



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική εργασία

Επίπτωση κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων για την Ελλάδα



Παναγέα Ιωάννα

Εξεταστική επιτροπή:

Τσάνης Κ. Ιωάννης (επιβλέπων)
Λαζαρίδης Μιχαήλ
Κουτρούλης Αριστείδης



WATER
RESOURCES
MANAGEMENT
&
COASTAL
ENG LAB

Χανιά 2013

**Στην οικογένεια μου,
τους ανθρώπους που με στηρίζουν
και βοηθούν σε κάθε μου βήμα**

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπον Καθηγητή Ιωάννη Τσάνη για την ανάθεση της εργασίας αυτής, την επίβλεψη και την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με το εργαστήριο του.

Ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής, Βροχίδου Αγγελική, Ιορδανίδου Βασιλική, Δαλιακόπουλο Ιωάννη και Τσιτσιλώνη Σωτήρη για την οποιαδήποτε βοήθεια τους και την συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στους Αριστείδη Κουτρούλη και Κωνσταντίνο Σειραδάκη για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν στην διεκπεραίωση της εργασίας.

Επιπλέον ένα απλό ευχαριστώ είναι λίγο για τον Γρυλλάκη Μανώλη, καθώς η βοήθεια, η συμπαράσταση και η καθοδήγηση του για μένα είναι ανεκτίμητη.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους φίλους μου, Βασιλική, Βίκυ, Γρηγόρη, Ελένη, Θέτις, Κώστα, Νίκο Γκ., Νίκο Β., που ανέχονται την γκρίνια μου! και μου συμπαραστέκονται όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περιεχόμενα εικόνων.....	iv
Περιεχόμενα πινάκων.....	v
Περίληψη	v
Abstract	vi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	1
1.2 Κλιματική αλλαγή.....	1
1.2.1 Σενάρια κλιματικής αλλαγής.....	6
1.2.2 Κλιματικά πρότυπα προσομοίωσης.....	9
1.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα	13
1.3.1 Κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον βαθμό απόδοσης των Φ/Β ...	14
1.4 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας (Bias correction)	16
1.5 Ηλιακά μοντέλα.....	18
2 Μεθοδολογία	21
2.1 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας (Bias correction)	21
2.2 Εκτίμηση απόδοσης των Φ/Β συστημάτων υπό συνθήκες μεταβλητής θερμοκρασίας και ακτινοβολίας	22
2.3 Δημιουργία ηλιακών μοντέλων.....	25
3 Περιοχή μελέτης.....	30
3.1 Ελλάδα.....	30
3.2 Επιλογή δεδομένων	31
3.3 Κλιματικά πρότυπα προσομοίωσης.....	32
3.4 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας.....	34
3.5 Εφαρμογή εκτίμησης απόδοσης των Φ/Β συστημάτων υπό συνθήκες μεταβλητής θερμοκρασίας και ακτινοβολίας	34
3.6 Συνεισφορά θερμοκρασίας και ακτινοβολίας	35
3.7 Συνεισφορά της τοπογραφίας στην απόδοση ενός PV συστήματος	35
4 Αποτελέσματα	38
4.1 Αρχικές τιμές κλιματικών παραμέτρων	38
4.2 Διακύμανση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ανά περίοδο.....	40
4.3 Διακύμανση απόδοσης Φ/Β συστημάτων	42

4.4	Χρονική εξέλιξη απόδοσης Φ/Β συστημάτων ανά γεωγραφική περιφέρεια..	43
4.5	Χωρική εξέλιξη απόδοσης Φ/Β συστημάτων την περίοδο 2011-2050	48
4.6	Χωρική εξέλιξη απόδοσης Φ/Β συστημάτων την περίοδο 2061-2100	49
4.7	Ανάλυση ευαισθησίας.....	50
4.7.1	Συνεισφορά ακτινοβολίας ($\Delta T=0$).....	50
4.7.2	Συνεισφορά θερμοκρασίας ($\Delta G=0$).....	51
4.7.3	Συσχέτιση	52
4.8	Επίδραση της τοπογραφίας στην κατανομή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.....	53
4.9	Καταλληλότητα χωροθέτησης Φ/Β συστημάτων.....	55
5	Συμπεράσματα-Προτάσεις	57
5.1	Συμπεράσματα.....	57
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	58
6	Βιβλιογραφία	59

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1-1: Σχηματική επεξήγηση των σεναρίων κλιματικής αλλαγής (Nakićenović N., et.al,2000).....	7
Εικόνα 2-1: Ημισφαιρική φωτογραφία εικόνας πεδίου (Shengli & Pinde 2009).....	26
Εικόνα 2-2: α) Χάρτης κίνησης ηλίου β) Επικάλυψη χάρτη κίνησης ηλίου από την εικόνα πεδίου (Shengli & Pinde 2009).....	27
Εικόνα 2-3: α) Χάρτης ουρανού β) Επικάλυψη χάρτη ουρανού από την εικόνα πεδίου (Shengli & Pinde 2009).....	28
Εικόνα 3-1: Κλιματική ταξινόμηση Ελλάδος κατά Köppen (Peel et al. 2007).....	31
Εικόνα 4-1: α) Παρατηρούμενες, αρχικές τιμές κλιματικών παραμέτρων χωρίς διόρθωση σφάλματος μεροληψίας και διαφορά μεταξύ παρατηρούμενων και αρχικών τιμών μέσης θερμοκρασίας όλων των μοντέλων. β) Παρατηρούμενες, αρχικές τιμές χωρίς διόρθωση σφάλματος μεροληψίας και διαφορά μεταξύ παρατηρούμενων και αρχικών τιμών ακτινοβολίας όλων των μοντέλων.....	38
Εικόνα 4-2: α) Απόλυτες τιμές μέσης θερμοκρασίας όλων των μοντέλων για κάθε περίοδο μελέτης. β) απόλυτες τιμές ακτινοβολίας όλων των μοντέλων	40
Εικόνα 4-3: Απόλυτες αλλαγές ανά περίοδο μελέτης όλων των μοντέλων α) μέσης θερμοκρασίας β) ακτινοβολίας	41
Εικόνα 4-4: Μεταβολή απόδοσης Φ/Β συστημάτων	42
Εικόνα 4-5: Διοικητικές περιφέρειες Ελλάδας	43
Εικόνα 4-6: Χρονοσειρές απόδοσης Φ/Β συστημάτων για τις γεωγραφικές περιφέρειες της Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας. Θεσσαλίας Ηπείρου και Δυτικής Ελλάδος.	44
Εικόνα 4-7: Χρονοσειρές απόδοσης Φ/Β συστημάτων για τις γεωγραφικές περιφέρειες Στερεάς Ελλάδος Αττικής Πελοποννήσου και Ιονίων νησιών.....	45
Εικόνα 4-8: Χρονοσειρές απόδοσης Φ/Β συστημάτων για τις γεωγραφικές περιφέρειες Νοτίου Αιγαίου, Βορείου Αιγαίου και Κρήτης.....	46
Εικόνα 4-9: Χρονοσειρά απόδοσης Φ/Β συστημάτων για την Ελλάδα.....	47
Εικόνα 4-10: Μεταβολή απόδοσης Φ/Β συστημάτων ανά RCM την περίοδο 2011-2050 .	48
Εικόνα 4-11: Μεταβολή απόδοσης Φ/Β συστημάτων ανά RCM την περίοδο 2061-2100 .	49
Εικόνα 4-12: Απόδοση Φ/Β πλαισίων υπό σταθερή θερμοκρασία.....	50
Εικόνα 4-13: Απόδοση Φ/Β πλαισίων υπό σταθερή ακτινοβολία	51
Εικόνα 4-14: Χάρτης ανάγλυφου περιοχής μελέτης.....	53
Εικόνα 4-15: Ποσοστό προσπίπτουσας ακτινοβολίας επί της ολικής ακτινοβολίας λόγω συμβολής της τοπογραφίας	54

Εικόνα 4-16: Καταλληλότητα χωροθέτησης Φ/Β συστημάτων συναρτήσει της τοπογραφίας και της αλλαγής της απόδοσης λόγω κλιματικής αλλαγής την περίοδο 2011-2050.....	55
Εικόνα 4-17: Καταλληλότητα χωροθέτησης Φ/Β συστημάτων συναρτήσει της τοπογραφίας και της αλλαγής της απόδοσης λόγω κλιματικής αλλαγής την περίοδο 2060-2100.....	56

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1-1: Χαρακτηριστικά σεναρίων κλιματικής αλλαγής.....	7
Πίνακας 3-1: Γενικές πληροφορίες των RCMs που χρησιμοποιήθηκαν	33

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίπτωση της κλιματικής αλλαγής στην απόδοση των Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα για δύο χρονικές περιόδους μελέτης τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 9 περιοχικά κλιματικά μοντέλα του προγράμματος ENSEMBLES τα οποία δρουν υπό το A1B σενάριο εκπομπής του IPCC.

Παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα από τα RCMs παρουσιάζουν συστηματική απόκλιση από τις παρατηρούμενες τιμές με αποτέλεσμα την ανάγκη για διόρθωση και προσαρμογή των στατιστικών παραμέτρων τους σε αυτά των μετρημένων τιμών. Έτσι ακολουθήθηκε διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας για κάθε περίοδο μελέτης με περίοδο αναφοράς την περίοδο 1950-2000 για τα δεδομένα της θερμοκρασίας και 1985-2005 για τις τιμές της ακτινοβολίας. Υπολογίστηκε η ποσοστιαία αλλαγή της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων λαμβάνοντας υπ όψιν την μεταβολή λόγω αλλαγής του κλίματος των παραμέτρων της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας. Επιπλέον εξετάστηκε η επίδραση της τοπογραφίας στην κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Έπειτα από την χωροχρονική ανάλυση παρατηρήθηκε ότι τα επόμενα χρόνια και μέχρι το 2100 θα υπάρξει σημαντική αύξηση στην μέση ετήσια θερμοκρασία και στην μέση ολική ακτινοβολία. Η απόδοση των Φ/Β συστημάτων παρουσιάζει αρνητική γραμμική εξάρτηση με την θερμοκρασία η οποία ωστόσο υπερκαλύπτεται από την αύξηση της ολικής ακτινοβολίας με τελικό αποτέλεσμα μία αυξητική τάση στην απόδοση τους μέχρι και 4%.

Τέλος, αποδείχτηκε ότι η τοπογραφία ασκεί σημαντική επίδραση στην κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας τόσο χρονικά όσο και χωρικά σε ποσοστό μέχρι και 50% συγκριτικά με το επίπεδο ανάγλυφο καθιστώντας σημαντική την επιλογή χωροθέτησης των Φ/Β συστημάτων.

Abstract

In this diploma thesis, the spatial and temporal impact of climate change on the performance of P/V systems in Greece is examined, for two future periods. Data were obtained from 9 ENSEMBLES Regional Climate Models under the A1B emission scenario.

It was observed that the RCM data present systematic errors and deviations from the observed values, resulting to the need for bias adjustment of the statistical properties of the RCM data to meet the statistical properties of the observed data. The bias correction procedure was applied for the projection period by using the observations of 1950-2000 period for temperature and 1985-2005 period for insolation data.

The percent change in P/V energy output was calculated, considering the changes in temperature and insolation due to the change in climate. Moreover, the effect of topography on the solar radiation distribution was examined.

The spatiotemporal analyses indicate significant increase in mean annual temperature and mean total radiation by 2100. The performance of P/V systems exhibits a negative linear dependence on the temperature which is outweighed by the increase of total radiation and results to an increasing trend to the energy output of up to 4%.

The analysis of the effect of topography showed that the choice of the P/V systems location comprises a significant factor as the distribution of solar radiation is affected both temporally and spatially from the topography up to 50% compared to a level terrain.

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι μελέτης της επίδρασης της αλλαγής του κλίματος, στην απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα, καθώς και η επίδραση της τοπογραφίας στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

Η συνεχώς αυξανόμενη στρόφη στην χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυρίως στην χώρα μας στα Φ/Β συστήματα επιβάλλει την περαιτέρω έρευνα για την προσπάθεια βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης τους.

1.2 Κλιματική αλλαγή

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change, **IPCC**) που ιδρύθηκε το 1988 από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (World Meteorological Organisation -WMO) και το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environmental Program-UNEP), ορίζει ως **”κλιματική αλλαγή”** *μία αλλαγή στην κατάσταση του κλίματος που μπορεί να προσδιοριστεί από τις αλλαγές στο μέσο όρο ή/και τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του, και που υπάρχει για μία εκτεταμένη περίοδο χρόνου, η οποία οφείλεται είτε στη φυσική μεταβλητότητα είτε στις δραστηριότητες του ανθρώπου.* (IPCC,2000).

Το κλίμα επηρεάζεται από έναν αριθμό τόσο φυσικών όσο και ανθρωπογενών παραγόντων με αποτέλεσμα την αλλαγή στην κατάστασή του. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες αναφέρονται παρακάτω:

Φυσικές πιέσεις

- Διακυμάνσεις στους αστρονομικούς κύκλους όπως η εκτροπή του κύκλου της γης (26.000 χρόνια), η περιστροφή της ελλειπτικής τροχιάς της γης(22.000 χρόνια), η αλλαγή της γωνίας μεταξύ του άξονα της γης και της κανονικής προς το επίπεδο της τροχιάς της

- Ηλιακές δραστηριότητες όπως οι ηλιακές κηλίδες, η πλανητική σκίαση (global dimming)
- Αλλαγή στις ωκεάνιες κυκλοφορίες
- Ταλαντώσεις, καθώς η περιοχή της μεσογείου επηρεάζεται από την ENSO (El-Nino Southern Oscillation), το NAO (North Atlantic Oscillation)

Ανθρωπογενείς πιέσεις

- Αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου
- Μείωση του όζοντος στην στρατόσφαιρα
- Αλλαγές στην επιφάνεια της γης όπως η αποψίλωση των δασών, η αλλαγή στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας της ,η απερέμωση κλπ.

Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών στη σύμβαση–πλαίσιο για την κλιματική αλλαγή (United Nations Framework Convention On Climate Change,1992) αναγνωρίζει ότι η αλλαγή του κλίματος της γης και οι δυσμενείς επιπτώσεις του, είναι κοινά για την ανθρωπότητα και εκφράζει την ανησυχία ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αυξήσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, κάτι που εντείνει το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, και που θα οδηγήσει σε περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης, και που θα επηρεάσει δυσμενώς τα φυσικά οικοσυστήματα και την ανθρωπότητα ενώ σημειώνει ότι το μεγαλύτερο μερίδιο των ιστορικά καταγεγραμμένων και σημερινών παγκοσμίως εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχεται από τις ανεπτυγμένες χώρες.

Αναγνωρίζει τον παγκόσμιο χαρακτήρα της κλιματικής αλλαγής και επιβάλλει την ευρύτερη δυνατή συνεργασία και συμμετοχή όλων των χωρών σε μία διεθνή ανταπόκριση, σύμφωνα με κοινές αλλά διαφοροποιημένες ευθύνες αντίστοιχα με τις κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες τις κάθε χώρας, υπενθυμίζει τις διατάξεις της Διακήρυξης της Διάσκεψης των Ηνωμένων Εθνών για το ανθρώπινο περιβάλλον (Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment) στην Στοκχόλμη στις 16 Ιουνίου 1972, υπενθυμίζει ότι όλα τα κράτη έχουν σύμφωνα με το Χάρτη των Ηνωμένων Εθνών και τις αρχές του διεθνούς δικαίου το κυρίαρχο δικαίωμα να εκμεταλλεύονται τους φυσικούς πόρους τους σύμφωνα με τις δικές τους περιβαλλοντικές και αναπτυξιακές πολιτικές με την

προϋπόθεση ότι δεν προκαλούν ζημιά στο περιβάλλον άλλων χωρών ή περιοχών πέραν των ορίων εθνικής δικαιοδοσίας τους. Ακόμα επιβεβαιώνει την αρχή της κυριαρχίας των κρατών στη διεθνή συνεργασία για την αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος, αναγνωρίζοντας ότι τα κράτη θα πρέπει να θεσπίσουν αποτελεσματική περιβαλλοντική νομοθεσία, της οποίας τα περιβαλλοντικά πρότυπα, οι στόχοι και οι προτεραιότητες, θα πρέπει να αντικατοπτρίζουν το περιβαλλοντικό και αναπτυξιακό πλαίσιο στο οποίο δρουν και ότι τα πρότυπα που εφαρμόζουν ορισμένες χώρες μπορεί να είναι ακατάλληλα, οικονομικά και κοινωνικά αδύνατα σε άλλες χώρες, ιδίως τις αναπτυσσόμενες. Υπενθυμίζει επιπλέον, τις διατάξεις της Γενικής Συνέλευσης του ΟΗΕ 44/228 της 22ης Δεκεμβρίου 1989 σχετικά με τη Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, και τα ψηφίσματα 43/53 της 6ης Δεκεμβρίου 1988, 44/207 της 22ας Δεκεμβρίου 1989, 45/212 της 21ης Δεκεμβρίου 1990 και 46/169 της 19ης Δεκεμβρίου 1991 για την προστασία του παγκόσμιου κλίματος για την παρούσα και τις μελλοντικές γενιές ανθρωπότητας, τις διατάξεις του ψηφίσματος της Γενικής Συνέλευσης 44/206 της 22 Δεκεμβρίου του 1989 σχετικά με τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας στα νησιά και τις παράκτιες περιοχές, και ιδιαίτερα στις πεδινές παράκτιες περιοχές και οι σχετικές διατάξεις της Γενικής Συνέλευσης Ψήφισμα 44/172 της 19ης Δεκεμβρίου 1989 για την εφαρμογή του Σχεδίου Δράσης για την καταπολέμηση της ερημοποίησης, τη σύμβαση της Βιέννης για την προστασία της στιβάδας του όζοντος, 1985, και το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ για τις ουσίες που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος, 1987, όπως τροποποιήθηκε και στις 29 Ιουνίου 1990 και σημειώνει την υπουργική δήλωση της δεύτερης Διάσκεψης για το Κλίμα πλανήτη, που εγκρίθηκε στις 7 Νοεμβρίου 1990.

Αναγνωρίζει επιπλέον ότι χώρες με χαμηλό υψόμετρο και άλλες μικρές νησιωτικές, χώρες πεδινές παράκτιες, άνυδρες και ημι-άνυδρες περιοχές ή περιοχές εκτεθειμένες σε πλημμύρες, ξηρασία και ερημοποίηση, και αναπτυσσόμενες χώρες με ευπαθή ορεινά οικοσυστήματα είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στις δυσμενείς επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος. Επιβεβαιώνει ότι η αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος πρέπει να συντονίζονται με την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη με ολοκληρωμένο τρόπο, με σκοπό να αποφεύγονται δυσμενείς επιπτώσεις στην οικονομία και επιβεβαιώνει ότι η αντιμετώπιση της αλλαγής του

κλίματος πρέπει να συντονίζονται με την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη με ολοκληρωμένο τρόπο, με σκοπό να αποφεύγονται δυσμενείς επιπτώσεις στην οικονομία.

Συνειδητοποιεί την πολύτιμη και αναλυτική εργασία που διεξάγεται από πολλά κράτη για την κλιματική αλλαγή και τη σημαντική συμβολή του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού, του Προγράμματος Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών και άλλων οργάνων, οργανισμών και φορέων του συστήματος των Ηνωμένων Εθνών, καθώς και άλλων διεθνών και διακυβερνητικών οργανισμών, με την ανταλλαγή των αποτελεσμάτων της επιστημονικής έρευνας και το συντονισμό της έρευνας.

Τέλος σημειώνει ότι υπάρχουν πολλές αβεβαιότητες στις προβλέψεις για την αλλαγή του κλίματος, κυρίως όσον αφορά το μέγεθος, τον χρονισμό και την χωρική και αναγνωρίζει ότι τα βήματα που απαιτούνται για την κατανόηση και την αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος θα είναι περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά πιο αποτελεσματικά εάν βασίζονται σε σχετικές επιστημονικές, τεχνικές και οικονομικές μελέτες και επαναξιολογούνται συνεχώς υπό το φως των νέων ευρήματα σε αυτούς τους τομείς.

Επιπλέον δίνει τους ορισμούς για τις έννοιες που εμπλέκονται με την κλιματική αλλαγή και ορίζει ως:

“Δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής” τις αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον ή τους ζώντες οργανισμούς που προκύπτουν από την αλλαγή του κλίματος και που έχουν σημαντικές επιβλαβείς επιπτώσεις στη σύνθεση, ανανέωση ή στην παραγωγικότητα των φυσικών και διαχειριζόμενων οικοσυστημάτων ή για τη λειτουργία των κοινωνικοοικονομικών συστημάτων ή στην ανθρώπινη υγεία και ευημερία.

“ Κλιματική αλλαγή” την αλλαγή του κλίματος, η οποία αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα που μεταβάλλει τη σύνθεση της ατμόσφαιρας του πλανήτη και που οι κλιματικές διακυμάνσεις παρατηρούνται κατά τη διάρκεια μακρών χρονικών περιόδων.

“Κλιματικό σύστημα ” το σύνολο της ατμόσφαιρας, υδρόσφαιρας, βιόσφαιρας και γεώσφαιρας καθώς και τις αλληλεπιδράσεις αυτών.

Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή Ένωση, η 17η Δεκεμβρίου 2008 είναι μία μέρα ορόσημο για το περιβάλλον καθώς εγκρίθηκε το “ κλιματικό και ενεργειακό πακέτο” για την έκδοση οδηγιών με σκοπό την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Τα μέτρα αυτά θα συμβάλλουν στην επίτευξη του στόχου “20-20-20” της Ε.Ε:

- 20% μείωση των αερίων του θερμοκηπίου
- 20% αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας
- 20% ποσοστό εισχώρησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Το 2007 η τέταρτη Έκθεση της IPCC κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης στις μέσες παγκόσμιες θερμοκρασίες από το μέσον του 20^{ου} αιώνα οφείλεται πιθανώς στην αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου από τις δραστηριότητες του ανθρώπου, και ως εκ τούτου είναι σημαντικό να αναλυθούν οι επιπτώσεις τόσο της φυσικής όσο και της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής και ο τρόπος που θα επηρεαστούν τα υπάρχοντα κλιματικά πρότυπα σε τοπική κλίμακα. (IPCC, 2007).

