



ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΒΙΩΣΙΜΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ (ΠΕΣΠΚΑ) ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Παραδοτέο 4 «Αξιολόγηση και επιλογή κατάλληλων κλιματικών μοντέλων
– Περιγραφή επιλεγέντος κλιματικού μοντέλου»

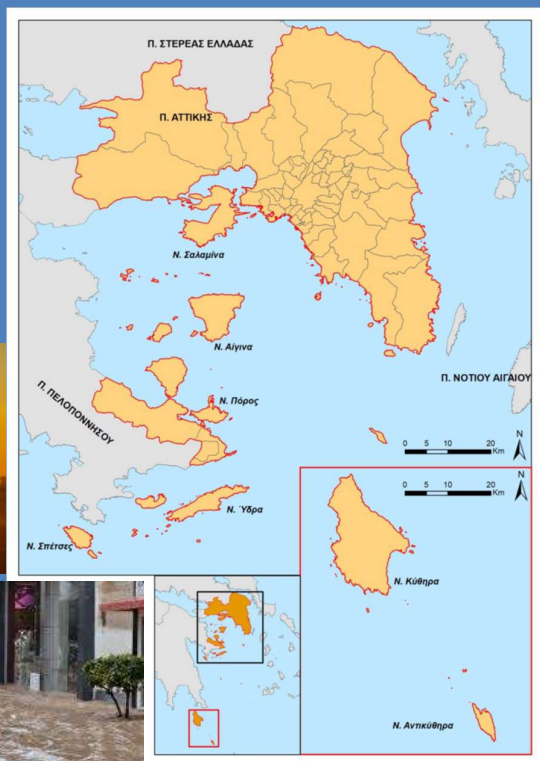
Ανάδοχος Μελετητής:



«ADVANCED ENVIRONMENTAL STUDIES ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ
ΑΝΩΝΥΜΗ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ»

ΔΙΑΚΡ. Τ. «ΑΔΕΝΣ Α.Ε.»

Βασ. Σοφίας 98Α, Τ.Κ. 115 28, Αθήνα, Τηλ. 2107257539, Fax:
2107788668, Email: info@adens.gr



Νοέμβριος 2019

ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ (ΠΕΣΠΚΑ) ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Παραδοτέο 4

Αξιολόγηση και επιλογή κατάλληλων κλιματικών μοντέλων – Περιγραφή επιλεγέντος κλιματικού μοντέλου

Ανάδοχος



«ADVANCED ENVIRONMENTAL STUDIES
ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΝΩΝΥΜΗ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ»

ΔΙΑΚΡ. Τ. «ADENS A.E.»

Βασ. Σοφίας 98Α, Τ.Κ. 115 28, Αθήνα,
Τηλ. 2107257539, Fax: 2107788668,
Email: info@adens.gr

Το παραδοτέο συντάχθηκε από:

- Ακαδημία Αθηνών
Χρήστος Σ. Ζερεφός
Γιάννης Καψωμενάκης
- Εθνικών Αστεροσκοπείο Αθηνών
Γιαννακόπουλος Χρήστος
Γερασόπουλος Ευάγγελος
Βαρώτσος Κων/νος
Αθανασοπούλου Ελένη
Κιτσαρά Γιαννούλα
Γρατσέα Μυρτώ
- Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ
Μαρία Τόμπρου
Αγγελική Ντάντου
Γιώργος Παπαγγελής

Αναθεωρήσεις:

Έκδοση	Ημερομηνία	Παρατηρήσεις
Εκδ. 1 (v.1)	28.11.2019	Αρχική έκδοση



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο παρούσας έκθεσης	1
1.2	Δομή παρούσας Έκθεσης	3
2	ΓΕΝΙΚΑ	3
2.1	Κλιματική Αλλαγή	3
2.2	Κλιματικά μοντέλα	4
2.2.1	Παγκόσμια μοντέλα	4
2.2.2	Περιοχικό μοντέλο	4
2.3	Κλιματικά σενάρια.....	9
2.4	Στόχος Αξιολόγησης.....	10
3	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	12
3.1	Μοντέλα που αξιολογούνται	12
3.2	Δεδομένα παρατηρήσεων	12
3.3	Μέθοδος Ανάλυσης	12
3.4	Περιγραφή και μεθοδολογία εφαρμογής περιοχικού μοντέλου ατμοσφαιρικής ρύπανσης	13
4	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	15
4.1	Προσομοιωμένο και παρατηρημένο μέσο κλίμα.....	15
5	ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΕ ΥΨΗΛΗ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	19
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	19
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	20

