν τις κλιματολογικές συνθήκες που θεωρούνται χαρακτηριστικές για τις περιοχές αναφοράς.
- ✓ Από τη αξιοποίηση των ΤΜΕ τις θέσεις των επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών, προέκυψε ότι ο συντελεστής φορτίου των φωτοβολταϊκών μονάδων στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα υψηλός, καθώς ακόμη και με οριζόντια κλίση φτάνει το 18% καθιστώντας τα φωτοβολταϊκά πλαίσια καθοριστικό παράγοντα βιωσιμότητας των υβριδικών συστημάτων σε περιοχές με χαμηλό ή μέσο αιολικό δυναμικό. Στις περιοχές αυτές προκύπτει ότι τα αυτόνομα ενεργειακά συστήματα ΑΠΕ που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά-μπαταρίες είναι οικονομικότερα, ως προς το μακροχρόνιο κόστος παραγωγής ενέργειας, σε σχέση με αντίστοιχα που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες-μπαταρίες σε περιοχές με χαμηλό ή μέσο αιολικό δυναμικό.
- ✓ Το αρχικό κόστος των μονάδων που αποτελούν ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα ΑΠΕ, είναι βασικός παράγοντας στη διαστασιολόγησή του, όταν κριτήριο βελτιστοποίησης αποτελεί το ελάχιστο κόστος παραγωγής. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο έχει το κόστος τους συστήματος αποθήκευσης, το οποίο ανάλογα με το αρχικό του κόστος, μπορεί να μεταβάλει τις επιλεγείσες διαστάσεις των μονάδων παραγωγής. Η συμμετοχή των Φ/Β μονάδων σε υβριδικά συστήματα ΑΠΕ, που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών ενεργειακά αυτόνομων καταναλωτών, μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής έως και 50%, ακόμη και σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό.

- ✓ Κατά τη διερεύνηση του επιδιωκόμενου κόστους παραγωγής υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ, υπολογισμένο με τη χρήση μεμονωμένων ετήσιων χρονοσειρών μετεωρολογικών δεδομένων, προέκυψε ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των ετών μπορούν να φτάσουν τα 0,20 €/kWh καθιστώντας επισφαλή τη χρήση τυχαίων ετήσιων χρονοσειρών στην προσομοίωση λειτουργίας ενεργειακών εγκαταστάσεων βασισμένων σε ΑΠΕ. Μεγαλύτερη διακύμανση στο κόστος παραγωγής παρουσιάζεται σε περιοχές με χαμηλό αιολικό δυναμικό καθώς στις περιοχές αυτές το ηλιακό δυναμικό αποτελεί καθοριστική παράμετρο στην επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας. Επίσης, παρατηρείται σημαντική επίδραση του αιολικού δυναμικού στη διακύμανση των τιμών μεταξύ των διαφορετικών ετών. Ειδικότερα, ενώ η μεταβολή του κόστους παραγωγής, στις περιπτώσεις χαμηλού αιολικού δυναμικού κυμαίνεται μεταξύ 0,16 €/kWh (Ν. Ελλάδα) και 0,19 €/kWh (Β. Ελλάδα), στις περιπτώσεις υψηλού αιολικού δυναμικού, η αντίστοιχη μεταβολή είναι μεταξύ 0,07 €/kWh και 0,09 €/kWh.
- ✓ Από την προσομοίωση υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ σε διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας και για διαφορετικά προφίλ αιολικού δυναμικού, διαπιστώθηκε ότι το αιολικό δυναμικό έχει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόστους παραγωγής, επίδραση η οποία μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του ηλιακού δυναμικού. Ειδικότερα, η διαφορά κόστους παραγωγής, που προκύπτει μεταξύ χαμηλού και υψηλού αιολικού δυναμικού στη Β. Ελλάδα, είναι 0,36 €/kWh, ενώ στη Ν. Ελλάδα 0,22 €/kWh. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, στις περιοχές με χαμηλό ηλιακό δυναμικό, αυξάνεται η συμμετοχή της Α/Γ στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, ενώ σε περιοχές με αυξημένο ηλιακό δυναμικό η Φ/Β μονάδα υποβαθμίζει τη συμμετοχή της Α/Γ.
- ✓ Συγκρίνοντας το κόστος παραγωγής μεταξύ των σταθμών με χαμηλό αιολικό δυναμικό διαπιστώνεται ότι μεταξύ Βόρειας και Νότιας Ελλάδας οι τιμές κυμαίνονται από 0,94 €/kWh έως 0,82 €/kWh, δηλαδή μεταβολή περίπου 15%. Οι διαφορές στο κόστος παραγωγής προκύπτουν από το γεγονός ότι, για την επίτευξη ενεργειακής αυτονομίας του καταναλωτή στη Β. Ελλάδα απαιτείται υβριδικό σύστημα το οποίο αποτελείται από Α/Γ 5 kW, Φ/Β μονάδα 6 kW και συσσωρευτές αποθηκευτικής ικανότητας 21 kWh. Για τον ίδιο καταναλωτή, σε αντίστοιχες συνθήκες αιολικού δυναμικού, στη Ν. Ελλάδα, επιτυγχάνεται ενεργειακή αυτονομία με υβριδικό σύστημα το οποίο αποτελείται από Α/Γ 9 kW, Φ/Β μονάδα 5 kW και συσσωρευτές 14 kWh. Συγκρίνοντας τα δύο υβριδικά συστήματα διαπιστώνεται ότι η αύξηση του ηλιακού δυναμικού επιφέρει μικρή μείωση της ισχύος της Φ/Β μονάδας και σημαντική μείωση του αριθμού των συσσωρευτών.