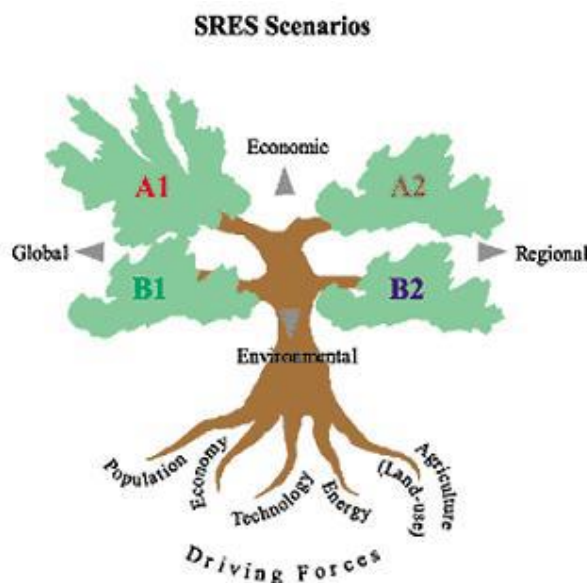
Αν και ο στόχος του 20% στην Ε.Ε μοιάζει εφικτός, πρέπει να εξεταστεί αν μπορεί να διατηρηθεί μακροπρόθεσμα, ως τα τέλη του αιώνα που διανύεται, κυρίως λόγω της μεταβολής των μεταβλητών που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μεταβολή των μεταβλητών αυτών εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την κλιματική αλλαγή, η οποία διαπιστώνεται από την επιστημονική κοινότητα.

Η κλιματική αλλαγή πρέπει να εξετάζεται τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Όσον αφορά την χωρική διερεύνηση της, η ανάλυση γίνεται είτε σε παγκόσμια είτε σε τοπική κλίμακα. Η τοπική αλλαγή του κλίματος μπορεί να διαφέρει ή/και να είναι αντίθετη από την παγκόσμια τάση, όπως στην περιοχή της μεσογείου όπου η επίδραση της κλιματικής είναι πιο έντονη. Όσον αφορά την χρονική ανάλυση, οι μελέτες επικεντρώνονται σε τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους. Το παρελθόν (χιλιετία), το πρόσφατο παρελθόν (δύο τελευταίοι αιώνες) μέχρι το παρόν και το μέλλον. Για την παρουσίαση του κλίματος την τελευταία χιλιετία, λόγω έλλειψης μετρούμενων παρατηρήσεων, χρησιμοποιούνται διάφοροι εμπειρικές μέθοδοι και παρατηρήσεις, (δακτύλιοι δέντρων, σύνθεση πάγων, κοράλλια θαλάσσια ιζήματα κλπ) ενώ για το πρόσφατο παρελθόν χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων από

μετεωρολογικούς σταθμούς. Η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος γίνεται με μοντέλα πρόβλεψης που βασίζονται σε πραγματικές τάσεις ή/και σενάρια. (Spinoni 2010).

1.2.1 Σενάρια κλιματικής αλλαγής

Στα πλαίσια της μελέτης των προβλεπόμενων ανθρωπογενών κλιματικών αλλαγών, βασικός παράγοντας των προσομοιώσεων του μελλοντικού κλίματος είναι η εξέλιξη των συγκεντρώσεων στην ατμόσφαιρα των αερίων του θερμοκηπίου, (CO_2 , CH_4 , N_2O , PFCs, SF_6 , HFCs, NO_x , CO, VOC, SO_2 , BC, OC). Ο ρυθμός με τον οποίο θα εξελιχθούν στο μέλλον οι εκπομπές και κατά συνέπεια και οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα, δεν μπορεί να προσδιορισθεί επακριβώς. Για το σκοπό αυτό στα πλαίσια της τρίτης έκθεσης της διακυβερνητικής επιτροπής του Ο.Η.Ε για την κλιματική αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) διαμορφώθηκε ένας μεγάλος αριθμός σεναρίων (40 σενάρια) σχετικών με τη μελλοντική εξέλιξη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (**Special Report on Emissions Scenarios**, SRES) (Nakićenović et al., 2000). Η διαμόρφωση των συγκεκριμένων σεναρίων στηρίχτηκε σε ορισμένους βασικούς άξονες που σχετίζονται με τα δημογραφικά στοιχεία, την κοινωνικο-οικονομική ανάπτυξη, τις πολιτικές που θα ακολουθηθούν γύρω από θέματα ενέργειας, τη μελλοντική τεχνολογική ανάπτυξη καθώς και το κατά πόσο οι αποφάσεις γύρω από οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα λαμβάνονται σε τοπικό ή διεθνές επίπεδο. Τα διάφορα σενάρια εκπομπών ταξινομήθηκαν σε 4 οικογένειες σεναρίων, η καθεμία των οποίων περιλαμβάνει παρόμοια σενάρια εκπομπών βάση των κριτηρίων που αναφέρθηκαν όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-1. Σύμφωνα με την IPCC όλα τα σενάρια θεωρούνται “ουδέτερα”, και κανένα δεν περιλαμβάνει πιθανές καταστροφές και “εκπλήξεις” όπως πολέμους, συγκρούσεις ή/και περιβαλλοντική κατάρρευση. Οι οικογένειες αυτές είναι η οικογένεια σεναρίων **A1** που χωρίζεται σε 3 υποκατηγορίες: τις **A1FI**, **A1B** και **A1T**, η οικογένεια σεναρίων **A2**, η οικογένεια σεναρίων **B1** και η οικογένεια σεναρίων **B2**. Η IPCC δεν υποστηρίζει ότι κάποιο αυτά τα σενάρια είναι πιο πιθανό να συμβεί σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε σεναρίου παρατίθενται στον Πίνακα 1-1.



Εικόνα 1-1: Σχηματική επεξήγηση των σεναρίων κλιματικής αλλαγής (Nakićenović N., et.al,2000)

Πίνακας 1-1: Χαρακτηριστικά σεναρίων κλιματικής αλλαγής

Σενάριο A1 1.4 - 6.4 °C	Έχει να κάνει με έναν συγκλίνον κόσμο. Χαρακτηρίζεται από ραγδαία οικονομική ανάπτυξη, παγκόσμιο πληθυσμό που φτάνει τα 9δισ το 2050 και έπειτα σταδιακά μειώνεται, γρήγορη διάδοση νέων και αποτελεσματικών τεχνολογιών • A1FI: Έμφαση στην χρήση ορυκτών καυσίμων και ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 950 ppm το 2100 • A1B: Χρήση τόσο ορυκτών καυσίμων όσο και εναλλακτικών πηγών ενέργειας και έντονη αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 720 ppm το 2100 • A1T: Έμφαση στην χρήση μη ορυκτών καυσίμων και μικρή αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 500 ppm το 2100.
Σενάριο A2 2.0 - 5.4 °C	Έχει να κάνει με έναν χωρισμένο κόσμο, που δρα ανεξάρτητα ανά κράτος και χαρακτηρίζεται από περιφερειακό προσανατολισμό στην οικονομική ανάπτυξη, ιδιαίτερα έντονη κατανάλωση ενέργειας, συνεχή αύξηση του παγκόσμιου

	πληθυσμού. Αργή και τμηματική τεχνολογική ανάπτυξη και μέτριες έως μεγάλες αλλαγές στη χρήση γης. Ραγδαία αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα η οποία θα φτάσει τα 850 ppm το 2100.
Σενάριο B1 1.1 - 2.9 °C	Έχει να κάνει με έναν συγκλίνον και πιο οικολογικά φιλικό κόσμο. Χαρακτηρίζεται από ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος με μεγάλες αλλαγές στην κατεύθυνση των πληροφοριών και της εξυπηρέτησης, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Μείωση της χρήσης των συμβατικών πηγών ενέργειας και στροφή στη χρήση τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές. Ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι το έτος 2050 και σταδιακή μείωσή του στη συνέχεια. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα με ήπιους σχετικά ρυθμούς ιδιαίτερα από το 2050 και μετά η οποία θα φτάσει το 2100 τα 550 ppm. Έμφαση σε παγκόσμιες λύσεις για την οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική σταθερότητα.
Σενάριο B2 1.4 - 3.8 °C	Έχει να κάνει με έναν ανεξάρτητο κόσμο, αλλά πιο οικολογικά φιλικό με ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας με μέτριους ρυθμούς και ηπιότερες τεχνολογικές αλλαγές σε σύγκριση με τα σενάρια εκπομπών A1 και B1. Συνεχόμενη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, αλλά πιο αργή από αυτή του A2. Αύξηση της συγκέντρωσης του CO ₂ στην ατμόσφαιρα με μέτριους αλλά σταθερούς ρυθμούς η οποία θα φτάσει το 2100 τα 620 ppm. Έμφαση σε τοπικές λύσεις για την οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική σταθερότητα.

Όπως επισημαίνεται από τους Moss et al. (2010), η ερευνητική κοινότητα χρειάζεται νέα σενάρια εκπομπών διότι απαιτούνται πιο λεπτομερείς πληροφορίες με μεγαλύτερη χωρική και χρονική ανάλυση για τη λειτουργία των κλιματικών μοντέλων και επιπλέον υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα σενάρια που διερευνούν ρητά την επίδραση των διαφόρων κλιματικών πολιτικών που μπορεί να

ακολουθηθούν. Τέτοια σενάρια θα επιτρέψουν την αξιολόγηση των οφελών και τα κόστη των μακροπρόθεσμων στόχων για το κλίμα.

Η ανάγκη για νέα σενάρια οδήγησε την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) να ζητήσει από τις επιστημονικές κοινότητες να αναπτύξουν μια νέα σειρά από σενάρια όπου θα διευκολύνουν τη μελλοντική αξιολόγηση της αλλαγής του κλίματος (Moss et al., 2008). Τα νέα αυτά σενάρια τα ονομάζει “Representative Concentration Pathways, (RCPs), και απαιτήθηκε αυτά τα σενάρια να συμβατά με τα τρέχοντα σενάρια εκπομπών, να περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με μία σειρά από παράγοντες πέρα από τις συγκεντρώσεις και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, όπως τη χρήση γης, τις κοινωνικό-οικονομικές καταστάσεις και τις πολιτικές για το περιβάλλον που ακολουθούνται.

1.2.2 Κλιματικά πρότυπα προσομοίωσης

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σήμερα για την προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής είναι τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Coupled Atmospheric-Ocean General Circulation Models, AOGCMs). Πρόκειται για μοντέλα που βασίζονται στις βασικές φυσικές αρχές του γήινου συστήματος όπως οι βασικές εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών και της διάδοσης της ακτινοβολίας. Τα AOGCMs χωρίζονται σε Ατμοσφαιρικά (AGCMs) και Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (OGCMs) ενώ μπορεί να είναι και συζευγμένα μεταξύ τους (AOGCMs) καθώς και με άλλα μοντέλα όπως τα μοντέλα προσομοίωσης της παγοκάλυψης στην ξηρά και την θάλασσα, της βιόσφαιρας και άλλα. (Καψωμενάκης et al., 2011)

Τα AOGCMs που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του κλίματος και της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζουν ομοιότητες με τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την καιρική πρόγνωση λίγων ημερών. Η διαφορά είναι ότι τα μοντέλα πρόγνωσης του καιρού δίνουν έμφαση σε διαφορετικά στοιχεία αφού χρησιμοποιούνται με διαφορετικό σκοπό και σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Συγκεκριμένα τα κλιματικά AOGCMs δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις διεργασίες του εδάφους, του ωκεανού και των παγετώνων καθώς και στην ισορροπία των διεργασιών μεγάλης χρονικής κλίμακας όπως ο υδρολογικός κύκλος.

Τονίζεται ότι η γνώση ορισμένων φυσικών διεργασιών είναι ακόμα περιορισμένη. Για το λόγο αυτό στις κλιματικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται παραμετροποιήσεις και απλουστεύσεις ορισμένων φαινομένων. Η χωρική ανάλυση των AOGCMs στις μέρες μας, εξαιτίας των περιορισμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων, είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων. Σε αυτή τη χωρική ανάλυση είναι δυνατόν να αναπαραχθεί ικανοποιητικά η γενική κυκλοφορία σε ολόκληρο τον πλανήτη καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων κλιματικών παραμέτρων σε συνοπτική κλίμακα. Ωστόσο δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια φαινόμενα που σχετίζονται με την επίδραση της τοπογραφίας σε τοπική και περιοχική κλίμακα.

Οι τεχνικές με τις οποίες εισάγεται η περιοχική πληροφορία στις κλιματικές προσομοιώσεις ονομάζονται τεχνικές υποβιβασμού κλίμακας (υποκλιμάκωσης) και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: 1) Τα υψηλής ή μεταβλητής ανάλυσης παγκόσμια ατμοσφαιρικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, 2) τις στατιστικές ή εμπειρικές μεθόδους υποκλιμάκωσης (Statistical/Empirical Downscaling) και 3) τη δυναμική υποκλιμάκωση. Η δυναμική υποκλιμάκωση βασίζεται στη χρήση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models, RCMs). Πρόκειται για μοντέλα περιορισμένου πεδίου και υψηλής ανάλυσης τα οποία βασίζονται στη δυναμική υποκλιμάκωση και αναπτύχθηκαν προκειμένου να εισαχθεί η περιοχική πληροφορία στα μεγάλης κλίμακας πεδία που παρέχονται από τα GCMs ή που προκύπτουν από επανα-ανάλυση (NCEP/ ERA-40) (Dickinson et al., 1989, Giorgi, 1990). Για να λειτουργήσουν είναι απαραίτητο να τους παρέχονται αρχικές συνθήκες σε ολόκληρο το πεδίο τους, χρονομεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες στα πλευρικά τους όρια και επιφανειακές οριακές συνθήκες. Οι πλευρικές οριακές συνθήκες προέρχονται από προσομοιώσεις με GCMs ή από ανάλυση παρατηρήσεων. Δέχονται επίσης, όπως και τα AOGCMs, δεδομένα εισόδου συγκέντρωσης αερίων θερμοκηπίου και συγκέντρωσης αερολυμμάτων. Συνήθως αποτελούνται από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο συζευγμένο με ένα μοντέλο του εδάφους. Οι συνθήκες στην επιφάνεια του ωκεανού παρέχονται μαζί με τις χρονομεταβαλλόμενες πλευρικές οριακές συνθήκες, ωστόσο γίνονται απόπειρες να συζευχθούν και με ένα ωκεάνιο μοντέλο αντίστοιχης (υψηλής) χωρικής ανάλυσης. Επιπρόσθετα είναι δυνατό να συζευχθούν με μοντέλα της υδρολογίας, των πάγων της θάλασσας (sea-ice) της χημείας της ατμόσφαιρας/αερολυμμάτων

και της βιόσφαιρας. Γενικά δεν αλληλοεπιδρούν με το GCM που τους παρέχει τις πλευρικές οριακές συνθήκες. Λόγω των μικρών τους απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους μπορούν να πραγματοποιούν προσομοιώσεις διάρκειας μερικών δεκαετιών σε αρκετά υψηλή ανάλυση, μέχρι και κάτω από τα 10km. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουν να υποκλιμακώσουν την πληροφορία από τα αποτελέσματα των GCMs που περιέχει την γενική κυκλοφορία η οποία οφείλεται στα μεγάλης κλίμακας παράγοντες (large-scale forcings) και να την εμπλουτίσουν χάρη (α) στην καλύτερη αναπαράσταση της τοπογραφίας (λόγω της υψηλότερης ανάλυσης) και (β) στην δυνατότητα αναπαράστασης διεργασιών μικρότερης κλίμακας οι οποίες δεν μπορούν να προσομοιωθούν στην κλίμακα των GCMs. Τα περιοχικά μοντέλα χρησιμοποιούνταν ήδη από παλιά στην αριθμητική πρόγνωση καιρού, βελτιώθηκαν από τους Dickinson et al. (1989) και Giorgi (1990) και έκτοτε χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, από παλαιοκλιματικές μέχρι την μελέτη της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής.

Βασικό πλεονέκτημα των RCMs είναι ότι περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας όπως την ορογραφία, την κατανομή ξηράς και θάλασσας και την χρήση της γης, τα οποία δεν είναι δυνατό να παρασταθούν ακόμα στις προσομοιώσεις των GCMs επειδή οι διαστάσεις τους είναι μικρότερες από τις διαστάσεις του πλέγματος του GCM. Επιπροσθέτως η αυξημένη χωρική ανάλυση των RCMs επιτρέπει να αναλύονται φαινόμενα μικρότερης χωρικής κλίμακας που δεν αναλύονται από τα GCMs. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να προσομοιώσουν τη λειτουργία μηχανισμών ανάδρασης που δρουν σε περιοχική κλίμακα. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι αν τα αποτελέσματα του GCM που παρέχει τις οριακές συνθήκες είναι εσφαλμένα το ίδιο θα ισχύσει και για τα αποτελέσματα του RCM. Αυτό το μειονέκτημα ισχύει για όλες τις τεχνικές υποκλιμάκωσης. Επίσης μειονέκτημα αποτελεί η έλλειψη της δυνατότητας αλληλεπίδρασης με το GCM. Η ανάγκη ρύθμισης τους, είναι ένα ακόμα μειονέκτημα διότι μπορεί να αποδειχτεί διαδικασία χρονοβόρα και επίπονη.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμηση των κλιματικών συνθηκών που θα επικρατήσουν στο μέλλον σε ένα τόπο εμπεριέχει πολλούς παράγοντες αβεβαιότητας οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

1. Η επιλογή του σεναρίου εκπομπής θερμοκηπιακών αερίων βάσει του οποίου γίνεται η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος,
2. Η επιλογή του GCM με το οποίο θα διεξαχθούν οι κλιματικές προσομοιώσεις,
3. Η επιλογή του RCM στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεθοδολογία δυναμικής υποκλιμάκωσης και
4. η επιλογή των αρχικών συνθηκών της κλιματικής προσομοίωσης του GCM, δεδομένα του οποίου χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου του RCM.

Μια συνήθης πρακτική, που χρησιμοποιείται προκειμένου να μειωθούν οι αβεβαιότητες που οφείλονται στις διαφορετικές παραμετροποιήσεις και τους διαφορετικούς δυναμικούς κώδικες που χρησιμοποιούνται από τα διαφορετικά κλιματικά μοντέλα αλλά και στην αβεβαιότητα των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στο μέλλον, είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων ενός συνόλου από προσομοιώσεις διαφορετικών κλιματικών μοντέλων και για διάφορα σενάρια εκπομπών.

Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα ENSEMBLES FP6 πραγματοποιήθηκε κατά την χρονική περίοδο 1η Σεπτεμβρίου 2004 – 31 Δεκεμβρίου 2009. Στόχος του προγράμματος αυτού ήταν η δημιουργία ενός συστήματος προσομοίωσης που θα παρείχε εκτιμήσεις των μεταβολών που θα υποστεί το κλίμα της Ευρώπης καθώς και άλλων περιοχών του πλανήτη εξαιτίας των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στα πλαίσια του προγράμματος διερευνήθηκαν επίσης, οι επιπτώσεις των μεταβολών αυτών σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, στην γεωργία, στην υγεία του πληθυσμού, στις λίμνες και τα ποτάμια, στη φυσική βλάστηση κ.α.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν από ένα σύνολο κλιματικών μοντέλων που περιλάμβανε τα πιο εξελιγμένα μέχρι σήμερα RCMs και AOGCMs. Στα πλαίσια μάλιστα του προγράμματος ελέγχθηκε η αξιοπιστία των μοντέλων και η ικανότητα τους να αναπαράγουν επιτυχώς το κλίμα των υπό μελέτη περιοχών κατά το παρόν. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καλύπτουν μεγάλο εύρος χωρικών (τοπική, περιοχή, πλανητική) και χρονικών (εποχική, δεκαετίας, μεγαλύτερη από δεκαετία) κλιμάκων. Η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος έγινε υπό το σενάριο A1B.

1.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η χρήση ηλιακής ενέργειας αναμένεται να συμβάλει σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον λόγω των σχεδίων για μείωση της χρήσης ορυκτών πόρων και την στροφή στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

Η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού είτε με θερμικές είτε με φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική αξιοποίηση περιλαμβάνει συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα κυρίως για θέρμανση νερού και μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση ατμοστροβίλων. Στη δεύτερη εφαρμογή τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων ή συστοιχιών τους.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη και εγκατεστημένη ηλιακή τεχνολογία για μεγάλης κλίμακας ηλεκτρική παραγωγή. Μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, στηριζόμενα στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά, όπως το πυρίτιο που είναι το συνηθέστερο. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό παρασκευής, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής.

Έτσι, έχουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση:

1. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους
 - 1.1 Στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου
 - 1.2 Στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου
 - 1.3 Στοιχεία ταινίας πυριτίου

2. Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών υμενίων
 - 2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου
 - 2.2 Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)
 - 2.3 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)
3. Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

1.3.1 Κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον βαθμό απόδοσης των Φ/Β

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να επηρεάζεται είτε από εσωτερικούς παράγοντες είτε από εξωτερικούς. Οι εσωτερικοί παράγοντες είναι τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του, οι οπτικές απώλειες, η γήρανση, η χωροταξική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και η δίοδος αντεπιστροφής ενώ εξωτερικοί είναι η ακτινοβολία, η σκίαση, η θερμοκρασία, ο άνεμος, η ρύπανση και οι ηλεκτρικές απώλειες.

Τα επόμενα 100 χρόνια είναι ευρέως αποδεκτό ότι στο κλίμα της γης θα παρατηρηθούν σημαντικές αλλαγές λόγω των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αερολυμάτων, κάτι που θα επιφέρει αλλαγές και στις μεταβλητές που σχετίζονται είτε άμεσα είτε έμμεσα με τις ΑΠΕ.

- **Επίδραση ακτινοβολίας**

Το κάθε ημιαγώγιμο υλικό αντιδρά σε διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Έτσι ανάλογα με το υλικό είναι εκμεταλλεύσιμο το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιδρά με το συγκεκριμένο υλικό. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία συμβολίζει τον συντελεστή απόδοσης του υλικού. Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η αύξηση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας έχει ανάλογη κλίση με την απόδοση των Φ/Β πλαισίων εκτός από τα χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Τα μη συγκεντρωτικά Φ/Β απορροφούν τόσο την άμεση όσο και την διάχυτη ακτινοβολία. (Crook et al., 2011).

- **Επίδραση θερμοκρασίας**

Είναι τεκμηριωμένο ότι η ηλεκτρική απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου. Υπάρχουν αρκετοί συσχετισμοί όπου η θερμοκρασία του πλαισίου εκφράζεται ως συνάρτηση των καιρικών συνθηκών όπως της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της τοπικής ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας (Skorlaki & Palyvos, 2009).