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1	Διοικητική διαίρεση Περιφέρειας Αττικής	2
Εικόνα 2-1	Οι χρήσεις γης και η εδαφικάλυψη της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, από τη δορυφορική εικόνα (LandsatThematicMapper, Πανεπιστήμιο Αιγαίου), χωρικής ανάλυσης 30x30 m. Οι αποχρώσεις του γκρι αντιστοιχούν σε 7 αστικές κατηγορίες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν 6 περιοχές με διαφορετική πυκνότητα κατοικιών και μία βιομηχανική/εμπορική κατηγορία.	6
Εικόνα 2-2	Οι χρήσεις γης και η εδαφικάλυψη των τριών πλεγμάτων εφαρμογής του μοντέλου: η ευρύτερη περιοχή της κεντρικής Ελλάδας με χωρική ανάλυση 9x9 km, η ευρύτερη περιοχή της στερεάς Ελλάδας και της ΒΑ Πελοποννήσου με χωρική ανάλυση 3x3 km και η ευρύτερη περιφέρεια Αττικής με χωρική ανάλυση 1x1 km.	7
Εικόνα 2-3	Πεδία α) θερμοκρασίας αέρα και ανέμου β) θερμοκρασίας εδάφους και γ) σχετικής υγρασίας και ανέμου στις 12:00 UT (αριστερά) και 20:00 UT (δεξιά) στις 19/09/2007	9
Εικόνα 2-4	Κλιματικά σενάρια (RepresentativeConcentrationPathways - RCPs): α) αλλαγή της ενίσχυσης της ακτινοβολίας (radiativeforcing) συγκριτικά με την προ-βιομηχανική εποχή και β) εκπομπές CO ₂ για τα διάφορα RCPs σενάρια. Με έντονο χρώμα σημειώνονται τα τέσσερα RCPs σενάρια και με λεπτές γραμμές τα μεμονωμένα σενάρια από 30 περίπου υποψήφια RCPs σενάρια (Moss et al., 2010).....	10
Εικόνα 3-1	Εκπομπές NO ₂ από α) επιφανειακές, β) γραμμικές και γ) σημειακές πηγές της ευρύτερης περιφέρειας Αττικής με χωρική ανάλυση 1x1 km.....	14
Εικόνα 4-1	Μέση χειμερινή απόκλιση της μέγιστης θερμοκρασίας για όλα τα μοντέλα και για την περίοδο 1971-2005. Το πάνω αριστερά σχήμα δείχνει την οριζόντια κατανομή της μέσης εποχικής θερμοκρασίας, όπως προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς E-OBS.	16
Εικόνα 4-2	Όπως στην Εικ. 4-1, αλλά για τη μέση μέγιστη θερινή θερμοκρασία.....	16
Εικόνα 4-3	Όπως στην Εικ. 4-1, αλλά για τη μέση απόκλιση της χειμερινής βροχόπτωσης. Το πάνω αριστερά σχήμα δείχνει την οριζόντια κατανομή της μέσης χειμερινής βροχόπτωσης, όπως προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς E-OBS.	17
Εικόνα 4-4	Όπως στην Εικ. 4-3, αλλά για τη μέση μέγιστη θερινή βροχόπτωση.....	17
Εικόνα 4-5	Μέση εποχική και ετήσια απόκλιση της μέγιστης (TX), ελάχιστης (TN) και μέσης ημερήσιας (TM) θερμοκρασίας για τα EURO-CORDEX μοντέλα για την Αθήνα	18
Εικόνα 4-6	Όπως στην εικόνα 4-5, αλλά για την εποχική και ετήσια απόκλιση για τη βροχόπτωση	18

ΠΙΚΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

Συντομογραφία	Επεξήγηση
ΠεΣΠΚΑ	Περιφερειακό Σχέδιο για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή
IPCC	Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change)
UNEP	Πρόγραμμα Περιβάλλοντος του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environment Programme)
GCM	Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Global Circulation Models)
RCM	Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (Regional Climate Models)
RCP	Κλιματικά Σενάρια Εκπομπών Αερίων (Representative Concentration Pathways)

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο παρούσας έκθεσης

Το έργο «Κατάρτιση του Περιφερειακού Σχεδίου για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ) Περιφέρειας Αττικής» ΣΥΜΒΑΣΗ αρ. 106/2019 ανατέθηκε μετά από δημόσιο διαγωνισμό άνω των ορίων με ανοιχτή διαδικασία μέσω ΕΣΗΔΗΣ στην εταιρεία μελετών ADENSA.E. Η σχετική σύμβαση υπογράφηκε στις 28-08-2019.