Η εκπόνηση της παρούσας διατριβής αναδεικνύει πεδία μελλοντικής έρευνας στο σύνολο των τομέων που πραγματεύεται. Στις προοπτικές μελλοντικής έρευνας περιλαμβάνονται:

- η περεταίρω βελτίωση του κώδικα MRM βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής,
- η συνδυασμένη χρήση επίγειων και δορυφορικών μετεωρολογικών δεδομένων για την πυκνότερη εδαφική κάλυψη του ελλαδικού χώρου,
- ο εμπλουτισμός των ΤΜΕ με περισσότερες μετεωρολογικές παραμέτρους (π.χ. άνεμο, βροχή κ.λπ.) και επαναπροσδιορισμό των ΤΜΕ,
- επαναξιολόγηση των υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ με τη χρήση των επαναπροσδιορισμένων ΤΜΕ, σε συνθήκες μεσογειακού κλίματος, που θα περιέχουν το σύνολο των μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία τους,
- τη δημιουργία χάρτη χωρικής κατανομής του κόστους παραγωγής υβριδικών συστημάτων ΑΠΕ που εξασφαλίζουν ενεργειακή αυτονομία σε τυπικούς οικιακούς καταναλωτές και

- την εκτίμηση της χωροχρονικής μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας στον ελλαδικό χώρο για τη δημιουργία χρονοσειρών σε οποιοδήποτε σημείο ενδιαφέροντος.

Βιβλιογραφία

Argiriou, A., Lykoudis, S., Kontoyiannidis, S., Balaras, C.A., Asimakopoulos, D.N., Petrakis, M. & Kassomenos, P., 1999. Comparison of methodologies for TMY generation using 20 years data for Athens, Greece. *Solar Energy*, 66(1), pp.33–45.

Hall, I.J., Prairie, R.R., Anderson, H.E. & Boes, E.C., 1978. Generation of a Typical Meteorological Year. *1978 Annual Meeting of the American Section of the ISES*.

Kambezidis, H.D. & Psiloglou, B.E., 2008. The Meteorological Radiation Model (MRM): advancements and applications. In V. Badescu, ed. *Modeling solar radiation at the earth's surface*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 357–392.

Pissimanis, D., Karras, G., Notaridou, V. & Gavra, K., 1988. The generation of a "Typical Meteorological Year" for the city of Athens. *Solar Energy*, 40(5), pp.405–411.