Η μέγιστη ισχύς ενός Φ/Β πλαισίου ισούται με το γινόμενο του παράγοντα πλήρωσης (FF), με την τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}). Έχει αποδειχτεί ότι τόσο η τάση ανοικτού κυκλώματος όσο και ο παράγον πλήρωσης μειώνονται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου ενώ το ρεύμα βραχυκυκλώσεως αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά σε μικρότερο βαθμό (Zondag 2008). Εντούτοις, δεδομένου ότι η αλλαγή στην τάση είναι πολύ ισχυρότερη από την αλλαγή στο ρεύμα, η γενική επίδραση στην απόδοση τείνει να είναι παρόμοια με αυτήν στη τάση. Η γραμμική αρνητική σχέση μεταξύ της απόδοσης και της θερμοκρασίας πλαισίου περιγράφεται με την σχέση 1 (Notton et al., 2005).

$$\frac{\eta_{cell}}{\eta_{ref}} = 1 - \beta(T_{cell} - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G_{tot}$$

Εξίσωση 1

όπου η_{ref} είναι η ηλεκτρική απόδοση στη θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} , και σε flux ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m^2 (Evans, 1981). Ο συντελεστής θερμότητας β , και ο συντελεστής ηλιακής ακτινοβολίας γ , εξαρτώνται κυρίως από το υλικό κατασκευής του πλαισίου.

Ωστόσο υπάρχουν αρκετές σχέσεις όπου περιγράφουν την εξάρτηση της απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου συναρτήσει της θερμοκρασίας, οι οποίες περιλαμβάνουν όχι μόνο τις βασικές περιβαλλοντικές μεταβλητές αλλά και παραμέτρους που εξαρτώνται τόσο από το υλικό κατασκευής του πλαισίου όσο και από το σύστημα συνολικά. Έτσι πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην επιλογή κάποιας εφαρμογής για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής απόδοσης ενός πλαισίου ή μιας Φ/Β μονάδας δεδομένου ότι οι εξισώσεις έχουν αναπτυχθεί για

συγκεκριμένα χαρακτηριστικά πλαισίου, γεωμετρικής τοποθέτησης και άλλων τεχνικών χαρακτηριστικών (Skorlaki & Palyvos, 2009)

Η θερμοκρασία του πλαισίου εξαρτάται άμεσα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος, και μία γενική εμπειρική έκφραση είναι η παρακάτω:

$$T_{cell} = c_1 + c_2T + c_3G_{tot} \text{ (Kou et al., 1998)}$$

Εξίσωση 2

Όπου T είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε $^{\circ}\text{C}$. Οι συντελεστές εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά και τη δομή του πλαισίου.

1.4 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας (Bias correction)

Ο τρόπος με τον οποίο η κλιματική αλλαγή θα επηρεάσει τις ξηρές και ημι-άνυδρες περιοχές όπως αυτής της Μεσόγειου και κατ' επέκταση και της Ελλάδας έχει σημαντικές επιπτώσεις για την πορεία της ανάπτυξης. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις είναι το κύριο εργαλείο για την πρόβλεψη του κλίματος. Έτσι κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μελλοντικών κλιματικών προβολών του πλανήτη υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Η χρήση περιοχικών κλιματικών μοντέλων υψηλής χωρικής ανάλυσης (Regional Climate Models-RCMs) έχει γίνει συχνότερη για τον καλύτερο προσδιορισμό των κλιματικών παραμέτρων, έναντι των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων (Global Circulation Models -GCMs) τα οποία είναι ανεπαρκή για να περιγράψουν πολλές τοπικές κλιματικές διεργασίες (Boberg & Christensen, 2012). Ωστόσο, σε διαφορετικό βαθμό όλα τα αριθμητικά μοντέλα πάσχουν από σφάλματα μεροληψίας. Ως σφάλμα μεροληψίας ορίζεται η ανεξαρτήτου χρόνου συνιστώσα του σφάλματος (Haerter et al., 2011). Τα τοπικά κλιματικά μοντέλα τείνουν να προσομοιάζουν τα μετεωρολογικά δεδομένα με διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά σε σχέση με της μετρημένες-παρατηρούμενες τιμές. Έχει αποδειχτεί ότι τόσο τα GCMs όσο και τα RCMs τείνουν να υπερεκτιμούν την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω κλιματικής αλλαγής (Boberg & Christensen, 2012) σε κλίματα με υγρούς χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια και κυρίως τους

καλοκαιρινούς μήνες στην νότιο-ανατολική Ευρώπη (Christensen et al., 2008). Έτσι είναι κατανοητό ότι πρέπει να προηγηθεί κάποιας μορφής προεπεξεργασία για την εξάλειψη των υφιστάμενων σφαλμάτων πόλωσης ώστε να επέλθουν σωστές στατιστικά προβλέψεις και προσομοιώσεις. Η διόρθωση του αποτελέσματος ενός μοντέλου με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου να είναι συναφή με τα πραγματικά δεδομένα ονομάζεται στατιστική διόρθωση σφάλματος πόλωσης ή διόρθωση σφάλματος μεροληψίας. Είναι μια μαθηματική διαδικασία που χαρτογραφεί την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) των δεδομένων του μοντέλου επί των παρατηρούμενων δεδομένων (Haerter et al., 2011). Η μέθοδος ποικίλει ανάλογα τον τύπο, την χρονική και χωρική κλίμακα των δεδομένων. Για να έχει νόημα η διόρθωση, και για να είναι εφαρμόσιμα τα αποτελέσματα πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις όπως, η χρονική κλίμακα να είναι κατάλληλη και ίδια για όλα τα δεδομένα, τα δεδομένα του μοντέλου να παρέχουν μια επαρκή εκπροσώπηση του φυσικού συστήματος, διότι με τη διαδικασία αυτή δεν διορθώνονται λανθασμένες παραστάσεις των δυναμικών ή/και φυσικών διαδικασιών. Η διαδικασία στηρίζεται στα δεδομένα που περιέχονται στο κλιματικό μοντέλο τα οποία έχουν συνήθως μια συστηματική απόκλιση από τα παρατηρούμενα και συνεπώς δεν μπορεί να διορθώσει τα θεμελιώδη ποιοτικά ελαττώματα του μοντέλου. Κάποιες μέθοδοι διόρθωσης εμπλέκουν μεθόδους ανάκτησης στατιστικών χαρακτηριστικών από τα παρατηρημένα δεδομένα και εφαρμογή τους πάνω στα αποτελέσματα του μοντέλου, ενώ κάποιες άλλες πιο απλές εφαρμόζουν κάποιο συντελεστή διόρθωσης πάνω στα αποτελέσματα του μοντέλου. Οι Boberg & Christensen (2012), Haerter et al. (2011), Terink et al. (2009), Christensen et al. (2008), καταδεικνύουν την αναγκαιότητα για διόρθωση του σφάλματος μεροληψίας με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρήσιμων σε εφαρμογές της υδρολογίας, της διαχείρισης υδατικών πόρων και της κλιματολογίας.

1.5 Ηλιακά μοντέλα

Η ηλιακή ακτινοβολία παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στις διεργασίες ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της γης. Συνεπώς η χωρική και χρονική ετερογένεια της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας καθορίζει την δυναμική πολλών διαδικασιών όπως της θερμοκρασίας του αέρα και του εδάφους, της εξατμισοδιαπνοής, της φωτοσύνθεσης κλπ, τα οποία έχουν άμεσο αντίκτυπο στον άνθρωπο και τη ζωή του. Η γνώση της χωρικής κατανομής της ακτινοβολίας είναι συνεπώς ζωτικής σημασίας για την κλιματολογία, την οικολογία, την διαχείριση της γης και γενικότερα την περιβαλλοντική επιστήμη. Σε μία μεγάλη περιοχή δεν είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί η κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η τοπογραφία και η νεφοκάλυψη, αλλά είναι αρκετά πολύπλοκο να γίνει η ίδια διαδικασία σε περιοχές με πολυπλοκότητα ανάγλυφου και υψηλή ανάλυση (Shengli & Pinde, 2009).

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας ως πηγή ενέργειας τα επόμενα χρόνια, απαιτεί την αξιόπιστη εκτίμηση της διαθέσιμης ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε παγκόσμια κλίμακα το γεωγραφικό πλάτος, η περιστροφή και η περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο καθορίζουν την κατανομή της ακτινοβολίας. Σε τοπική κλίμακα ωστόσο η τοπογραφία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της κατανομής της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης (Hofierka & Šúri, 2002). Σε περιοχές με σύνθετη τοπογραφία, μεταβλητότητα στα επίπεδα και τον προσανατολισμό της επιφάνειας του εδάφους, δημιουργείται μεγάλη χωρική και χρονική ετερογένεια στην τοπική κατανομή της ακτινοβολίας. Σημαντικό ρόλο επιπλέον παίζει και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, η νεφοκάλυψη καθώς και η περίοδος του χρόνου λόγω της διαφορετικής γωνίας του ηλίου.

Όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ακτινοβολίας από κλιματικούς ή μετεωρολογικούς σταθμούς μπορεί να δημιουργηθεί ένα μοντέλο χωρικής κατανομής της ακτινοβολίας, αλλά λόγω της αραιής χωροθέτησής τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μοντελοποίηση ακτινοβολίας μόνο σε οριζόντιες επιφάνειες.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμοι μετεωρολογικοί ή κλιματολογικοί σταθμοί, είναι με μεθόδους παρεμβολής

(Sampson & Guttorp, 1992; Xia et al., 2000; Jeffrey et al., 2001; J. Tovar-Pescador et al., 2006; Zelenka et al., 1992; Hulme et al., 1995) αλλά η χρήση τους είναι περιορισμένη καθώς η τοπογραφία είναι ένας σημαντικός παράγοντας μεταβλητότητας, και τέτοιες μέθοδοι μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο σε περιοχές με χωρική και κλιματική ομογένεια.

Επιπλέον, μπορούν να ληφθούν χωρικά συνεχείς τιμές της ακτινοβολίας από τους γεωστατικούς μετεωρολογικούς δορυφόρους (π.χ. METOSAT), όπου η επεξεργασία των δεδομένων τους μπορεί μεν να παρέχει λιγότερο ακριβείς τιμές, συγκριτικά με τις μετρήσεις στο έδαφος αλλά έχουν το πλεονέκτημα ότι παρέχουν μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη (Hofierka & Šúri, 2002). Ωστόσο, και αυτές οι εφαρμογές χρειάζονται μεγαλύτερη χωροχρονική ανάλυση, και είναι περιορισμένης χρησιμότητας σε περιοχές πολύπλοκη τοπογραφία. (Agostino & Zelenka, 1992; Beyer et al., 1997).

Τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί μια νέα τεχνική για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιοχές με πολύπλοκη τοπογραφία, η οποία χρησιμοποιεί δεδομένα από ψηφιακά μοντέλα εδάφους (*Digital Elevation Model, DEM*) τα οποία εντάσσονται σε ένα πρόγραμμα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, (GIS) και αποδίδουν οικονομικά αποδοτικές και ακριβείς εκτιμήσεις για την ηλιακή ακτινοβολία. Μέσα από τα DEM δίνεται η δυνατότητα να ληφθούν υπ όψιν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά (υψόμετρο, κλίση, πτυχώσεις), και η επιρροή τους στην κατανομή της ακτινοβολίας μέσα από μια διαδικασία της οποίας η ακρίβεια εξαρτάται από την ανάλυση τους (Tovar-Pescador et al., 2006).

Υπάρχουν δύο τύποι μοντέλων για την εκτίμηση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης μέσω DEM, ο πρώτος υπολογίζει την ακτινοβολία σε μια συγκεκριμένη θέση (*point-specific models*) βάση της γεωμετρίας της περιοχής, τον ορατό ουρανό από το σημείο αυτό και την πραγματική θέση του ηλίου, και η τοπική επίδραση της τοπογραφίας ενσωματώνεται στο μοντέλο είτε με την εμπειρική είτε με την οπτική εκτίμηση. Τα εξειδικευμένα για σημείο μοντέλα (*point-specific models*) είναι ιδιαίτερα ακριβή για μία δεδομένη τοποθεσία αλλά όχι για μια ολόκληρη περιοχή, διότι είναι πρακτικά αδύνατο να οικοδομηθεί ένα συγκεκριμένο μοντέλο για κάθε θέση μιας περιοχής αφού κάθε σημείο παρουσιάζει διαφορετικές θέσεις σχετικά με τον ήλιο. Ο δεύτερος τρόπος υπολογίζει την ακτινοβολία σε μια ολόκληρη

γεωγραφική περιοχή (area based models), υπολογίζοντας τον προσανατολισμό και την σκίαση από το DEM, με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα ακριβής (Tovar-Pescador et al., 2006).

Πλέον υπάρχουν αρκετά λογισμικά που υπολογίζουν την κατανομή της ακτινοβολίας σε μία περιοχή μέσω ενσωμάτωσης των DEM σε κάποιο πρόγραμμα GIS. Τέτοια είναι το ArcInfo GIS (Dubayah & Rich, 1995, Hetrick et al., 1993, Fu & Rich, 2000), SRAD (Wilson & Gallant, 2000), IDRISI (Miklanek, 1993) ή το GRASS (Hofierka & Suri, 2002).

2 Μεθοδολογία

2.1 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας (Bias correction)

Με την διαδικασία διόρθωσης του μεροληπτικού σφάλματος επιχειρείται να ταιριάζουν οι σημαντικές στατιστικές παράμετροι των δεδομένων που λαμβάνονται από τα μοντέλα, με αυτά που έχουν παρατηρηθεί. Η διόρθωση μεροληπτικού σφάλματος προσαρμόζει το μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των διορθωμένων τιμών των μοντέλων, ώστε να είναι ίσα με αυτά των παρατηρούμενων. Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται διόρθωση μεροληπτικού σφάλματος στα δεδομένα θερμοκρασίας (μέση, μέγιστη, ελάχιστη μηνιαία) και ακτινοβολίας.

Η συνάρτηση διόρθωσης δημιουργείται χρησιμοποιώντας δεδομένα από τα κλιματικά μοντέλα, και τις παρατηρούμενες τιμές για μία κοινή περίοδο, όπου οι οριακές συνθήκες στο κλιματικό μοντέλο, όπως για παράδειγμα οι συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι γνωστές. Όταν δημιουργηθεί η συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γίνει η διόρθωση μεροληψίας για τις μελλοντικές τιμές του μοντέλου, όπου δεν υπάρχουν δεδομένα παρατήρησης. Η συνάρτηση χρησιμοποιείται για να μετατρέψει κάθε τιμή του μοντέλου σε μία τροποποιημένη, χωρίς σφάλμα πόλωσης.

Σύμφωνα με τον Haerter et. al ,(2011), στην περίπτωση όπου οι τιμές ακολουθούν κανονική κατανομή, η συνάρτηση μεταφοράς είναι πάντα γραμμική και είναι της μορφής που παρουσιάζεται στην Εξίσωση 3.

$$\chi_{sc}^{cor} = (\chi_{mod}^{sc} - \overline{\chi_{mod}^{con}}) * \left(\frac{\sigma_{obs}^{con}}{\sigma_{mod}^{con}} \right) + \overline{\chi_{obs}^{con}}$$

Εξίσωση 3

όπου ο δείκτης mod (model) δηλώνει τιμές από το μοντέλο, ο δείκτης obs (observations) τις παρατηρούμενες τιμές, ο εκθέτης con (control) την περίοδο αναφοράς και ο εκθέτης sc (scenario), της περιόδου μελέτης

Η κλίση της συνάρτησης, $\left(\frac{\sigma_{obs}^{con}}{\sigma_{mod}^{con}} \right)$, είναι η αναλογία της τυπικής απόκλισης των παρατηρουμένων τιμών και των τιμών του μοντέλου για την κοινή περίοδο

ελέγχου. Αυτός ο παράγοντας προσαρμόζει την κατανομή των δεδομένων του μοντέλου ώστε να ταιριάζει με αυτή των παρατηρούμενων τιμών.

2.2 Εκτίμηση απόδοσης των Φ/Β συστημάτων υπό συνθήκες μεταβλητής θερμοκρασίας και ακτινοβολίας

Για τον υπολογισμό της απόδοσης των Φ/Β χρησιμοποιούνται εξισώσεις που λαμβάνουν υπόψη την ακτινοβολία και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Είναι σημαντικό να αποδοθεί η αλλαγή στην απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου συναρτήσει της αλλαγής της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας. Έτσι σύμφωνα με τους Crook et al., (2011), η αλλαγή αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 4.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{PV}}{\eta_{ref}} = & -\Delta T G_{tot} \beta c_2 \\ & + \Delta G_{tot} (1 - \beta c_1 + \beta T_{ref} - 2\beta c_3 - T\beta c_2) \\ & - \Delta G_{tot}^2 \beta c_3 - \Delta G_{tot} \Delta T \beta c_2 \\ & + \Delta G_{tot} \gamma \log_{10} (G_{tot} + \Delta G_{tot}) \\ & + G_{tot} \gamma \log_{10} \left(\frac{G_{tot} + \Delta G_{tot}}{G_{tot}} \right) \end{aligned}$$

Εξίσωση 4

όπου

ΔT είναι η διαφορά της θερμοκρασίας αναφοράς και περιόδου μελέτης,

ΔG είναι η διαφορά της ακτινοβολίας αναφοράς και περιόδου μελέτης,

G_{tot} είναι η ακτινοβολία ημέρας για την περίοδο αναφοράς,

T είναι θερμοκρασία ημέρας για την περίοδο αναφοράς

Οι μέσες μηνιαίες τιμές των μεταβλητών των κλιματικών μοντέλων που εξετάστηκαν, αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές όλου του 24ώρου. Για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός Φ/Β όμως, πρέπει να ληφθούν υπόψη μόνο η οι

τιμές των κλιματικών μεταβλητών κατά τη διάρκεια της ημέρας δηλαδή όταν τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν. Έτσι οι τιμές της θερμοκρασίας και ακτινοβολίας μετατράπηκαν σε μέσες μηνιαίες τιμές της μέσης θερμοκρασίας και ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μετατροπή έγινε με χρήση κάποιων υποθέσεων όπως περιγράφονται παρακάτω.

Η θερμοκρασία θεωρείται ότι κυμαίνεται ημιτονοειδώς κατά τη διάρκεια της μέρας με πλάτος $DTR/2$, όπου DTR είναι το ημερήσιο εύρος της θερμοκρασίας (διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας). Έτσι η θερμοκρασία ημέρας T_{day} μπορεί να προσεγγιστεί με την Εξίσωση 5. (Crook et al., 2011)

$$T_{day} = T + \frac{DTR}{4}$$

Εξίσωση 5

Η μέση ακτινοβολία ανάγεται στις ώρες που διαρκεί η μέρα, βάση της διάρκειας της με την Εξίσωση 6. (Crook et al., 2011)

$$G_{day} = G \frac{t_{24h}}{t_{daylength}}$$

Εξίσωση 6

Για τον υπολογισμό της διάρκειας της ημέρας πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετές γεωμετρικές παράμετροι, καθώς η αρχή και το τέλος κάθε ημέρας εξαρτάται από τη θέση της γης συναρτήσει της θέσης του ηλίου, την περιστροφή και την περιφορά της γης, καθώς και τη θέση της επίπεδης επιφάνειας στην οποία προσπίπτει το φως. Έτσι για την ακριβή εκτίμηση της διάρκειας της ημέρας χρησιμοποιούνται ο αριθμός της ημέρας του έτους, και το γεωγραφικό πλάτος του σημείου. Από αυτά τα χαρακτηριστικά υπολογίζεται η αντίστοιχη γωνία περιστροφής θ (Εξίσωση 7) από την ημέρα του έτους J , η γωνία απόκλισης του ηλίου φ (Εξίσωση 8) ή γωνιακή απόσταση κατά το ηλιακό μεσημέρι μεταξύ του ηλίου και του ισημερινού από την γωνία περιστροφής της γης, και τέλος προβλέπεται η διάρκεια της ημέρας D (Εξίσωση 9) συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους L , του γεωγραφικού μήκους, και της γωνίας απόκλισης του ηλίου (Forsythe et al., 1995).

$$\theta = 0,2163108 + 2 \tan^{-1}[0.9671396 \tan(0.00860(J - 186))]$$

Εξίσωση 7

$$\varphi = \sin^{-1}(0.39795 \cos \theta)$$

Εξίσωση 8

$$D = 24 - \left(\frac{24}{\pi}\right) \cos^{-1} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{0.833\pi}{180}\right) + \sin\left(\frac{L\pi}{180}\right) * \sin \varphi}{\cos\left(\frac{L\pi}{180}\right) * \cos \varphi} \right\}$$

Εξίσωση 9

οπου η γωνία περιστροφής (θ) και η γωνία απόκλισης (φ) του ηλίου δίδονται σε ακτίνια, ενώ το γεωγραφικό πλάτος (L) σε μοίρες.

Επιπλέον το γεωγραφικό πλάτος για το βόρειο ημισφαίριο είναι θετικό ενώ για το νότιο είναι αρνητικό .

Η γενική σχέση για τον υπολογισμό της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων είναι:

$$P_{PV} = G_{tot} \eta_{cell}$$

Εξίσωση 10

Ωστόσο η τιμή του η_{ref} δεν είναι σημαντική διότι για την αλλαγή στην απόδοση λαμβάνει υπ όψιν μόνο η κλασματική αλλαγή $\Delta P/P$

Έτσι συνδυάζοντας την Εξίσωση 1 και την Εξίσωση 10, προκύπτει ότι ο λόγος της απόδοσης προς την απόδοση αναφοράς

$$\frac{P_{PV}}{\eta_{ref}} = G_{tot} (1 - \beta(T_{cell} - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G_{tot})$$

Εξίσωση 11

Άρα η κλασματική αλλαγή $\Delta P/P$ προκύπτει από το λόγο της Εξίσωσης 4 και της Εξίσωσης 11.