Η σύμβαση περιλαμβάνεται στο 1^ο υποέργο της Πράξης: «Περιφερειακό Σχέδιο για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ) Αττικής», η οποία έχει ενταχθεί στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Αττική 2014-2020» με βάση την απόφαση ένταξης με αρ. πρωτ. 374/05-03-2018 της ΕΙΔΙΚΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ Ε.Π. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και έχει λάβει κωδικό MIS 5023609.

Κύριος στόχος του έργου είναι η κατάρτιση του Περιφερειακού Σχεδίου Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή της Περιφέρειας Αττικής σε συμμόρφωση με το ακόλουθο θεσμικό πλαίσιο:

- Άρθρα 42 (Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή - ΕΣΠΚΑ), 43 (Περιφερειακά Σχέδια για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή - ΠεΣΠΚΑ), 44 (Εθνικό Συμβούλιο για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή - ΕΣΠ), 45 (Πρώτη Εθνική Στρατηγική για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή) του Νόμου 4414/2016 (ΦΕΚ 149/Α/2016)
- ΥΑ Αριθ. οικ.: 11258/ 16.03.2017 «Εξειδίκευση περιεχομένου Περιφερειακών Σχεδίων για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ), σύμφωνα με το άρθρο 43 του Νόμου 4414/2016 (Α' 149)» (ΦΕΚ 873/Β/2017)
- ΥΑ οικ. 34768/4.8.2017 «Σύσταση, συγκρότηση και κανονισμός λειτουργίας του Εθνικού Συμβουλίου για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΕΣΠ), σύμφωνα με το άρθρο 44 του ν. 4414/2016 (Α' 149)» (ΦΕΚ 3246/Β/2017)

Το ΠεΣΠΚΑ θα αξιολογήσει τις πιθανές επιπτώσεις (ευκαιρίες και απειλές) από την κλιματική αλλαγή, εστιάζοντας στον τρόπο με τον οποίο οι κλιματικοί κίνδυνοι ενδέχεται να εκδηλωθούν κατά τον 21^ο αιώνα, ελλείψει δράσης.

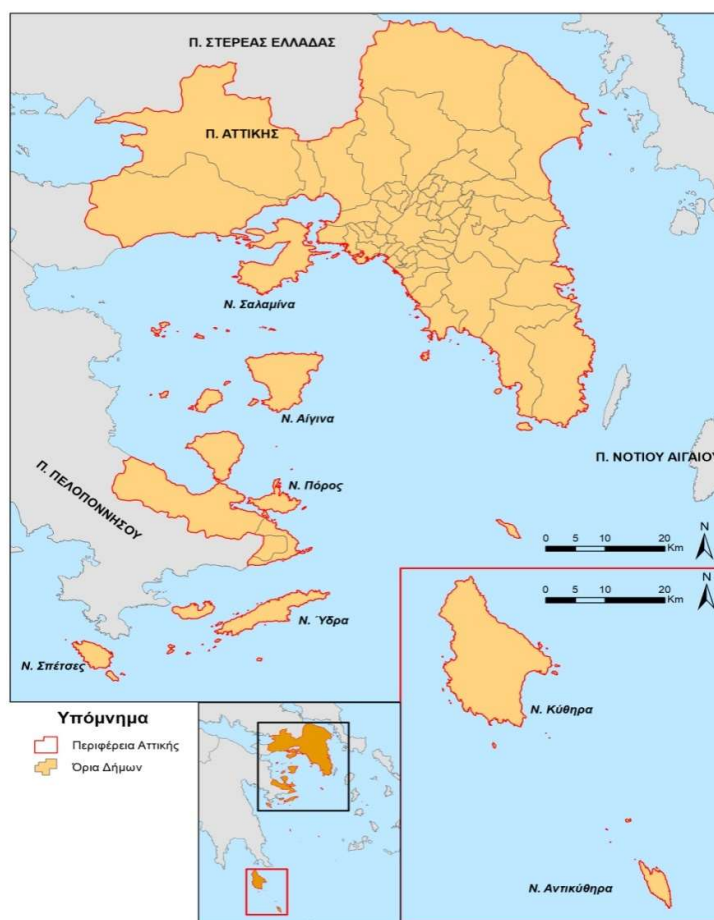
Το ΠεΣΠΚΑ θα επιδιώξει να αντιμετωπίσει τα ακόλουθα θέματα:

- Αξιολόγηση των κλιματικών κινδύνων υπό το πρίσμα των μεθόδων αξιολόγησης και γνώσης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής
- Μια πληρέστερη αξιολόγηση του τρόπου αλληλεπίδρασης του κλίματος με τους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες και του τρόπου με τον οποίο αυτοί οι παράγοντες κινδύνου ενδέχεται να αλλάξουν στο μέλλον, για παράδειγμα εξαιτίας της οικονομικής ανάπτυξης, της μεταβολής του πληθυσμού, των αλλαγών στις χρήσεις γης κλπ.
- Πώς οι επιπτώσεις των δράσεων προσαρμογής ενδέχεται να μεταβάλουν τα επίπεδα κινδύνου.
- Εκτίμηση του μεγέθους των επιπτώσεων και ιεράρχηση των δράσεων που απαιτούνται για τις διάφορες απειλές και ευκαιρίες,
- Κατανόηση της συνεργιστικής επίδρασης των διαφόρων κινδύνων που δρουν από κοινού.

- Αξιολόγηση των αβεβαιοτήτων, των περιορισμών και του επιπέδου εμπιστοσύνης στις υποκείμενες αποδείξεις και αναλύσεις για διάφορους κινδύνους.

Το ΠΕΣΠΚΑ θα καλύψει την Περιφέρεια Αττικής (Εικόνα 1-1) και θα χρησιμοποιηθεί για να ενημερώσει τόσο την Περιφέρεια όσο και τις Αρμόδιες Αρχές για τις μελλοντικές προτεραιότητες για την πολιτική προσαρμογής

Η παρούσα έκθεση αφορά στο 4^ο παραδοτέο του Έργου «Αξιολόγηση και επιλογή κατάλληλων κλιματικών μοντέλων – Περιγραφή επιλεγέντος κλιματικού μοντέλου». Σύμφωνα με τις Τεχνικές Προδιαγραφές του το παρόν Παραδοτέο θα παρουσιάζει τα πλέον πρόσφατα κλιματικά μοντέλα κατάλληλης διακριτικής ικανότητας και τεκμηρίωση της καταλληλότητάς τους βάσει σύγκρισης με ιστορικά δεδομένα επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών.



Εικόνα 1-1

Διοικητική διαίρεση Περιφέρειας Αττικής

1.2 Δομή παρούσας Έκθεσης

Στην παρούσα έκθεση αναφέρονται αρχικά (Κεφάλαιο 2) κάποια χαρακτηριστικά της κλιματικής αλλαγής και δίνεται μία περιγραφή των κλιματικών μοντέλων και κλιματικών σεναρίων. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα μοντέλα που είναι προς αξιολόγηση καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθείται για την αξιολόγησή τους (Κεφάλαιο 3). Τέλος (Κεφάλαιο 4), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης και επιλέγεται το καταλληλότερο μοντέλο για την δημιουργία προσομοιώσεων για τη συνέχεια του συγκεκριμένου έργου.

2 ΓΕΝΙΚΑ

2.1 Κλιματική Αλλαγή

Οι εγκυρότερες και πιο αξιόπιστες εκθέσεις για την κλιματική αλλαγή έχουν δημοσιευτεί από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), η οποία ιδρύθηκε το 1988 από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (World Meteorological Organization-WMO) και το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environment Programme-UNEP). Σκοπός της επιτροπής είναι η αξιολόγηση της υπάρχουσας επιστημονικής γνώσης για τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής, καθώς και η αξιολόγηση των συνεπειών των κλιματικών μεταβολών που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, μελετώντας πιθανές πολιτικές και δράσεις για την αντιμετώπιση των ενδεχόμενων κινδύνων

Τα ακραία και επικίνδυνα καιρικά φαινόμενα, όπως τα κύματα καύσωνα, οι πλημμύρες και ο ασυνήθιστα κρύος καιρός, εμφανίζονται όλο και πιο συχνά αποτελώντας την πιο ισχυρή ένδειξη της κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Σημαντική αύξηση περιστατικών ακραίων κυμάτων καύσωνα έχει ήδη καταγραφεί στη βιβλιογραφία των κλιματικών επιστημών (Horton et al., 2016).