2.3 Δημιουργία ηλιακών μοντέλων

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία τροποποιείται καθώς διέρχεται μέσω από την ατμόσφαιρα, και τροποποιείται περαιτέρω καθώς φτάνει στην επιφάνεια της γης λόγω της τοπογραφίας και των χαρακτηριστικών της επιφάνειας που προσπίπτει. Έτσι εμφανίζεται με τρεις μορφές, ως άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη. Η άμεση ακτινοβολία είναι αυτή που φτάνει στο έδαφος χωρίς σκέδαση μόνο με απορρόφηση (αναφέρεται συχνά ως *direct* ή *beam* ακτινοβολία), η διάχυτη είναι αυτή που φτάνει στην επιφάνεια της γης έπειτα από σκέδαση της από ατμοσφαιρικά συστατικά όπως η σκόνη ή τα σύννεφα και τέλος ανακλώμενη είναι αυτή όπου φτάνει σε ένα σημείο έπειτα από ανάκλαση σε κάποιο άλλο σημείο της επιφάνειας. Το άθροισμα των τριών αυτών παραμέτρων τις ακτινοβολίας συγκροτεί την ολική ή παγκόσμια ακτινοβολία.

Η άμεση ακτινοβολία αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας , με την διάχυτη να έπεται, ενώ η ανακλώμενη, εκτός από περιοχές που περιβάλλονται από πολύ ανακλαστικές επιφάνειες όπως χιόνι, συνεισφέρει σε μικρό ποσοστό στην ολική ακτινοβολία.

Ο υπολογισμός της κατανομής της ακτινοβολίας σε μία περιοχή μέσω του εργαλείων υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας (*Solar radiation tools*), περιλαμβάνει τέσσερα βήματα.

1. Υπολογισμός της ανοδικής ημισφαιρικής υπερευριγώνιας εικόνας πεδίου βάση της τοπογραφίας.
2. Επικάλυψη της εικόνας πεδίου από τον χάρτη κίνησης του ηλίου για τον υπολογισμό της άμεσης ακτινοβολίας
3. Επικάλυψη της εικόνας πεδίου από χάρτη ουρανού για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας
4. Επανάληψη της διαδικασίας για κάθε περιοχή μελέτης για την δημιουργία χάρτη κατανομής της ακτινοβολίας

- **Υπολογισμός της εικόνας πεδίου (viewshed)**

Επειδή η ακτινοβολία επηρεάζεται άμεσα από την μορφολογία του εδάφους και των επιφανειακών χαρακτηριστικών, βασικό σημείο του αλγορίθμου που υπολογίζει την κατανομή της, είναι η δημιουργία μίας ανοδική ημισφαιρικής υπερευριγώνιας εικόνας πεδίου για κάθε περιοχή του DEM. Οι υπερευριγώνιες εικόνες πεδίου είναι ίδιες με τις fisheye φωτογραφίες που δείχνουν τον ουρανό από το επίπεδο του εδάφους σε όλες τις κατευθύνσεις και παρέχουν μία προβολή του ορατού ουρανού και τις κατευθύνσεις του που εμποδίζονται από τα χαρακτηριστικά της επιφανείας και της τοπογραφίας. Το ποσοστό του ορατού ουρανού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ποσότητα της ακτινοβολίας σε ένα πεδίο.

Η εικόνα πεδίου είναι μία αναπαράσταση του ουρανού όπου είναι ορατός ή παρεμποδίζεται, όταν παρατηρείται από μια συγκεκριμένη θέση. Υπολογίζεται από τον καθορισμό σε έναν συγκεκριμένο αριθμό κατευθύνσεων γύρω από την τοποθεσία μελέτης, της μέγιστης γωνίας παρεμπόδισης του ουρανού ή γωνία ορίζοντα. Η γωνίες ορίζοντα για τις κατευθύνσεις όπου δεν έχουν καθοριστεί υπολογίζονται με παρεμβολή. Έπειτα μετατρέπονται σε ένα ημισφαιρικό σύστημα συντεταγμένων το οποίο παρουσιάζει τις τρισδιάστατες ημισφαιρικές κατευθύνσεις σε μία δισδιάστατη raster απεικόνιση. Οι θέσεις των κελιών (γραμμές και στήλες) αντιστοιχούν στο ζενίθ (γωνία σε σχέση με την κάθετη στην επιφάνεια) και το αζιμούθιο (γωνία σε σχέση με το Βορρά)

Η Εικόνα 2-1 απεικονίζει μία ανοδική ημισφαιρική φωτογραφία, η οποία δείχνει μία άποψη του ορατού ουρανού και των κατευθύνσεων όπου παρεμποδίζονται από την περιβάλλουσα τοπογραφία.

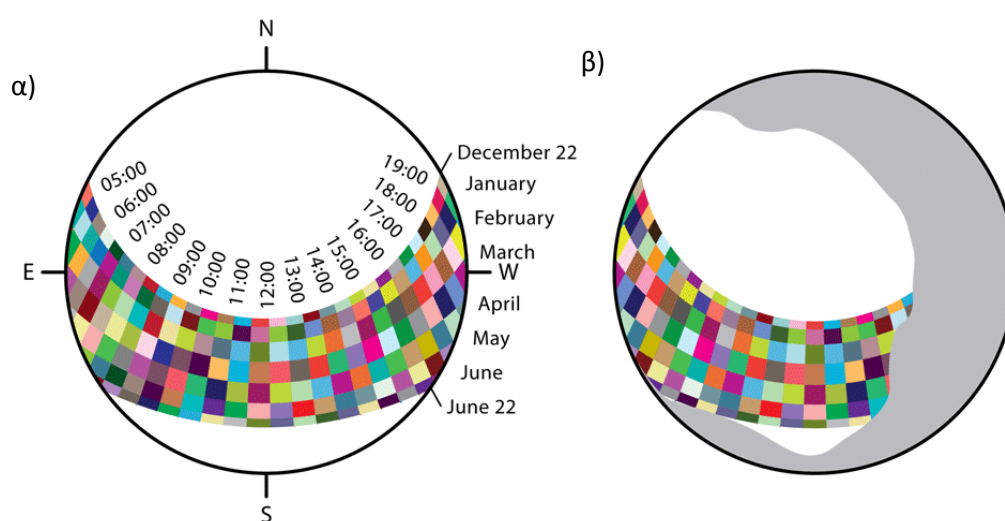


Εικόνα 2-1: Ημισφαιρική φωτογραφία εικόνας πεδίου (Shengli & Pinde 2009)

- Υπολογισμός της άμεσης ακτινοβολίας

Η άμεση ακτινοβολία για μία θέση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εικόνα πεδίου και ένα χάρτη κίνησης του ηλίου (sunmap) της περιοχής μελέτης. Ένας χάρτης κίνησης του ηλίου είναι μία raster αναπαράσταση που αποτελείται από διακριτούς τομείς που ορίζονται από τη θέση του ηλίου συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (ώρες) και εποχή του έτους (ημέρες ή μήνες). Κάθε τομέας έχει μία συγκεκριμένη τιμή, ανάλογα με την αζιμουθιακή και τη ζενίθεια γωνία. Η ηλιακή ακτινοβολία που προέρχεται από κάθε τομέα υπολογίζεται ξεχωριστά και το άθροισμα όλων των τομέων είναι η συνολική ακτινοβολία. Έπειτα ο χάρτης θέσης του ηλίου επικαλύπτεται από την εικόνα πεδίου για τον υπολογισμό της άμεσης ακτινοβολίας.

Στη Εικόνα 2-2α, παρουσιάζεται ένας χάρτης κίνησης του ηλίου για 45° Βόρειο γεωγραφικό πλάτος, υπολογισμένο από το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου) μέχρι το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου). Κάθε τομέας απεικονίζει τη θέση του ηλίου, χρησιμοποιώντας βήμα μισής ώρας για την κάθε μέρα, και μηνιαίο βήμα για κάθε έτος. Στην Εικόνα 2-2β φαίνεται η επικάλυψη από την εικόνα πεδίου, με τη γκρι περιοχή να αναπαριστά τις κατευθύνσεις του ουρανού όπου παρεμποδίζονται.

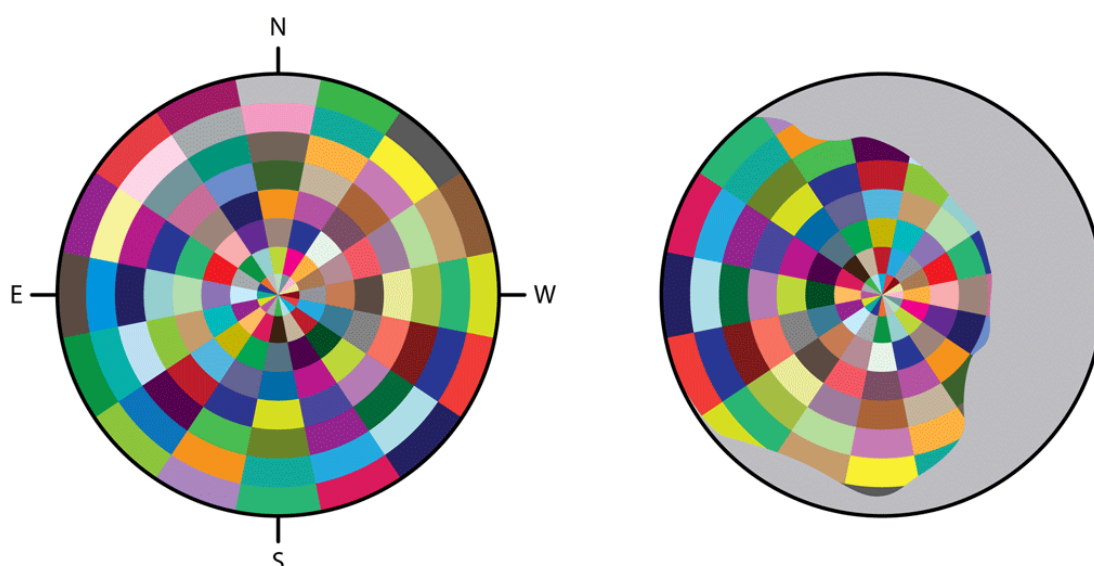


Εικόνα 2-2: α) Χάρτης κίνησης ηλίου β) Επικάλυψη χάρτη κίνησης ηλίου από την εικόνα πεδίου (Shengli & Pinde 2009)

- Υπολογισμός της διάχυτης ακτινοβολίας

Η διάχυτη ακτινοβολία για μία θέση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εικόνα πεδίου και ένα χάρτη ουρανού (skymap) της περιοχής μελέτης. Ο χάρτης του ουρανού αναπαριστά μία ημισφαιρική άποψη ολόκληρου του ουρανού, χωρισμένο σε μια σειρά από τομείς που ορίζονται από τις αζιμουθιακές και τις ζενίθειες γωνίες όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-3α. Κάθε τομέας έχει μια μοναδική αναγνωριστική τιμή σε συνδυασμό με το κεντροειδές ζενίθ και την αζιμουθιακή γωνία. Η διάχυτη ακτινοβολία υπολογίζεται για κάθε τομέα ανάλογα με την κατεύθυνση του. Το άθροισμα της ακτινοβολίας από κάθε τομέα αποτελεί την συνολική διάχυτη ακτινοβολία. Έπειτα ο χάρτης του ουρανού επικαλύπτεται από την εικόνα πεδίου για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας.

Η παρακάτω εικόνα είναι ένας χάρτης του ουρανού, όπου οι τομείς του ουρανού ορίζονται από 8 τμήματα ζενίθ και 16 αζιμουθιακά. Κάθε χρώμα αναπαριστά ένα μοναδικό τομέα του ουρανού ή ένα τμήμα του από όπου προέρχεται η διάχυτη ακτινοβολία. Στην Εικόνα 2-3β φαίνεται η επικάλυψη από την εικόνα πεδίου, με τη γκρι περιοχή να αναπαριστά τις κατευθύνσεις του ουρανού όπου παρεμποδίζονται.



Εικόνα 2-3: α) Χάρτης ουρανού β) Επικάλυψη χάρτη ουρανού από την εικόνα πεδίου (Shengli & Pinde 2009)

Η ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται αθροίζοντας την διάχυτη και την άμεση ακτινοβολία που προέρχεται από τα ανεμπόδιστα τμήματα του ουρανού.

Η αναλογία του ορατού ουρανού σε κάθε τομέα υπολογίζεται από το λόγο των κελιών που υπάρχει ανεμπόδιστη ορατότητα με τον συνολικό αριθμό των κελιών σε κάθε τομέα.

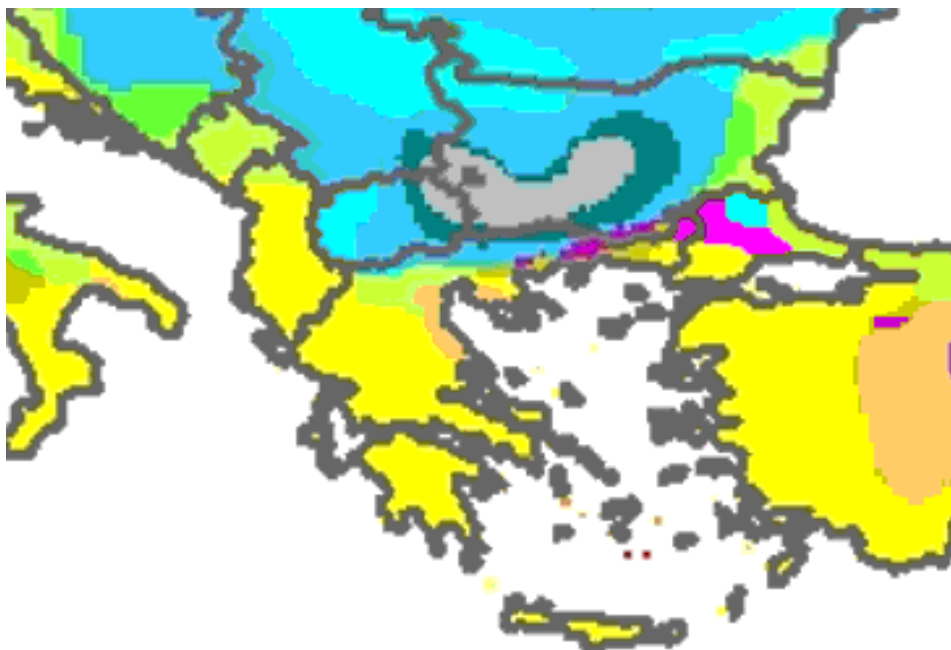
3 Περιοχή μελέτης

3.1 Ελλάδα

Η Ελλάδα βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Ευρώπης, και καταλαμβάνει το νότιο τμήμα των Βαλκανίων. Περιλαμβάνει το Ιόνιο πέλαγος, τις χερσαίες περιοχές της ελληνικής χερσονήσου και το Αιγαίο πέλαγος μέχρι την Κρήτη. Βρίσκεται ανάμεσα στα γεωγραφικά πλάτη 34^0 - 42^0 . Το σύνολο της περιοχής δεν έχει ομοιόμορφο κλίμα, αν και κυρίως παρουσιάζει χαρακτηριστικά του μεσογειακού κλίματος. Από βορρά προς νότο και από δυτικά προς ανατολικά, δεν υπάρχει μια ενιαία γεωγραφική μορφολογική και κλιματική ενότητα. Χωρίζεται σε τρία κυρίως τμήματα, το δυτικό, το ανατολικό και τα νησιά. Το πιο σημαντική τοπογραφικό χαρακτηριστικό όπου επηρεάζει το κλίμα της περιφέρειας είναι η οροσειρά της Πίνδου που βρίσκεται κατά μήκος της Ελληνικής χερσονήσου και εκτείνεται από τα βορειοδυτικά προς τις νοτιοδυτικές περιοχές παράλληλα με την ακτή. Η οροσειρά αυτή χωρίζει την Ελληνική χερσόνησο στο δυτικό και ανατολικό κλιματικό τμήμα. Στις ελληνικές θάλασσες υπάρχουν διάσπαρτα πολυάριθμα νησιά τα οποία περιπλέκουν περαιτέρω την τοπογραφία της περιοχής, και αποτελούν από μόνα τους ένα κλιματικό τμήμα της χώρας, που αποτελείται από τα νησιά και τις παράκτιες περιοχές του αιγαίου και της Κρήτης. Το κλίμα στις περιοχές αυτές είναι εύκρατο λόγω της θάλασσας.

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, η ελληνική περιφέρεια, περιλαμβάνει υπό-περιοχές με διαφορετικά φυσικογεωγραφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά. Η περιοχή σύμφωνα με την κλιματική ταξινόμηση του Köppen (Peel et al. 2007), ανήκει επί το πλείστον στην τρίτη κύρια κατηγορία όπου είναι τα εύκρατα κλίματα και κυρίως στο μεσογειακό κλιματικό τύπο Csa όπου χαρακτηρίζεται από υγρούς ήπιους χειμώνες με μεγάλο, θερμό και ξηρό καλοκαίρι, ενώ υπάρχουν και περιοχές των γειτονικών τύπων ξηρό υποτροπικό Csb, υγρό υποτροπικό Cfa και εύκρατο θαλάσσιο Cfb, καθώς και κάποιες περιοχές που ανήκουν στην τέταρτη κατηγορία όπου κατατάσσονται τα ευρωπαϊκά κλίματα με υγρούς και ψυχρούς χειμώνες και συγκεκριμένα στις υποκατηγορίες Dsb όπου χαρακτηρίζεται από

ξηρό μεγάλο δροσερό καλοκαίρι και Dfb που χαρακτηρίζονται ως υγρού μεγάλου και δροσερού καλοκαιριού.



Af	BWh	Csa	Cwa	Cfa	Dsa	Dwa	Dfa	ET
Am	BWk	Csb	Cwb	Cfb	Dsb	Dwb	Dfb	EF
Aw	BSh		Cwc	Cfc	Dsc	Dwc	Dfc	
	BSk				Dsd	Dwd	Dfd	

Εικόνα 3-1: Κλιματική ταξινόμηση Ελλάδος κατά Köppen (Peel et al. 2007)

3.2 Επιλογή δεδομένων

Για την παρατηρούμενη θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές από τη βάση δεδομένων **E-OBS** η οποία διαθέτει ημερήσια δεδομένα για την μέγιστη, ελάχιστη και μέση θερμοκρασία στο διάστημα 1950-2006 (Haylock et al. 2008). Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων δημιουργήθηκε ως μέρος του προγράμματος ENSEMBLES EU FP6 της Ευρωπαϊκής ένωσης με σκοπό τη χρήση της για την μελέτη της κλιματικής αλλαγής και της αξιολόγησης των RCMs.

Όσον αφορά τα δεδομένα της ακτινοβολίας τόσο οι τιμές των RCMs όσο και οι παρατηρούμενες αποτελούν την μικρού κύματος προς τα κάτω ακτινοβολία στην

επιφάνεια της γης (Down-welling Surface Short-wave Radiation Flux). Οι μετρήσεις για την ακτινοβολία προέρχονται από την βάση δεδομένων **SODA** (HelioClim-1, Βάση δεδομένων για ημερήσια ακτινοβολία v4.0 που προέρχεται από τα δορυφορικά δεδομένα - MINES ParisTech - Armines – France) όπου υπάρχουν διαθέσιμες τιμές από το 1985 μέχρι το 2005 σε οριζόντια ανάλυση 20km. Η HelioClim βάση δεδομένων χρησιμοποιεί την Heliosat-2 μέθοδο για την επεξεργασία των εικόνων Meteosat (Rigollier et al., 2004). Η μέθοδος αυτή μετατρέπει τις εικόνες που προέρχονται από γεωστατικούς μετεωρολογικούς σταθμούς όπως οι Meteosat (Ευρώπη), GOES (ΗΠΑ) και GMS (Ιαπωνία), σε δεδομένα και χάρτες της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια της γης. Η Mines ParisTech δημιούργησε την μέθοδο Heliosat-2 το Νοέμβριο του 2002 με την μερική υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, (πρόγραμμα SoDa contract DG "INFOS" IST-1999-12245).

Για την παρούσα εργασία θεωρήσαμε δύο περιόδους μελέτης 40 ετών η κάθε μία. Η πρώτη ξεκινάει από τον Ιανουάριο 2011 έως το Δεκέμβριο του 2050, ενώ η δεύτερη είναι από τον Ιανουάριο 2061 έως το Δεκέμβριο 2100.

3.3 Κλιματικά πρότυπα προσομοίωσης

Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζονται πληροφορίες για τα RCMs του προγράμματος ENSEMBLES που επελέγησαν στην παρούσα μελέτη με αρχικές και οριακές συνθήκες που προέρχονται από παγκόσμια κλιματικά μοντέλα, προκειμένου να παραχθεί μια σειρά αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μελλοντικού κλίματος, ειδικά προσαρμοσμένων στον ελλαδικό χώρο. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος έγινε υπό το σενάριο A1B.

Πιο συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από εννιά διαφορετικά περιοχικά κλιματικά μοντέλα, τα οποία έχουν αναπτυχθεί σε διάφορα ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια, με διακριτική ικανότητα 25 χιλιομέτρων περίπου.

Πίνακας 3-1: Γενικές πληροφορίες των RCMs που χρησιμοποιήθηκαν

Ακρωνύμιο του RCM	Μοντέλο	Ινστιτούτο Ανάπτυξης του RCM	GCM από όπου προέρχεται το RCM	Κατακόρυφα Επίπεδα	Βασική Βιβλιογραφική Αναφορά
C4IRCA3	RCA3	SMHI, Sweden	HadCM3Q16	31	Kjellström et al., 2005
DMI-HIRHAM5	HIRHAM5	DMI, Denmark	APREGGE	23	Christensen et al., 1998
ETHZ-CLM	CLM	ETHZ, Switzerland	HadCM3Q0	32	Böhm et al., 2006
MPI-M-REMO	REMO	MPI, Germany	ECHAM5-r3	27	Jacob et al., 2001
SMHIRCA	RCA	SMHI, Sweden	BCM	24	Kjellström et al., 2005
UCLM-PROMES	PROMES	UCLM, Spain	HadCM3Q0	28	Castro et al., 1993
CNRM-RM5.1	CNRM-RM5.1	CNRM, France	APREGGE_RM 5.1	31	Radu et al., 2008,.
OURANOSMRCC4.2.1	CRCM	CCCma, Canada	CGCM3	29	Plummer et.al 2006
METNOHIRHAM	HIRHAM	DMI, Denmark	HadCM3Q0	31	Christensen et.al 1996

Το κάθε μοντέλο περιλαμβάνει δεδομένα μέχρι συγκεκριμένες χρονολογίες στο μέλλον. Συγκεκριμένα τα **C4IRCA3**, **CNRM-RM5.1**, **ETHZ-CLM**, **MPI-M-REMO** και **SMHIRCA** χρησιμοποιούνται και για την πρώτη περίοδο μελέτης (Ιαν.2011-Δεκ.2050)και για την δεύτερη (Ιαν.2061-Δεκ2099). Τα RCMs **UCLM-PROMES**, **OURANOSMRCC4.2.1**, **METNOHIRHAM** του ENSEMBLES εμπεριέχουν δεδομένα μέχρι το έτος 2050, συνεπώς χρησιμοποιούνται μόνο για την πρώτη περίοδο μελέτης .Επιπλέον το μοντέλο **DMI-HIRHAM5** αν και περιλαμβάνει δεδομένα μέχρι το έτος 2100, παρατηρήθηκε ότι παρουσιάζει σφάλμα από το 2051 και έπειτα στην περίπτωση της Ελλάδας οπότε χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του μόνο μέχρι το Δεκέμβρη του 2050.

3.4 Διόρθωση σφάλματος μεροληψίας

Η διαδικασία διόρθωσης σφαλμάτων μεροληψίας εφαρμόστηκε ανά μήνα σε όλα τα δεδομένα, με περίοδο αναφοράς από Ιανουάριο του 1961 έως Δεκέμβριο του 2000 για τα δεδομένα της θερμοκρασίας (μέσης, ελάχιστης και μέγιστης) και από Ιανουάριο του 1985 ως Δεκέμβριο του 2005 για την ακτινοβολία, καθώς παρατηρήθηκε ότι με την ανά μήνα επεξεργασία τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή οπότε μπορεί να εφαρμοστεί η διόρθωση μεροληψίας σύμφωνα με τους Haerter et al. (2011). Υπολογίζεται για κάθε μήνα (π.χ. για κάθε Ιανουάριο) της περιόδου αναφοράς η μέση τιμή, και η τυπική απόκλιση των τιμών και σύμφωνα με αυτές γίνεται η διόρθωση μεροληψίας των αντιστοίχων μηνών της περιόδου μελέτης σύμφωνα με την Εξίσωση 3.

3.5 Εφαρμογή εκτίμησης απόδοσης των Φ/Β συστημάτων υπό συνθήκες μεταβλητής θερμοκρασίας και ακτινοβολίας

Στην παρούσα μελέτη οι υπολογισμοί έγιναν για φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλικού πυριτικού τύπου.

Για ένα τυπικό μονοκρυσταλικό πλαίσιο πυριτίου σε θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$, ο συντελεστής θερμότητας β ισούται με 0.0045 και ο συντελεστής ηλιακής ακτινοβολίας γ ισούται με 0.1. (Crook et al., 2011)

Για ένα τυπικό μονοκρυσταλικό πλαίσιο πυριτίου σύμφωνα με τους (Ang, 1990) οι συντελεστές που επηρεάζουν τον τρόπο μεταφοράς της θερμότητας στο πλαίσιο είναι:

$$\begin{aligned}c_1 &= -3.75^{\circ}\text{C}, \\c_2 &= 1.14 \\c_3 &= 0.0175^{\circ}\text{C m}^2\text{W}^{-1}\end{aligned}$$

Όσον αφορά την προσαρμογή της ακτινοβολίας στις ώρες τις μέρας, για κάθε γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μελέτης δηλαδή από 32.75° έως 42.75° με βήμα

0.25^0 , υπολογίστηκε η μέση μηνιαία διάρκεια της μέρας , σύμφωνα με την Εξίσωση 9 και έπειτα έγινε η κλιμάκωση της μέσης μηνιαίας ακτινοβολίας των μοντέλων όπου δίδεται σε 24ώρη βάση σύμφωνα με την αντίστοιχη διάρκεια της μέρας σύμφωνα με τη Εξίσωση 5.

Η αλλαγή της απόδοσης του Φ/Β συστήματος της παρούσας μελέτης εξετάστηκε για 2 μελλοντικές περιόδους μελέτης όπως προαναφέρθηκε και υπολογίστηκε η ποσοστιαία αλλαγή για τα 40 χρόνια της κάθε περιόδου, καθώς και η μέση ετήσια αλλαγή για κάθε RCM ξεχωριστά και η δημιουργία χρονοσειρών για κάθε γεωγραφική περιφέρεια της Ελλάδας, σύμφωνα με την Εξίσωση 4, ενώ υπολογίστηκε και η μέση ποσοστιαία αλλαγή στην απόδοση του Φ/Β συστήματος για τις δύο περιόδους ως μέση τιμή όλων των μοντέλων.

3.6 Συνεισφορά θερμοκρασίας και ακτινοβολίας

Είναι σημαντικό να υπολογιστεί η σχετική συνεισφορά της αλλαγής της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην αλλαγή απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Crook et al., 2011). Ο υπολογισμός γίνεται εφαρμόζοντας την Εξίσωση 4 θεωρώντας είτε την θερμοκρασία ($\Delta T=0$) είτε την ακτινοβολία ($\Delta G=0$) σταθερή και ίδια με αυτή της περιόδου αναφοράς, για τον υπολογισμό της συνεισφοράς της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας αντίστοιχα για κάθε περίοδο μελέτης.

3.7 Συνεισφορά της τοπογραφίας στην απόδοση ενός PV συστήματος

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να γίνει χωρική ανάλυση της ακτινοβολίας με το Area Solar radiation tool του ArcGIS, το οποίο δημιουργεί χάρτες κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας σε Wh/m^2 για μία ολόκληρη γεωγραφική περιοχή μελέτης σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους.

Το Area Solar radiation tool του ArcGIS μπορεί να συνυπολογίζει τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις, το γεωγραφικό πλάτος, το επίπεδο την κλίση και κατεύθυνση της επιφάνειας, τις ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις στην θέση

του ηλίου και τέλος την σκίαση που δημιουργείται από την εκάστοτε τοπογραφία. Ωστόσο δεν συνυπολογίζει την ανακλώμενη ακτινοβολία στον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας.

Για τον υπολογισμό της επίδρασης της τοπογραφίας δημιουργήθηκαν χάρτες προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μηνιαίο βήμα της γεωγραφικής περιφέρειας της περιοχής μελέτης αρχικά λαμβάνοντας υπόψη την τοπογραφία χρησιμοποιώντας το DEM της περιοχής ενώ δημιουργήθηκαν και αναπαραστάσεις θεωρώντας επίπεδη την γεωγραφική επικράτεια έτσι ώστε να υπολογιστεί ο λόγος της ολικής ακτινοβολίας η οποία φτάνει στην επιφάνεια της γης λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη συνεισφορά της τοπογραφίας της περιοχής απαλλαγμένη από τους υπολοίπους παράγοντες.

Για τον πιο ακριβή υπολογισμό της κατανομής της ακτινοβολίας, η επεξεργασία έγινε σε ζώνες ανά μία μοίρα γεωγραφικού πλάτους, για όλη την περιοχή μελέτης λόγω του ότι το Solar radiation tool απαιτεί τέτοια διακριτοποίηση στην μοντελοποίηση μεγάλων περιοχών αφού τα αποτελέσματα διαφέρουν αρκετά σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη.

Η παράμετρος του μεγέθους του ουρανού (sky size), όπου είναι ουσιαστικά η ανάλυση της εικόνας πεδίου, του χάρτη κίνησης του ηλίου και του χάρτη του ουρανού, ορίστηκε στα 200 κελιά, με αποτέλεσμα η παραγόμενη εικόνα να έχει διαστάσεις 200x200κελιά.

Όσον αφορά τις παραμέτρους της τοπογραφίας τα δεδομένα για το επίπεδο την κλίση και κατεύθυνση της επιφάνειας λαμβάνονταν από το αντίστοιχο DEM, ενώ ο υπολογισμός της εικόνας πεδίου έγινε για 16 αζιμουθιακές κατευθύνσεις.

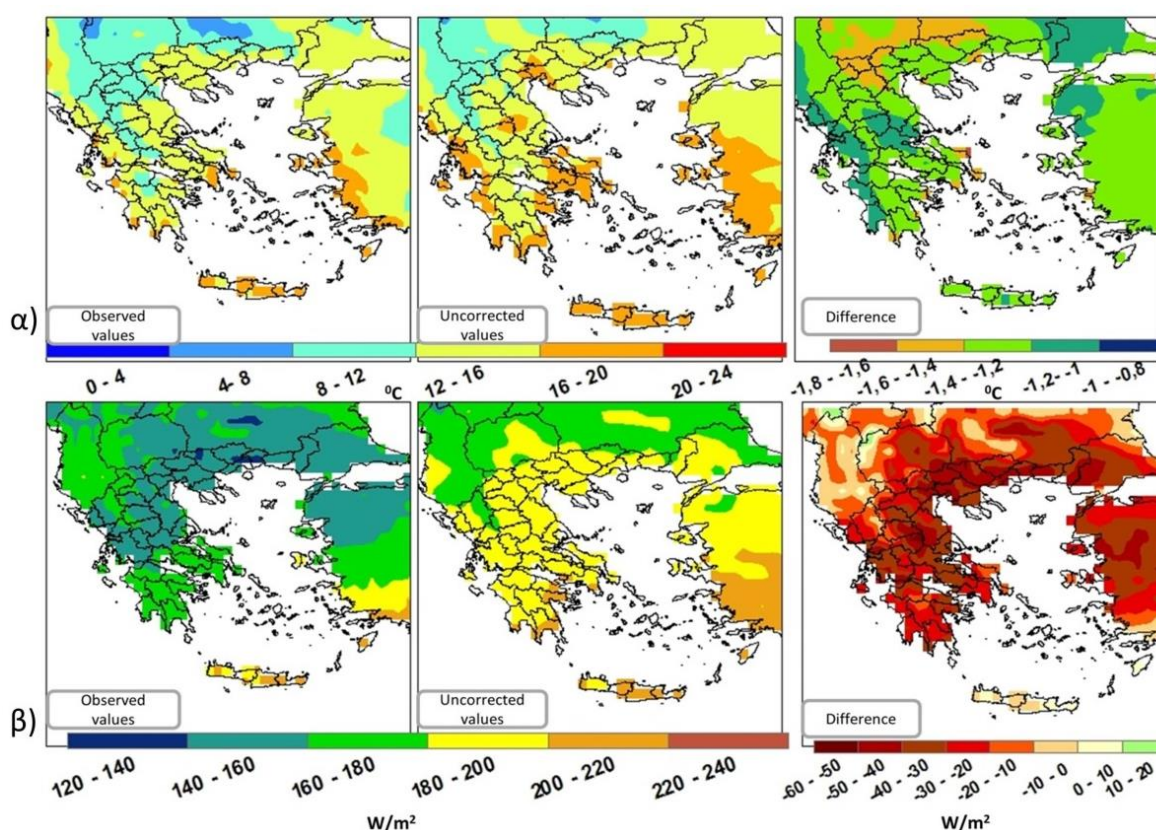
Όσον αφορά τις παραμέτρους της ακτινοβολίας, θεωρήθηκε ότι το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας επί της ολικής ακτινοβολίας είναι 0,3 όπου είναι η προτεινόμενη τιμή του εργαλείου για γενικά καθαρές συνθήκες στην ατμόσφαιρα. Ο λόγος της ενέργειας που λαμβάνεται στο πάνω άκρο της ατμόσφαιρας με αυτή που φτάνει τελικά στην επιφάνεια της γης (transmittivity) θεωρήθηκε ίσος με 1, θέλοντας να υπολογίσουμε την μέγιστη δυνατή ακτινοβολία που μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια της γης. Τέλος το μοντέλο της διάχυτης ακτινοβολίας όπου

επιλέχθηκε θεωρεί ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις (Uniform sky).

4 Αποτελέσματα

4.1 Αρχικές τιμές κλιματικών παραμέτρων

Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες τιμές και οι χωρίς διόρθωση σφάλματος μεροληψίας τιμές του μέσου όρου όλων των μοντέλων ως μέση τιμή για την περίοδο αναφοράς (1950-2000 για την μέση θερμοκρασία, 1985-2005 για τα δεδομένα της ακτινοβολίας), καθώς και η διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των αρχικών τιμών.



Εικόνα 4-1: α) Παρατηρούμενες, αρχικές τιμές κλιματικών παραμέτρων χωρίς διόρθωση σφάλματος μεροληψίας και διαφορά μεταξύ παρατηρούμενων και αρχικών τιμών μέσης θερμοκρασίας όλων των μοντέλων. β) Παρατηρούμενες, αρχικές τιμές χωρίς διόρθωση σφάλματος μεροληψίας και διαφορά μεταξύ παρατηρούμενων και αρχικών τιμών ακτινοβολίας όλων των μοντέλων.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1 παρατηρείται διαφορά ανάμεσα στις μετρημένες παρατηρούμενες τιμές τόσο της ακτινοβολίας όσο και της μέσης θερμοκρασίας σε σχέση με αυτές των RCMs, κάτι που αποδεικνύει την επιτακτική ανάγκη για

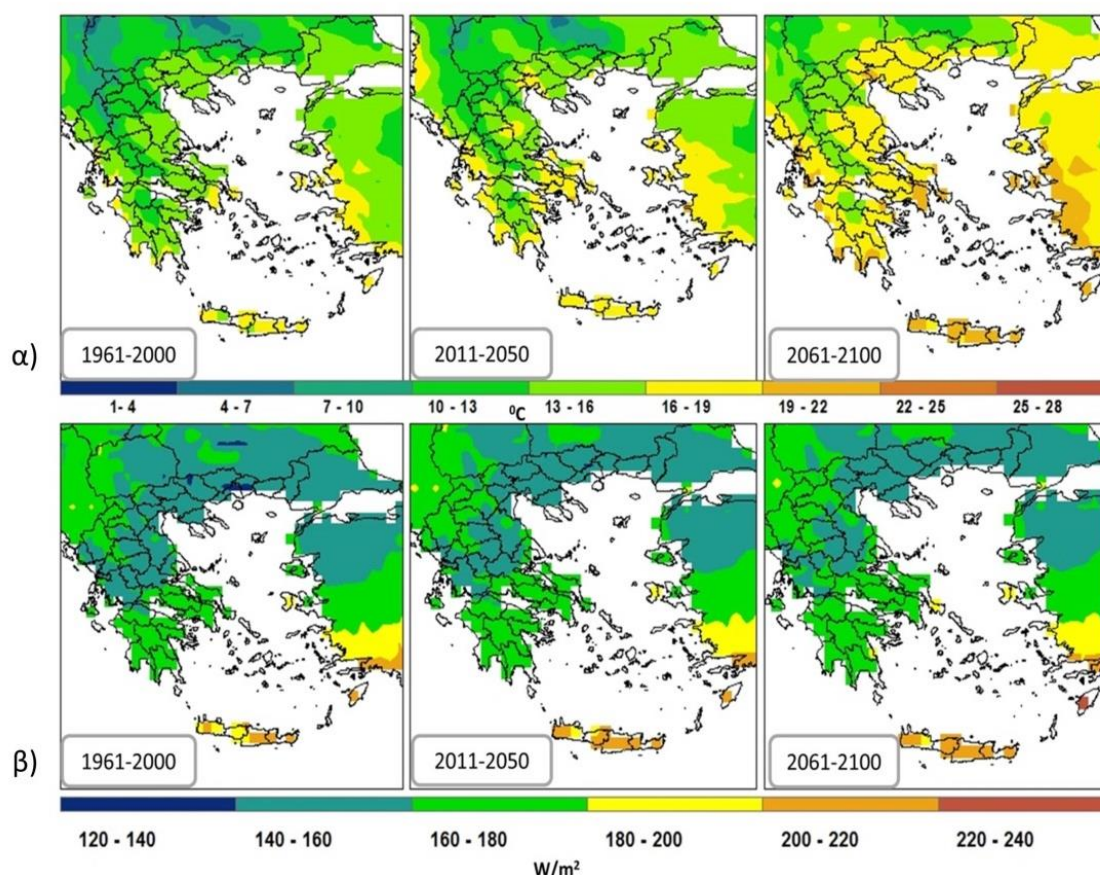
διόρθωση των τιμών των μοντέλων και προσαρμογή τους βάση των παρατηρούμενων. Παρατηρείται ότι τα RCMs υπερεκτιμούν την μέση θερμοκρασία, κατά περίπου 1-1.4 °C στο μεγαλύτερο ποσοστό της Ελλάδας ενώ υπάρχουν και περιοχές όπου η διαφορά φτάνει και τους 1.8°C κάτι που συμπίεραν και οι Boberg & Christensen, (2012).

Όσον αφορά την ακτινοβολία επίσης παρατηρείται ότι τα μοντέλα υπερεκτιμούν τις τιμές της σε σχεδόν όλη την περιοχή της Ελλάδας με διαφορές της τάξης των δεκάδων W/m².

Η διαφορά είναι το σφάλμα μεροληψίας που διορθώνεται μέσω της διαδικασίας διόρθωσης του σφάλματος μεροληψίας που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.1. (Boberg & Christensen,2012).

4.2 Διακύμανση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ανά περίοδο

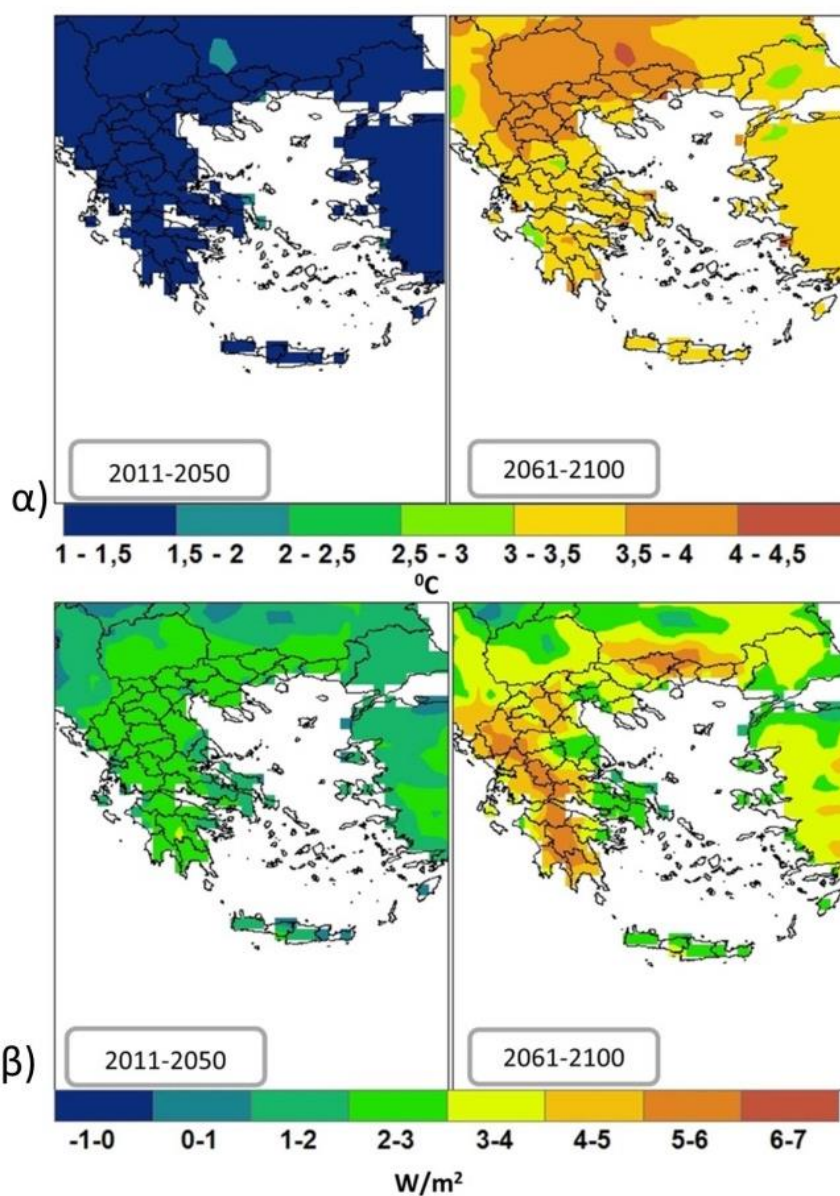
Στις κλιματικές προβολές των RCMs παρατηρείται σταδιακή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας τόσο στην ηπειρωτική χώρα αλλά και στα νησιά με μεγαλύτερη αύξηση στην ανατολική πλευρά της ηπειρωτικής Ελλάδας την Κρήτη και τα νησιά του Αιγαίου όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4-2: α) Απόλυτες τιμές μέσης θερμοκρασίας όλων των μοντέλων για κάθε περίοδο μελέτης. β) απόλυτες τιμές ακτινοβολίας όλων των μοντέλων

Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζονται οι απόλυτες, διορθωμένες ως προς το σφάλμα μερολήψιας, τιμές της ακτινοβολίας και της μέσης θερμοκρασίας την περίοδο 1961-2000 και τις δύο περιόδους μελέτης.

Οι αλλαγές στην ακτινοβολία είναι αρκετά μικρές όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-3 με αποτέλεσμα να μην είναι εμφανείς στην Εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-3: Απόλυτες αλλαγές ανά περίοδο μελέτης όλων των μοντέλων α) μέσης θερμοκρασίας β) ακτινοβολίας

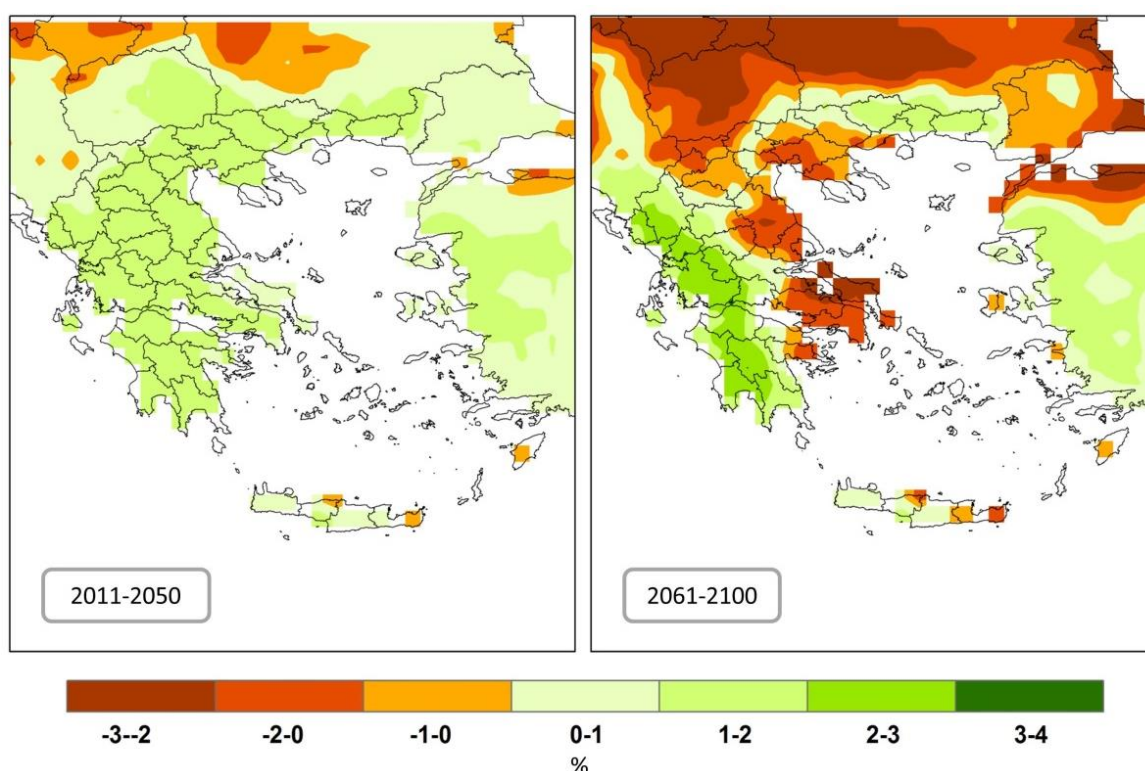
Παρατηρείται ότι την πρώτη περίοδο μελέτης υπάρχει αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στην Ελλάδα μεταξύ 1-1.5 $^{\circ}\text{C}$, ενώ μέχρι το 2100 προβλέπεται αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά περίπου 3-3.5 $^{\circ}\text{C}$ στο μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής μελέτης.

Η μέση ακτινοβολία αυξάνεται την πρώτη περίοδο μελέτης κατά περίπου 2-3 W/m^2 ενώ την δεύτερη περίοδο μελέτης και μέχρι το 2100 παρατηρείται μία επιπλέον αύξηση σε σχέση με την περίοδο αναφοράς κατά 2-5 W/m^2 στο μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής μελέτης. Η μεγαλύτερη αύξηση ολικής ακτινοβολίας

παρουσιάζεται στην περιοχή της κεντρικής Πελοποννήσου και της δυτικής Ελλάδας στην περιοχή της Ηπείρου και της δυτικής Μακεδονίας.

4.3 Διακύμανση απόδοσης Φ/Β συστημάτων

Στην Εικόνα 4-4 παρουσιάζεται η μεταβολή στην απόδοση των Φ/Β συστημάτων στην περιοχή μελέτης για τις δύο περιόδους μελέτης.



Εικόνα 4-4: Μεταβολή απόδοσης Φ/Β συστημάτων

Παρατηρείται ότι μέχρι το 2050 θα υπάρξει μία μέση αύξηση της απόδοσης μεταξύ 1-2% στο σύνολο της περιοχής μελέτης εκτός από κάποιες περιοχές της Κρήτης και την Ρόδο όπου παρουσιάζεται μείωση μέχρι και 1%. Την δεύτερη περίοδο μελέτης παρατηρείται ότι στην δυτική ηπειρωτική Ελλάδα στις περιοχές της Ηπείρου της Πελοποννήσου θα υπάρξει περαιτέρω αύξηση της τάξης 2-3% σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, στην Θράκη και την Κρήτη θα υπάρξει μια αύξηση μέχρι 2% ενώ στην ανατολική ηπειρωτική χώρα την κεντρική Μακεδονία

και μεμονωμένες περιοχές της Κρήτης τα Φ/Β συστήματα παρουσιάζουν μείωση στην παραγωγικότητα τους περίπου 2%. Η μεγαλύτερη μείωση στην απόδοση παρουσιάζεται στην περιοχή της Αττικής και στην νήσο Εύβοια όπου φτάνει μέχρι και 3%.

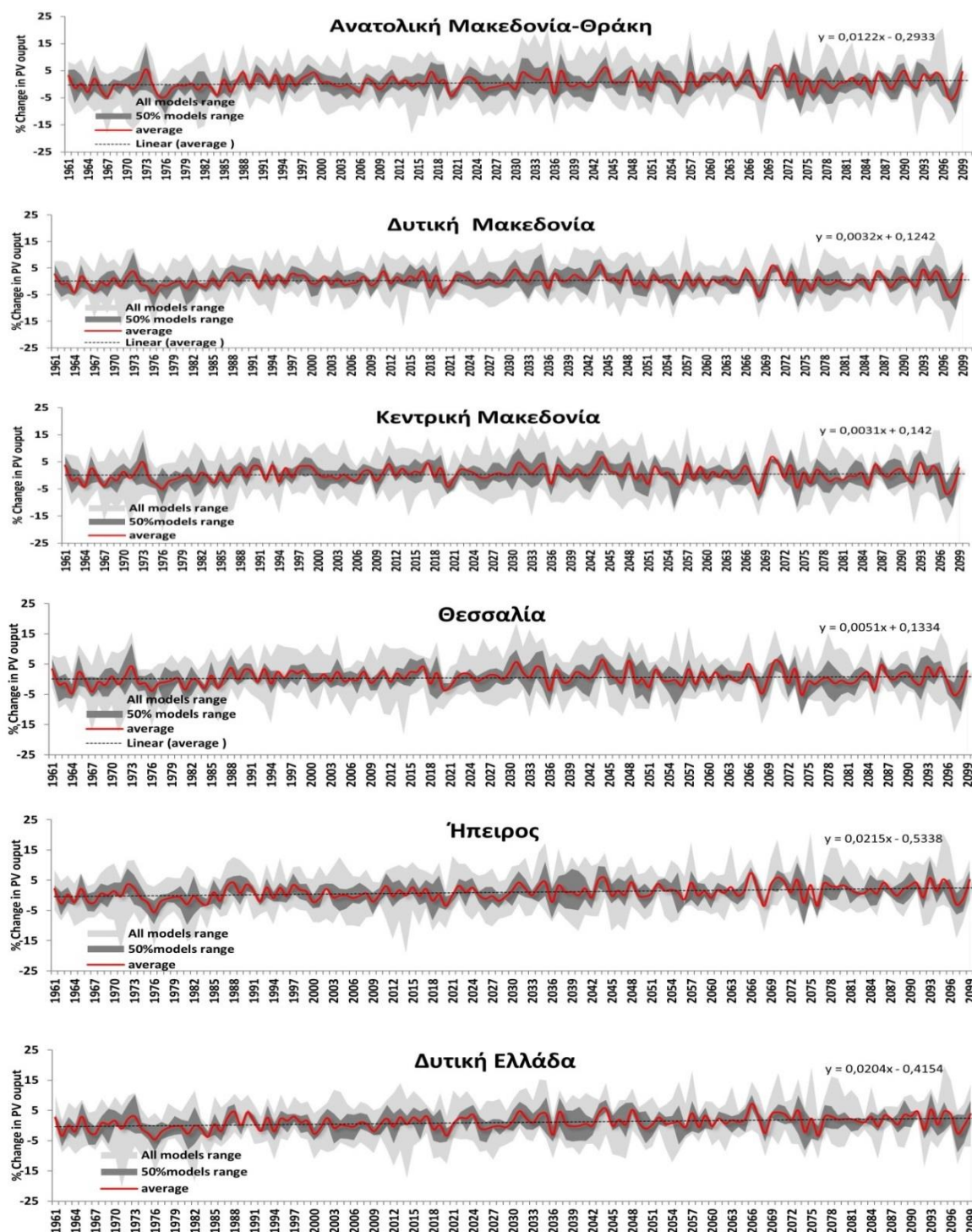
4.4 Χρονική εξέλιξη απόδοσης Φ/Β συστημάτων ανά γεωγραφική περιφέρεια

Η Ελλάδα χωρίζεται σε 13 διοικητικές περιφέρειες όπως φαίνονται στην Εικόνα 4-5. Η χρονική ανάλυση της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων έγινε ξεχωριστά ανά περιφέρεια.

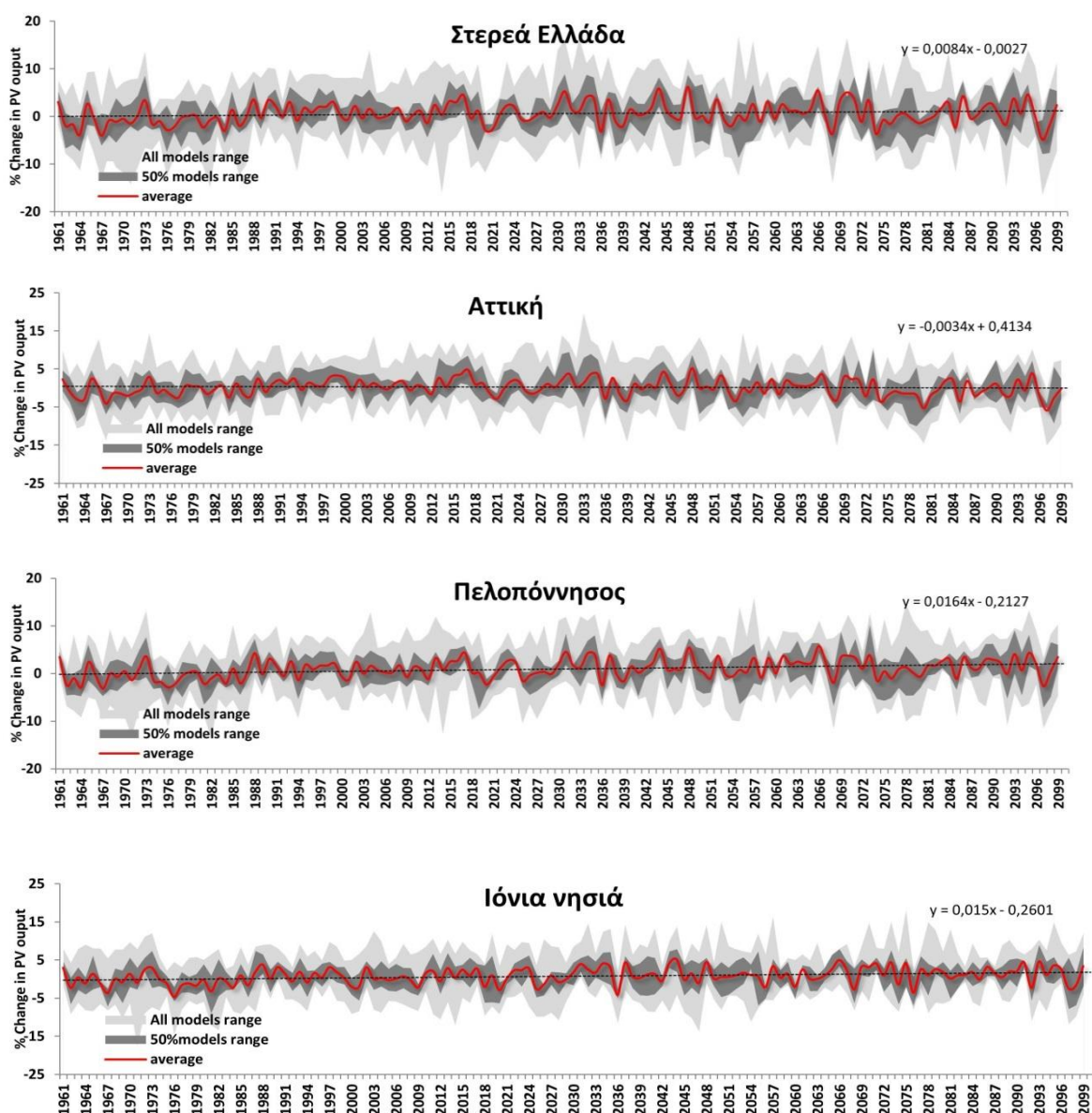


Εικόνα 4-5: Διοικητικές περιφέρειες Ελλάδας

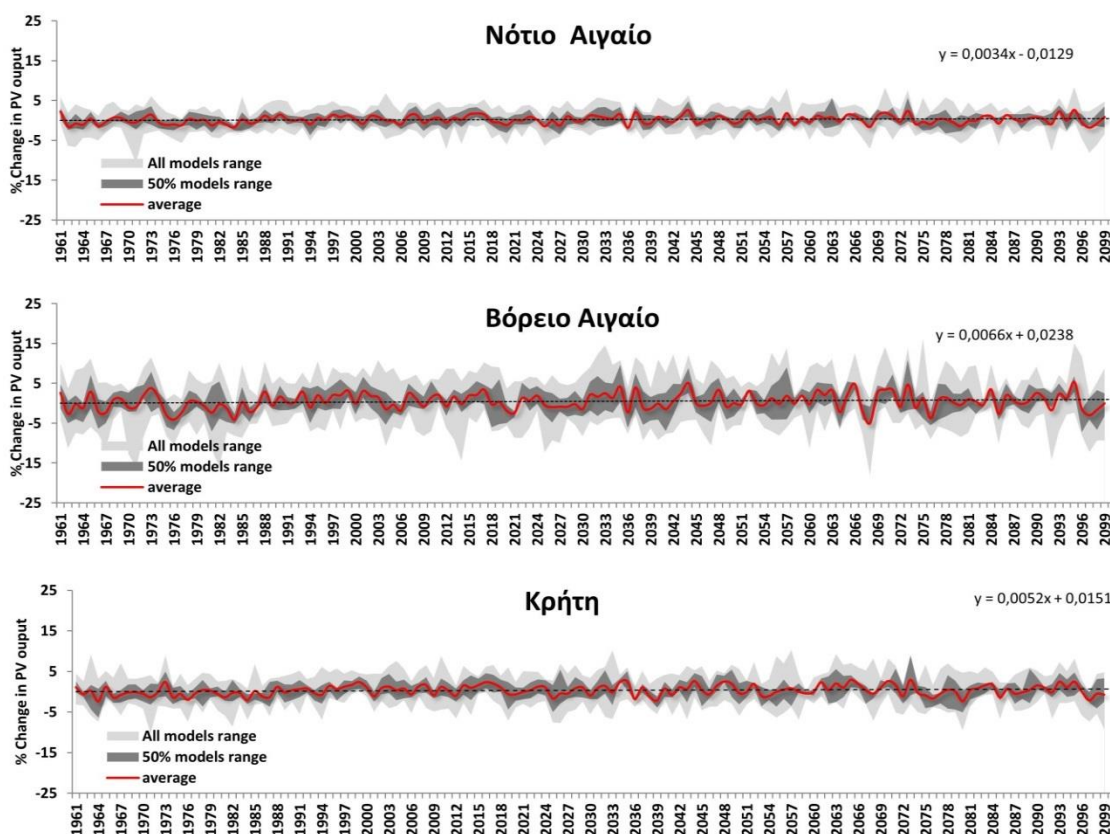
Στις Εικόνες 4-6, 4-7, 4-8 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων ανά γεωγραφική περιφέρεια της Ελλάδος όλων των μοντέλων.



Εικόνα 4-6: Χρονοσειρές απόδοσης Φ/Β συστημάτων για τις γεωγραφικές περιφέρειες της Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας, Θεσσαλίας Ηπείρου και Δυτικής Ελλάδας. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τιμών, με γκρι σκούρο παρουσιάζεται το εύρος των 50% των τιμών που εμφανίζονται σε όλα τα μοντέλα, ενώ τέλος με γκρι ανοιχτό εμφανίζεται το 100% εύρος των τιμών που αποδίδουν όλα τα μοντέλα



Εικόνα 4-7: Χρονοσειρές απόδοσης Φ/Β συστημάτων για τις γεωγραφικές περιφέρειες Στερεάς Ελλάδος Αττικής Πελοποννήσου και Ιονίων νησιών. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τιμών, με γκρι σκούρο παρουσιάζεται το εύρος των 50% των τιμών που εμφανίζονται σε όλα τα μοντέλα, ενώ τέλος με γκρι ανοιχτό εμφανίζεται το 100% εύρος των τιμών που αποδίδουν όλα τα μοντέλα



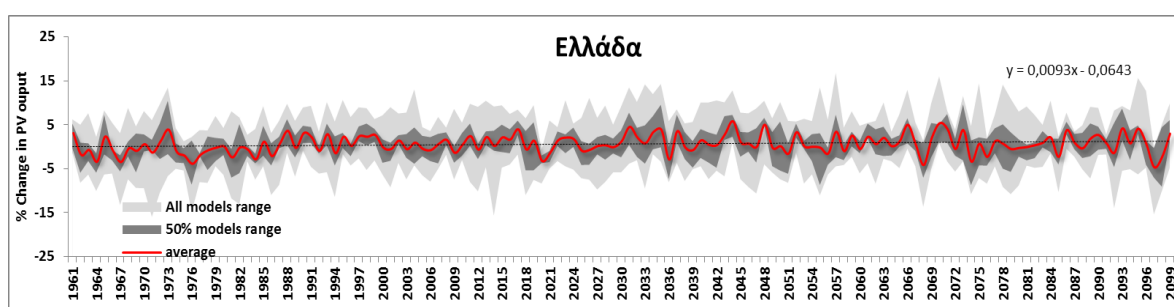
Εικόνα 4-8: Χρονοσειρές απόδοσης Φ/Β συστημάτων για τις γεωγραφικές περιφέρειες Νοτίου Αιγαίου, Βορείου Αιγαίου και Κρήτης. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τιμών, με γκρι σκούρο παρουσιάζεται το εύρος των 50% των τιμών που εμφανίζονται σε όλα τα μοντέλα, ενώ τέλος με γκρι ανοιχτό εμφανίζεται το 100% εύρος των τιμών που αποδίδουν όλα τα μοντέλα

Παρατηρείται ότι σε όλες τις γεωγραφικές περιφέρειες της χώρα πλην της περιφέρειας Αττικής παρουσιάζεται μια μικρή συνολική αύξηση στην απόδοση των Φ/Β συστημάτων στα επόμενα 100 χρόνια (και τις 2 περιόδους μελέτης), από 0.3% μέχρι και 2% στην περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας. Στην περιφέρεια Αττικής παρατηρείται μείωση της απόδοσης της τάξης του 0.3% που όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4-4 οφείλεται κυρίως στην μεγάλη μείωση που παρατηρείται την δεύτερη περίοδο μελέτης.

Σημαντικό είναι να παρατηρηθεί ότι το εύρος των τιμών όλων των μοντέλων είναι αρκετά μεγάλο και κυμαίνεται μεταξύ $\pm 15\%$ περίπου κάτι που δείχνει την αβεβαιότητα στις αλλαγές των κλιματικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία (Crook et al., 2011) που προέρχονται από τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα.

Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι στις νησιωτικές περιφέρειες πλην της Κρήτης δεν υπάρχουν αρκετά εικονοστοιχεία (pixels) με αποτέλεσμα να έχουμε ένα μικρότερο εύρος τιμών συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές της χώρας και τα αποτελέσματα να μην θεωρούνται τόσο αξιόπιστα για τα νησιά τα οποία δεν εμπεριέχονται σε κάποιο pixel.

Στην Εικόνα 4-9 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων συνολικά για όλη την Ελλάδα ως μέση τιμή όλων των μοντέλων.

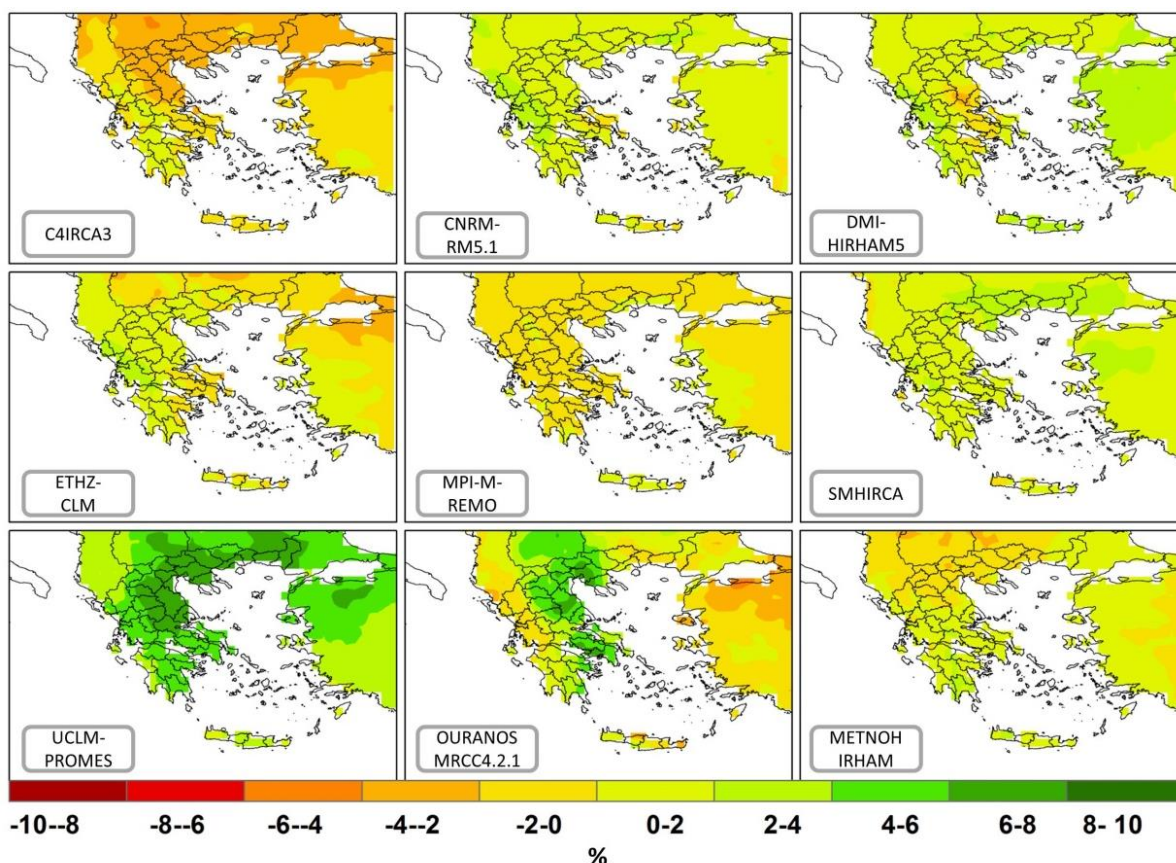


Εικόνα 4-9: Χρονοσειρά απόδοσης Φ/Β συστημάτων για την Ελλάδα. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τιμών, με γκρι σκούρο παρουσιάζεται το εύρος των 50% των τιμών που εμφανίζονται σε όλα τα μοντέλα, ενώ τέλος με γκρι ανοιχτό εμφανίζεται το 100% εύρος των τιμών που αποδίδουν όλα τα μοντέλα

Παρατηρείται ότι συνολικά στην Ελλάδα η αύξηση της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων είναι περίπου 1% τα επόμενα 100 χρόνια, κάτι που καταδεικνύει την ανάγκη για προσεκτική επιλογή της χωροθέτησης των Φ/Β συστημάτων σε γεωγραφικές περιφέρειες που όπως είδαμε στις Εικόνες 4-6, 4-7, 4-8, παρουσιάζεται αύξηση.

4.5 Χωρική εξέλιξη απόδοσης Φ/Β συστημάτων την περίοδο 2011-2050

Στην Εικόνα 4-10 παρουσιάζεται χωρικά η αλλαγή στην απόδοση των Φ/Β συστημάτων την περίοδο μελέτης 2011-2050, για κάθε περιοχικό κλιματικό μοντέλο ξεχωριστά

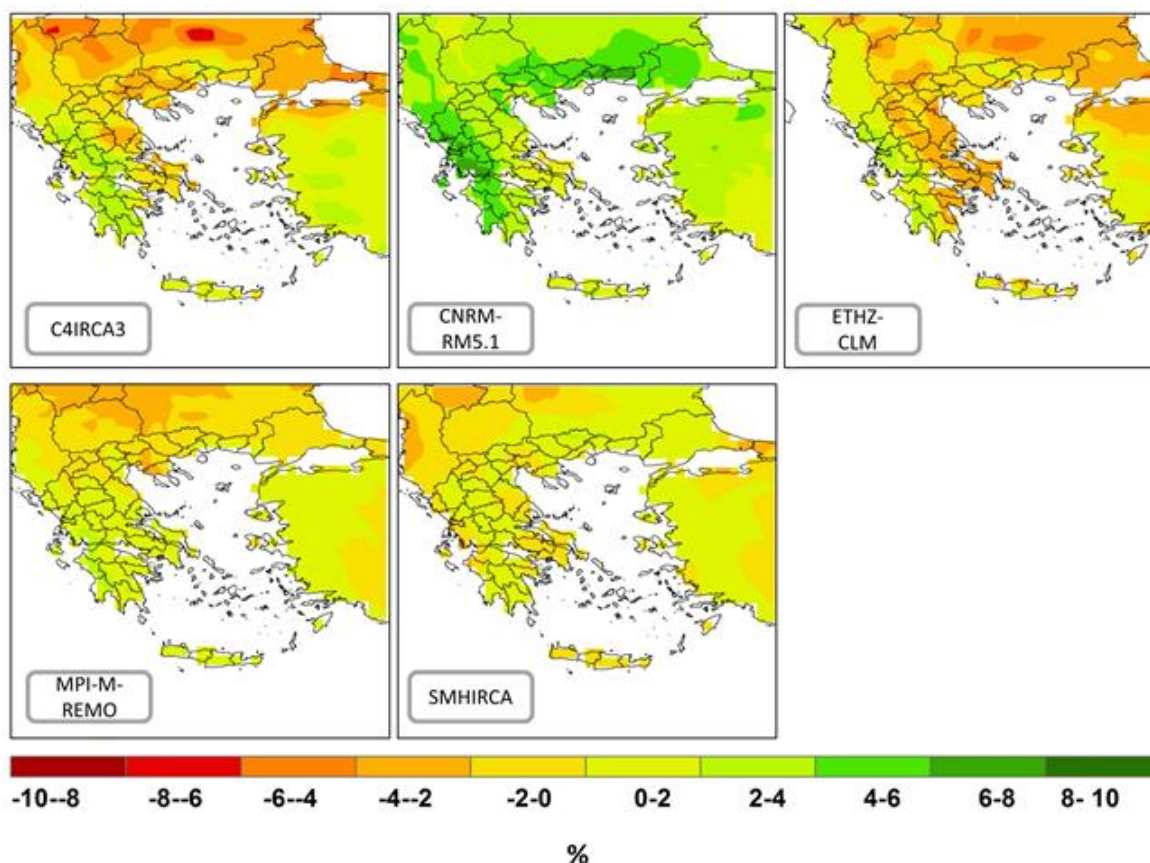


Εικόνα 4-10: Μεταβολή απόδοσης Φ/Β συστημάτων ανά RCM την περίοδο 2011-2050

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα από κάθε μοντέλο δεν δείχνουν κάποια συγκεκριμένη τάση στην απόδοση των Φ/Β συστημάτων. Ωστόσο η πλειονότητα αυτών παρουσιάζει αύξηση στο μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής μελέτης. Την μεγαλύτερη αύξηση στην απόδοση παρουσιάζει το μοντέλο PROMES του ινστιτούτου UCLM όπου η αύξηση της απόδοσης φτάνει μέχρι και 8-10 % επί της περιόδου αναφοράς.

4.6 Χωρική εξέλιξη απόδοσης Φ/Β συστημάτων την περίοδο 2061-2100

Στην Εικόνα 4-11 παρουσιάζεται η αλλαγή στην απόδοση των Φ/Β συστημάτων συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς για την περίοδο μελέτης 2061-2100, για κάθε RCM ξεχωριστά



Εικόνα 4-11: Μεταβολή απόδοσης Φ/Β συστημάτων ανά RCM την περίοδο 2061-2100

Στην Εικόνα 4-11 παρατηρείται ότι, αν εξαιρέσουμε το RCM CNRM-RM 5.1 το οποίο παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση στην παραγωγή ενέργειας Φ/Β συστήματα σενάριο σε όλη τη περιοχή μελέτης, την δεύτερη περίοδο αναφοράς στην πλειονότητα των μοντέλων υπάρχει αύξηση της απόδοσης των Φ/Β συστημάτων στην δυτική ηπειρωτική χώρα και την Πελοπόννησο της τάξης του 2% περίπου ενώ η ανατολική πλευρά της ηπειρωτικής χώρας παρουσιάζει μία μείωση της παραγωγικότητας της τάξης 2% και παραπάνω σε κάποιες

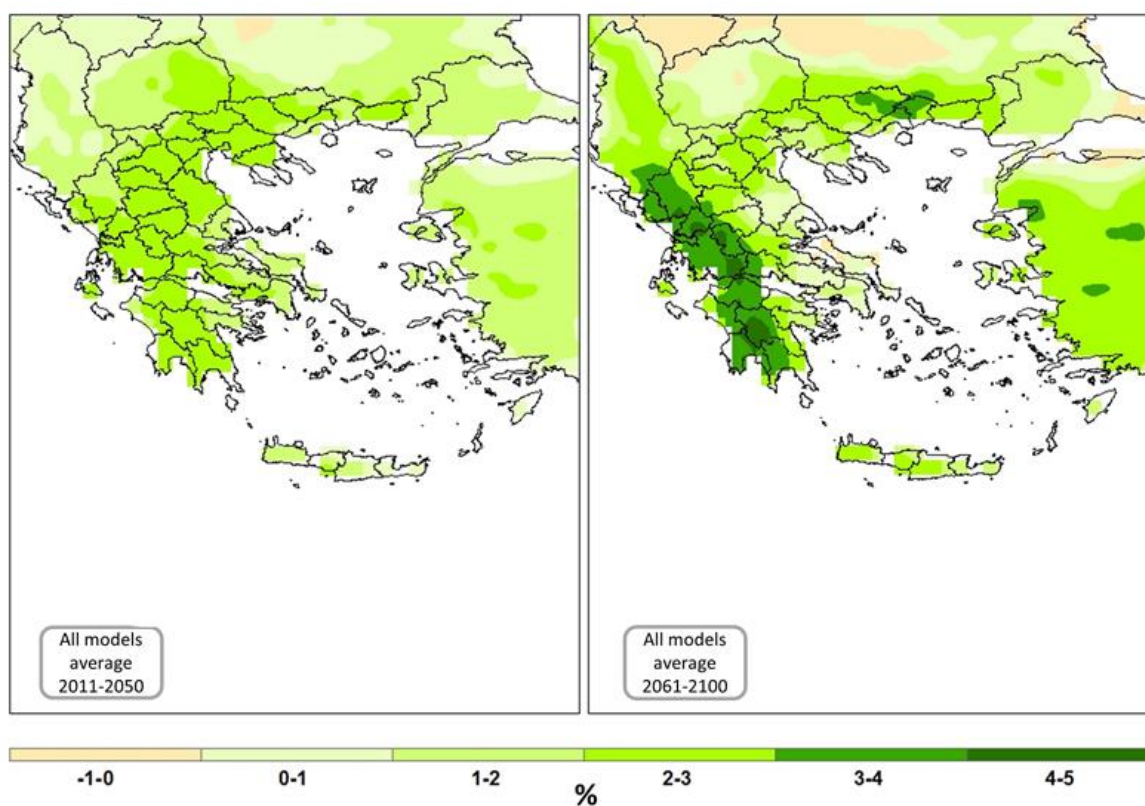
περιπτώσεις. Για την Κρήτη και τα νησιά του Αιγαίου η κύρια τάση είναι η αύξηση της απόδοσης μέχρι 2%.

4.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας στις παραμέτρους της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας με σκοπό τον προσδιορισμό του ποσοστού συνεισφοράς τους στην μελλοντική αλλαγή της παραγωγή των Φ/Β. Για την μελέτη κάθε μίας από τις κλιματικές μεταβλητές, διατηρήθηκε η αλλαγή στην άλλη μεταβλητή ίση με μηδέν. Η μεθοδολογία αυτή υιοθετήθηκε από την Crook et. al. (2011).

4.7.1 Συνεισφορά ακτινοβολίας ($\Delta T=0$)

Στην Εικόνα 4-12 παρουσιάζεται η απόδοση των Φ/Β συστημάτων τις δύο περιόδους μελέτης θεωρώντας την θερμοκρασία σταθερή και ίδια με αυτή της περιόδου αναφοράς

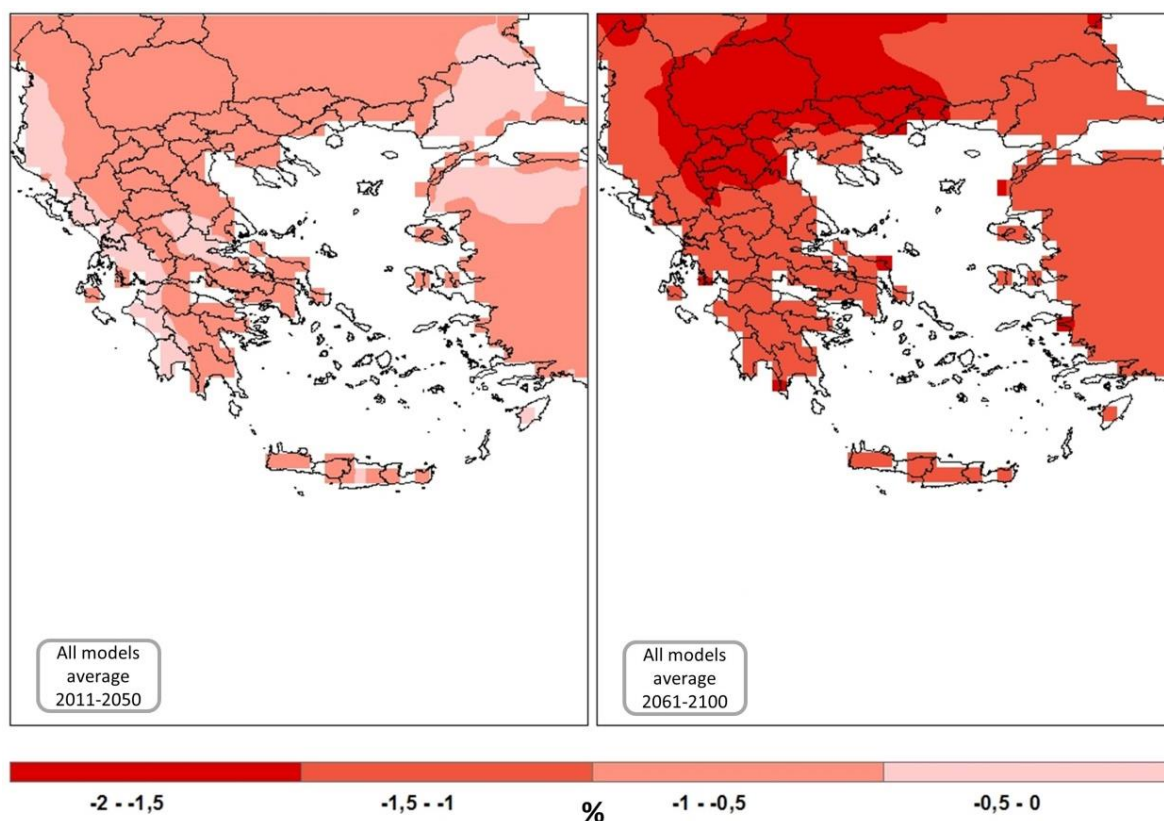


Εικόνα 4-12: Απόδοση Φ/Β πλαισίων υπό σταθερή θερμοκρασία

Παρατηρείται ότι η μεμονωμένη αύξηση της ακτινοβολίας επιφέρει σημαντική αύξηση στην παραγωγή των Φ/Β συστημάτων μέχρι και 5%. Σημαντικό είναι να τονιστεί η συσχέτιση της αύξησης της παραγωγής με την Εικόνα 4-3, όπου παρατηρείται ότι στις περιοχές με μεγαλύτερη απόλυτη αλλαγή της ακτινοβολίας έχουμε και αρκετά μεγάλη αύξηση της απόδοσης όπως για παράδειγμα στην δυτική ηπειρωτική Ελλάδα.

4.7.2 Συνεισφορά θερμοκρασίας ($\Delta G=0$)

Στην Εικόνα 4-13 παρουσιάζεται η απόδοση των Φ/Β συστημάτων τις δύο περιόδους μελέτης θεωρώντας την ακτινοβολία σταθερή και ίδια με αυτή της περιόδου αναφοράς.



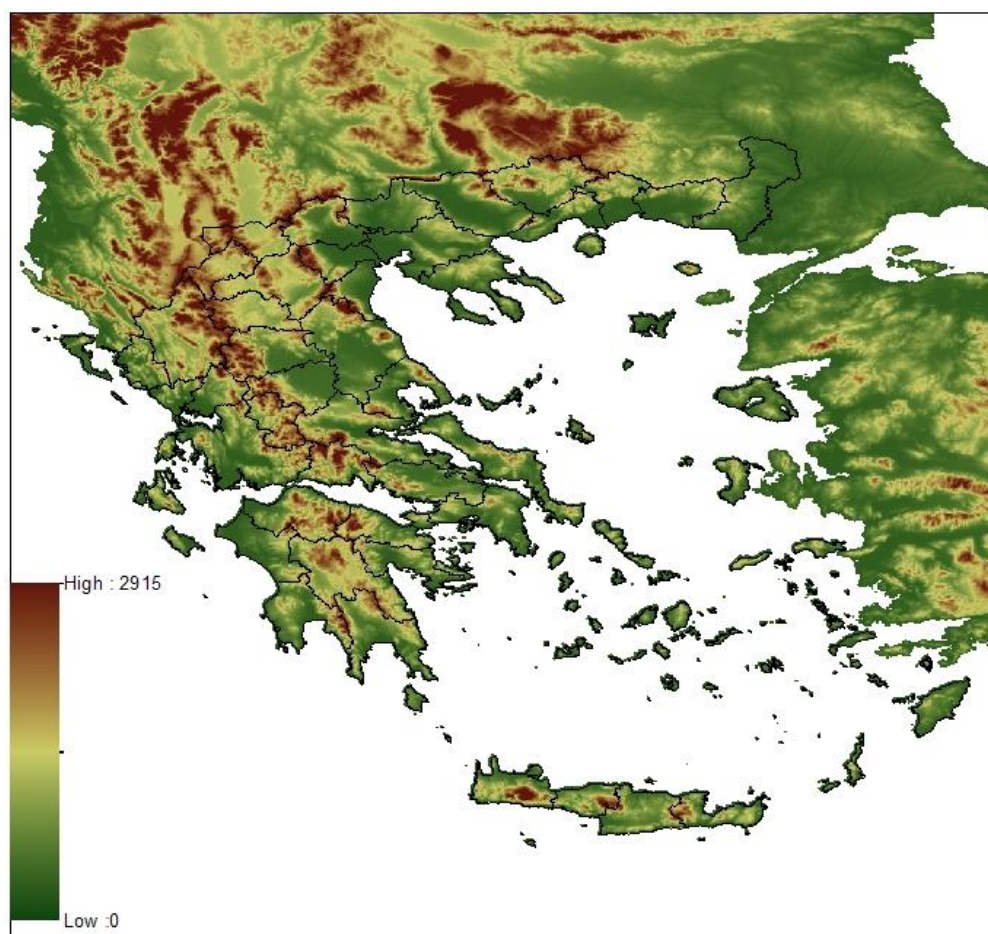
Εικόνα 4-13: Απόδοση Φ/Β πλαισίων υπό σταθερή ακτινοβολία

Παρατηρείται ότι η μεμονωμένη αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει σημαντική μείωση στην παραγωγή των Φ/Β συστημάτων στο σύνολο της περιοχής μελέτης μέχρι και 2% .

4.7.3 Συσχέτιση

Για τα Φ/Β συστήματα η σχετική συνεισφορά κάθε παραμέτρου διαφέρει ανάλογα την περιοχή. Οι δύο αυτοί παράμετροι δίνουν διαφορετικό πρόσημο συσχέτισης με την απόδοση των Φ/Β.. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η αλλαγή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας αντισταθμίζονται με αποτέλεσμα μικρές συνολικές αλλαγές, όπως παρατηρείται στο σύνολο σχεδόν της περιοχής μελέτης την πρώτη περίοδο μελέτης, όπου έχουμε μία σχετικά μικρή αύξηση της απόδοσης μέχρι 1% όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-4. Ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις όπου η μεγάλη αλλαγή της ακτινοβολίας υπερκαλύπτει την αύξηση της θερμοκρασίας επιφέροντας μεγάλη αύξηση στην απόδοση, όπως συμβαίνει την δεύτερη περίοδο μελέτης στην περιοχή της δυτικής και νοτιο-δυτικής ηπειρωτικής χώρας όπως και η αντίθετη περίπτωση όπου η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από την αλλαγή της ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης μέχρι και 3% όπως συμβαίνει την δεύτερη περίοδο μελέτης στις περιοχές της ανατολικής ηπειρωτικής χώρας τα νησιά του αιγαίου και κάποιες περιοχές της Κρήτης όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4-4.

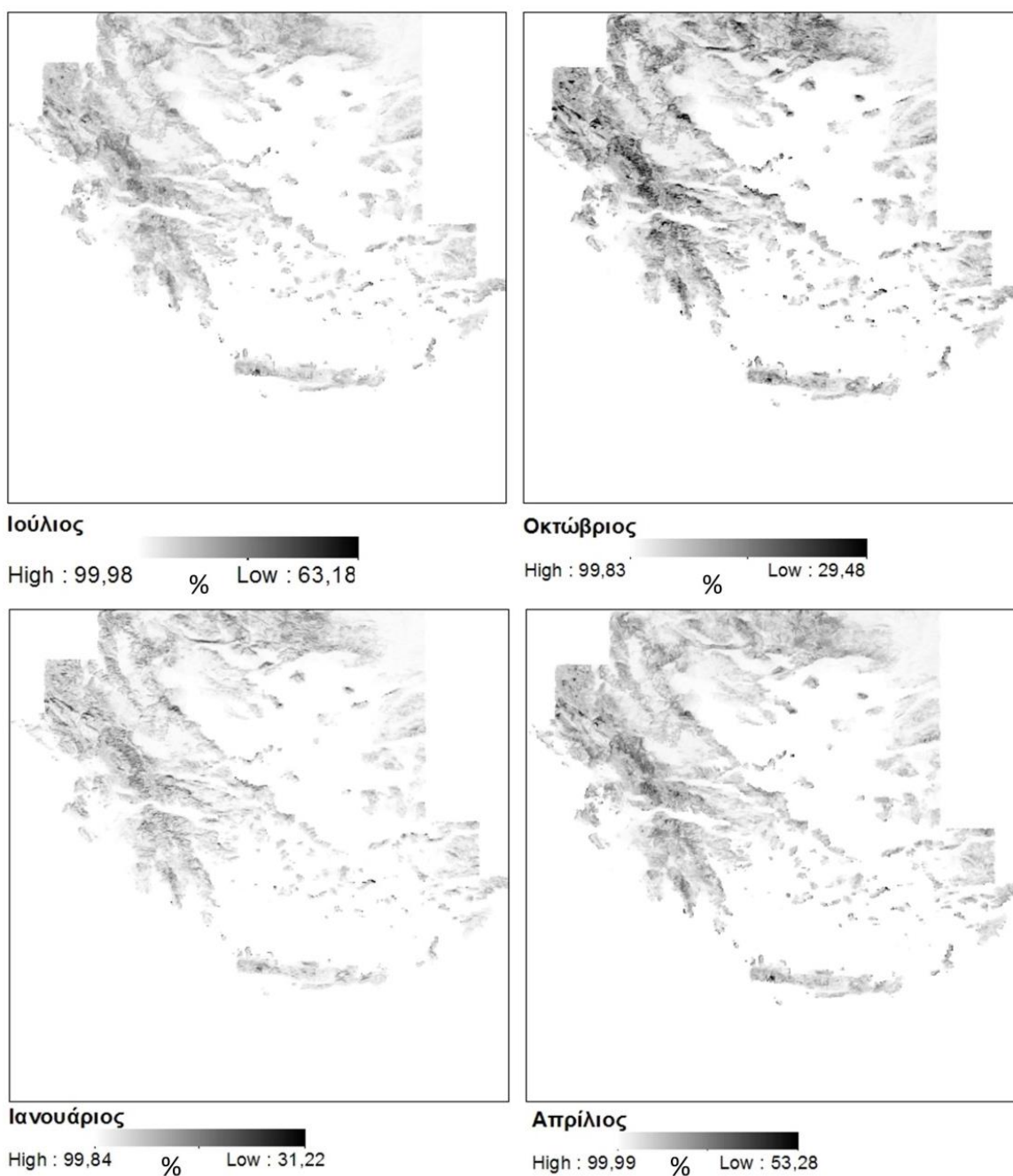
4.8 Επίδραση της τοπογραφίας στην κατανομή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας



Εικόνα 4-14: Χάρτης ανάγλυφου περιοχής μελέτης

Όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 4-14 η περιοχή μελέτης παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές στην τοπογραφία κάτι που καθιστά αναγκαστική την μελέτη της χωρικής ανάλυσης της κατανομής της ακτινοβολίας. Παρατηρείται ότι κυρίως στην ραχοκοκαλιά της ηπειρωτικής χώρας διαμορφώνονται υψηλοί όγκοι βουνών με σύνθετα τοπογραφικά χαρακτηριστικά όπως μεγάλη κλίση, πτυχώσεις, αλλαγή υψομέτρου, ενώ υπάρχουν και πολλές περιοχές με χαμηλό υψόμετρο και ήπια τοπογραφία.

Παρακάτω παρατίθενται οι χάρτες με την ποσοστιαία συμβολή της τοπογραφίας στην κατανομή της ακτινοβολίας στον Ελλαδικό χώρο, έπειτα από επεξεργασία με το Area Solar radiation tool του ArcGIS.



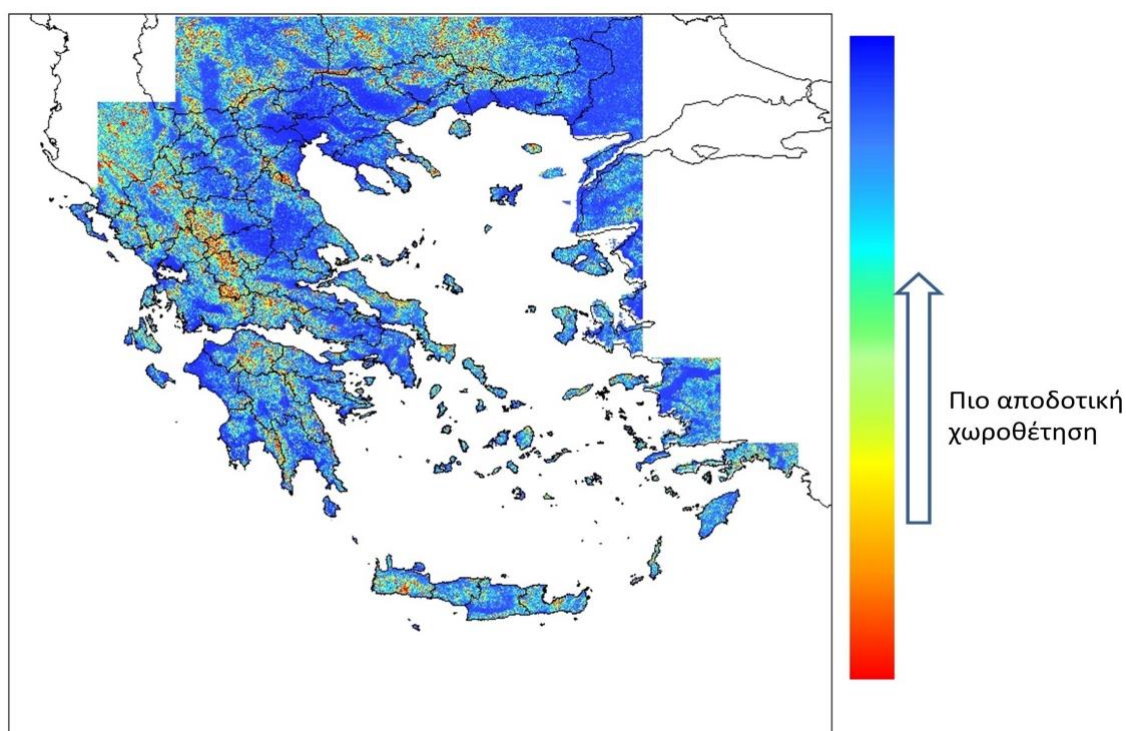
Εικόνα 4-15: Ποσοστό προσπίπτουσας ακτινοβολίας επί της ολικής ακτινοβολίας λόγω συμβολής της τοπογραφίας

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4-15 η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κάθε περιοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την διαμόρφωση της τοπογραφίας δηλαδή τις πτυχές, τις κλίσεις και το υψόμετρο. Κάθε εποχή του χρόνου και ανάλογα από την γωνία του ηλίου, παρατηρείται ότι το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας επί της ολικής ακτινοβολίας κυμαίνεται από περίπου 30% σε περιοχές με πολύπλοκη τοπογραφία όπως στις περιοχές όπου

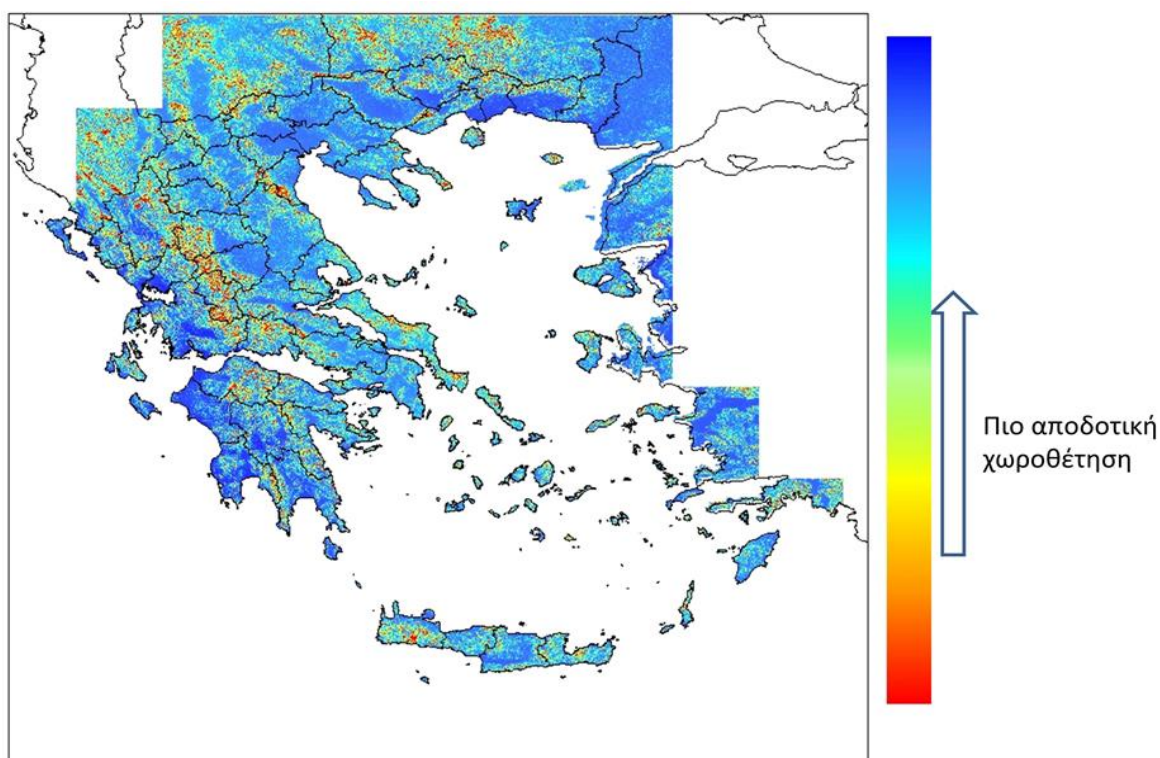
διαμορφώνεται η οροσειρά της Πίνδου (κεντρική ηπειρώτικη Ελλάδα), μέχρι και περίπου 100% σε επίπεδες περιοχές όπως πεδιάδες στην κεντρική ανατολική Ελλάδα, ή σε περιοχές με ήπιες κλίσεις. Σημαντική είναι και η επίδραση της χρονικής περιόδου, καθώς παρατηρείται ότι στις περιοχές με ιδιόμορφο ανάγλυφο κυρίως, το ποσοστό μεταβάλλεται σημαντικά μέσα σε ένα ημερολογιακό έτος, με τιμές που είναι μέχρι και διπλάσιες τους καλοκαιρινούς μήνες σε σχέση με τους χειμερινούς. Στις μέγιστες τιμές δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή λόγω του ότι στις περιοχές όπου εμφανίζονται η σκίαση είναι περιορισμένη.

4.9 Καταλληλότητα χωροθέτησης Φ/Β συστημάτων

Στις Εικόνες 4-16 και 4-17 παρουσιάζεται ο συνδυασμός των χαρτών της μέσης αλλαγής στην απόδοση όλων των μοντέλων για κάθε περίοδο μελέτης και της επίδρασης της τοπογραφίας στην κατανομή της ακτινοβολίας ως ετήσιος μέσος όρος.



Εικόνα 4-16: Καταλληλότητα χωροθέτησης Φ/Β συστημάτων συναρτήσει της τοπογραφίας και της αλλαγής της απόδοσης λόγω κλιματικής αλλαγής την περίοδο 2011-2050. Με μπλε σκούρο χαρακτηρίζονται οι περιοχές με τις βέλτιστες δυνατότητες, ενώ με κόκκινο οι περιοχές με περιορισμένες συγκριτικά δυνατότητας παραγωγής.



Εικόνα 4-17: Καταλληλότητα χωροθέτησης Φ/Β συστημάτων συναρτήσει της τοπογραφίας και της αλλαγής της απόδοσης λόγω κλιματικής αλλαγής την περίοδο 2060-2100Με μπλε σκούρο χαρακτηρίζονται οι περιοχές με τις βέλτιστες δυνατότητες, ενώ με κόκκινο οι περιοχές με περιορισμένες συγκριτικά δυνατότητες παραγωγής.

Παρατηρείται ότι οι περιοχές με την μικρότερη καταλληλότητα είναι οι περιοχές όπου εμφανίζεται ιδιαίτερη τοπογραφία και το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μικρό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-15. Οι περιοχές αυτές δεν ενδείκνυται για την χωροθέτηση Φ/Β συστημάτων καθώς επηρεάζονται έντονα από τις σκιάσεις που επιφέρει το ανάγλυφο. Επιπλέον παρατηρείται ότι την δεύτερη περίοδο οι περιοχές της ανατολικής ηπειρωτικής Ελλάδας δηλαδή οι περιοχές της Θεσσαλίας, Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας καθώς και η ανατολική Στερεά Ελλάδα, παρουσιάζουν έντονη αρνητική αλλαγή στην καταλληλότητα για εφαρμογή Φ/Β συστημάτων κάτι που οφείλεται στην μεγάλη μείωση απόδοσης λόγω κλιματικής αλλαγής όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-4. Επίσης βλέπουμε ότι σε διάρκεια 100 χρόνων οι βέλτιστες περιοχές χωροθέτησης των Φ/Β συστημάτων είναι στην δυτική Ελλάδα με μεγαλύτερο ποσοστό στην δυτική και νότια Πελοπόννησο την Περιφέρεια δυτικής Ελλάδας όπως και περιοχές της Θράκης.

5 Συμπεράσματα-Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίπτωση της κλιματικής αλλαγής στην μελλοντική παραγωγή ενέργειας μέσω Φ/Β συστημάτων στην περιοχή της Ελλάδος για δύο περιόδους μελέτης, με τη χρήση εννέα περιοχικών κλιματικών μοντέλων, καθώς και η επίδραση της τοπογραφίας στην κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Από την χωροχρονική ανάλυση της αλλαγής των δύο παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση των Φ/Β συστημάτων, της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην Ελλάδα προκύπτει αρχικά ότι τα δεδομένα από περιοχικά κλιματικά μοντέλα παρουσιάζουν συστηματικό σφάλμα μεροληψίας και τείνουν να υπερεκτιμούν την αλλαγή της θερμοκρασίας στην περιοχή της Ελλάδας. Στην περιοχή της Ελλάδας παρουσιάζεται μία μέση αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι και $1,5^{\circ}\text{C}$ την περίοδο 2011-2050, ενώ μέχρι το 2100 προβλέπεται μία μέση αύξηση $3-3,5^{\circ}\text{C}$. ενώ η ακτινοβολία αυξάνεται κατά $2-3 \text{ W/m}^2$ μέχρι το 2050, ενώ η απόλυτη αλλαγή συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς μέχρι το 2100 φτάνει μέχρι και αύξηση 5 W/m^2 .

Όσον αφορά την απόδοση των Φ/Β συστημάτων παρουσιάζει αυξητική τάση συνολικά σε επίπεδο περιφερειών στην χώρα μέχρι το 2100 εκτός από την περιφέρεια Αττικής όπου παρουσιάζεται μείωση της απόδοσης της τάξης του 0,3%. Την πρώτη περίοδο μελέτης παρατηρείται μέση αύξηση της απόδοσης μεταξύ 1-2% στο μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής μελέτης ενώ την περίοδο 2061-2100 παρατηρείται σημαντική αύξηση απόδοσης στην δυτική ηπειρωτική χώρα και την Πελοπόννησο, ενώ στην ανατολική ηπειρωτική χώρα την κεντρική Μακεδονία και άλλες μεμονωμένες περιοχές παρουσιάζεται αρνητική αλλαγή στην απόδοση. Εάν εξεταστεί ξεχωριστά η κάθε παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση των Φ/Β συστημάτων παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει σημαντική μείωση στην απόδοση τέτοιων συστημάτων η οποία ωστόσο υπερκαλύπτεται από την αύξηση της ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την συνολική αύξηση στην απόδοση τους.

Τέλος η κατανομή της ακτινοβολίας σε μεγάλες γεωγραφικές περιφέρειες εξαρτάται σημαντικά από την τοπογραφία, το ανάγλυφο, τις κλίσεις καθώς επίσης και από την χρονική περίοδο με αποτέλεσμα για την κατάλληλη και πιο αποδοτική χωροθέτηση των Φ/Β συστημάτων να πρέπει να λαμβάνονται υπ όψιν οι προβλέψεις για την αλλαγή στην απόδοση τους λόγω κλιματικής αλλαγής συνδυαστικά με την επίδραση της τοπογραφίας

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Προς υποστήριξη των αυξανόμενων απαιτήσεων δημιουργήθηκε το πρόγραμμα CORDEX το οποίο βασίζεται στα νέα σενάρια εκπομπών. Δημιουργεί κλιματικές προσομοιώσεις όπου βασίζονται σε πολλαπλά δυναμικά και εμπειρικά στατιστικά μοντέλα όπου αναφέρονται ως CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), και μεγαλώνουν την χωρική ανάλυση στην Ευρώπη από 25km σε 12km. (EURO-CORDEX)

Τα δεδομένα των RCMs του CORDEX δεν είναι ακόμα διαθέσιμα στην επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο με την αξιοποίηση των νέων κλιματικών προσομοιώσεων θα δοθεί μελλοντικά η δυνατότητα για περαιτέρω έρευνα πάνω στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή ενέργειας από ΦΒ.

6 Βιβλιογραφία

- 1) Agostino, V. & Zelenka, A. (1992) Supplementing solar radiation network data by co-kriging with satellite images. *Int. J. Climatol.* 12: 749–761.
- 2) Ang, F.L. and T.G. ed., 1990. *Photovoltaic Engineering Handbook*, Princeton: Adam Higler.
- 3) Beyer, H. G., Czeplak, G., Terzenbach, U. & Wald, L. (1997) Assessment of the method used to construct clearness index maps for the new European solar radiation atlas (ESRA). *Sol. Energy* 61: 389–397.
- 4) Boberg, F. & Christensen, J.H., 2012. Overestimation of Mediterranean summer temperature projections due to model deficiencies. *Nature Climate Change*, 2(6), pp.433–436. Available at: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate1454> [Accessed July 19, 2013].
- 5) Böhm, U., M. Kücken, W. Ahrens, A. Block, D. Hauffe, K. Keuler, B. Rockel, and A. Will, 2006: Clm -the climate version of the model: Brief description and long-term applications. COSMO Newsletter, 6.
- 6) Castro, M., Fernández, C., Gaertner, M.A., 1993. "Description of a mesoscale atmospheric model". In: Díaz, J.L., Lions, J.L. (Eds.) *Mathematics Climate and Environment*. Rech. Math. Appl. Ser. Mason, pp. 230 -253.
- 7) Christensen, J.H. et al., 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 35(20), p.L20709. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008GL035694> [Accessed May 28, 2013].
- 8) Christensen J. H., Christensen O. B., Lopez P., van Meijgaard E. and M. Botzet. The HIRHAM4 Regional Atmospheric Climate Model. DMI Scientific Report 96-4, 1996
- 9) Crook, J. a. et al., 2011. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy & Environmental Science*, 4(9), p.3101. Available at: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c1ee01495a> [Accessed June 4, 2013].
- 10) Dubayah, R. & Rich, P. M. (1995) Topographic solar-radiation models for GIS. *Int. J. Geogr. Inform. Sci.* 9: 495–419.
- 11) Evans, D.L., 1981. Simplified method for predicting photovoltaic array output. *Solar Energy*, 27(6), pp.555–560. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90051-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(81)90051-7) [Accessed July 19, 2013].

- 12) Forsythe, W.C. et al., 1995. A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year. *Ecological Modelling*, 80(1), pp.87–95. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)00034-F](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800(94)00034-F) [Accessed July 23, 2013].
- 13) Fu, P. & Rich, P. M. (2000) The Solar Analyst, 1.0 Manual. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA.
- 14) Haerter, J.O. et al., 2011. Climate model bias correction and the role of timescales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), pp.1065–1079. Available at: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/1065/2011/> [Accessed May 31, 2013].
- 15) Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New. 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201
- 16) Hetrick, W. A., Rich, P. M., Barnes, F. J. & Weiss, S. B. (1993) GIS-based solar radiation flux models. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical papers. GIS, Photogrammetry and Modeling 3: 132–143.
- 17) Hofierka, J. & Šúri, M., 2002. The solar radiation model for Open source GIS : implementation and applications. , (September), pp.11–13.
- 18) Hulme, M., Conway, D., Jones, P. D., Jiang, T., Barrow, E. M. & Turney, C. (1995) A 1961–1990 climatology for Europe for climate change modelling and impact applications. *Int. J. Climatol.* 15: 1333–1364.
- 19) IPCC 2000 , Nakićenović, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Z. Dadi, “IPCC Special Report on Emissions Scenarios”, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 20) IPCC 2007. Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I,II,III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.), Geneva, Switzerland, p.104.
- 21) Jacob, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.77, Issue 1-4, 61-73
- 22) Jeffrey, S. J., Carter, J. O., Moodie, K. B. & Beswick, A. R. (2001) Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data. *Environ. Modell. Softw.* 16: 309–330.
- 23) Kjellström, E., L. Bärring, S. Gollvik, U. Hansson, C. Jones, P. Samuelsson, M. Rummukainen, A. Ullerstig, U. Willén, and K. Wyser (2005), A 140-

- years simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3), SMHI Reports Meteorology and Climatology, 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp.
- 24) Kou, Q., Klein, S.A. & Beckman, W.A., 1998. A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems. *Solar Energy*, 64(1-3), pp.33–40. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00049-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00049-8) [Accessed July 19, 2013].
 - 25) Mearns, L , Hulme, M. (2001). Climate Scenario Development.
 - 26) Miklanek, P. (1993) The estimation of energy income in grid points over the basin using simple digital elevation model. *Ann. Geophysicae Suppl. II*, 11: 296.
 - 27) Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant & T. J. Wilbanks, 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747-756.
 - 28) Moss, R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P. Runci, R. Stouffer, D. van Vuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J. P. van Ypersele, and M. Zurek, 2008: Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 132 pp.
 - 29) Nakićenović, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Sc, N.V. and Z.D., 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. *Cambridge University Press*.
 - 30) Notton, G. et al., 2005. Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. *Applied Thermal Engineering*, 25(17-18), pp.2854–2877. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.02.008> [Accessed July 19, 2013].
 - 31) Peel, M.C., Finlayson, B.L. & McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. , pp.439–473.
 - 32) Plummer, D., D. Caya, H. Côté, A. Frigon, S. Biner, M. Giguère, D. Paquin, R. Harvey and R. de Elia, 2006: Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Canadian Regional Climate Model. *J. of Climate* 19, 3112-3132
 - 33) Radu, R., M. Deque, and S. Somot (2008), Spectral nudging in a spectral regional climate model, *Tellus Series a-Dynamic Meteorology and Oceanography*, 60(5), 898-910.

- 34) Rigollier, C., Lefèvre, M., Wald, L., 2004, The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images, *Solar Energy* 77-2: 159-169 <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.017>.
- 35) Sampson, P. D. & Guttorp, P. (1992) Nonparametric estimation of nonstationary spatial covariance structure. *J. Am. Stat. Assoc.* 87: 108–119.
- 36) Shengli, H. & Pinde, F., 2009. Modeling Small Areas Is a Big Challenge solar. , pp.28–31.
- 37) Skoplaki, E. & Palyvos, J. a., 2009. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), pp.614–624. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X08002788> [Accessed May 29, 2013].
- 38) Spinoni, J., 2010. *1961-90 High resolution temperature, precipitation and solar radiation climatologies for Italy*, Milano: UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI.
- 39) Terink, W. et al., 2009. Bias correction of temperature and precipitation data for regional climate model application to the Rhine basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6(4), pp.5377–5413. Available at: <http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/6/5377/2009/>.
- 40) Tovar, J., Olmo, F. J. & Alados-Arboledas, L. (1995) Local scale variability of solar radiation in a mountainous region. *J. Appl. Meteorol.* 34: 2316–2322.
- 41) Tovar-Pescador, J. et al., 2006. On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. *Meteorological Applications*, 13(03), p.279. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1017/S1350482706002258> [Accessed July 28, 2013].
- 42) United nations framework convention on climate change, United Nations, 1992
- 43) Wilson, J. P. & Gallant, J. C. (eds.) (2000) *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: John Wiley and Sons.
- 44) Xia, Y., Winterhalter, M. & Fabian, P. (2000) Interpolation pf daily global solar radiation with thin plate smoothing splines. *Theor. Appl. Climatol.* 66: 109–115.
- 45) Zelenka, A., Czeplak, G., D'Agostino, V., Josefson, W., Maxwell, E. & Perez, R. (1992) *Techniques for Supplementing Solar Radiation Network Data*. Technical Report, International Energy Agency, IEA-SHCP-9D-1, Swiss Meteorological Institute, Switzerland
- 46) Zondag, H., 2008. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), pp.891–959. Available at:

- <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032107000020> [Accessed May 22, 2013].
- 47) Καψωμενάκης, Ι et al., 2011. Σενάρια ανθρωπογενούς παρέμβασης στην κλιματική αλλαγή και τ απρογράμματα Prudence και Ensembles. *Τράπεζα της Ελλάδος, Επιτροπή μελέτης επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής*.
- 48) <http://ensemblesrt3.dmi.dk/>, [Accessed June 22, 2013].
- 49) http://www.ipcc.ch/index.htm#.UelXetJM_zE, [Accessed July 15, 2013].
- 50) <http://www.euro-cordex.net/About-Euro-Cordex.1864.0.html> [Accessed September 12, 2013].