Σύμφωνα με ειδική έκθεση σχετικά με τον αντίκτυπο της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας κατά 1.5°C, την οποία εξέδωσε πρόσφατα η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC, 2018), οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εκτιμάται ότι έχουν οδηγήσει σε άνοδο της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά περίπου 1°C (IPCC, 2018), σε σύγκριση με τα επίπεδα της θερμοκρασίας πριν από τη βιομηχανική επανάσταση και η άνοδος της θερμοκρασίας αναμένεται να προσεγγίσει τους 1.5°C ανάμεσα στο 2030 και το 2052, αν συνεχιστεί με τον σημερινό ρυθμό. Η θερμοκρασία του πλανήτη ανέρχεται μεσοσταθμικά κατά 0.2°C ανά δεκαετία, λόγω των τρεχόντων αλλά και των προγενέστερων ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Μέχρι σήμερα η κλιματική αλλαγή έχει προκαλέσει σοβαρά προβλήματα τόσο σε ανθρώπινες κοινωνίες, όσο και σε διάφορα οικοσυστήματα. Τα προβλήματα αυτά μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν αυξημένα περιστατικά ξηρασίας αλλά και πλημμυρών, ακραία κύματα ζέστης, άνοδο της στάθμης της θάλασσας, μειωμένη παραγωγή τροφίμων και απώλεια βιοποικιλότητας. Οι αλλαγές αυτές συνδέονται με πρωτοφανείς κινδύνους, ειδικά για τις πιο ευαίσθητες ομάδες του ανθρώπινου πληθυσμού (IPCC 2018, Mysiak et al., 2016).

Τα αποτελέσματα της μεγάλης πλειοψηφίας των κλιματικών μοντέλων, συμφωνούν στο ότι τα επόμενα χρόνια θα προκύψει μια αύξηση στην ένταση των ακραίων περιστατικών ζέστης σε πολλές περιοχές του κόσμου, λόγω της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2018). Η μεγαλύτερη ενίσχυση των επεισοδίων ζέστης αναμένεται στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη κατά τη θερμή περίοδο (κατά 3°C για άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 1.5°C), αλλά και στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη κατά την ψυχρή περίοδο (κατά 4.5°C για άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 1.5°C). Η Νότια Ευρώπη αλλά και η περιοχή της Μεσογείου συνολικότερα αναμένεται να είναι από τις περιοχές του πλανήτη που θα πληγούν ιδιαίτερα από τα ισχυρά κύματα ζέστης και κατά συνέπεια και η Ελλάδα είναι από τις χώρες οι οποίες θα πρέπει να βρίσκονται σε επιφυλακή για την αντιμετώπιση πιθανών ακραίων περιστάσεων. Ειδικά στις πόλεις, αξίζει να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής όσον αφορά στην αύξηση της θερμοκρασίας είναι ακόμη πιο έντονες εξ αιτίας του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας.

2.2 Κλιματικά μοντέλα

2.2.1 Παγκόσμια μοντέλα

Τα κλιματικά μοντέλα, επίσης γνωστά ως μοντέλα γενικής κυκλοφορίας ή GCM, είναι πολυσύνθετα μοντέλα που προσομοιώνουν την εξέλιξη του κλίματος, και δίνουν ως αποτέλεσμα τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για τον πλανήτη. Χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους για να προσομοιώσουν τις αλληλεπιδράσεις της ατμόσφαιρας με τους ωκεανούς, την επιφάνεια της γης και τις πολικές περιοχές. Η πιο διαδεδομένη χρήση των κλιματικών μοντέλων τα τελευταία χρόνια είναι η εκτίμηση της πορείας της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου (κλιματική αλλαγή).

Σενάρια κλιματικής αλλαγής που προέρχονται άμεσα από εξαγόμενα GCM μπορεί να μη διαθέτουν επαρκή χωρική διακριτική ικανότητα για να αποδώσουν αλλαγές σε μια περιοχή ή ειδική τοποθεσία. Ειδικότερα, η χωρική διακριτική ικανότητα των GCM σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά επιφάνειας εδάφους και ορογραφίας είναι σε μεγάλο βαθμό απλοποιημένα σε σχέση με την πραγματικότητα, με αποτέλεσμα την απώλεια κάποιων χαρακτηριστικών, που μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο τοπικό κλίμα. Το κενό αυτό έρχονται να καλύψουν τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα ή RCM (Regional Climate Models), τα οποία χρησιμοποιούν γενικά τις ίδιες αρχές φυσικής με τα GCM, αλλά παρέχουν εξαγόμενα για μέρος του πλανήτη σε υψηλότερη διακριτική ικανότητα, τυπικά μεταξύ 10-50 km. Τα RCM δημιουργούνται από την ενσωμάτωση ενός δευτερεύοντος μοντέλου σε μια ή περισσότερες μοναδιαίες κλίμακες των GCM. Εξαγόμενα από GCM, όπως πίεση, άνεμος, θερμοκρασία και βροχόπτωση σε διάφορες στάθμες για την περιοχή ειδικού πεδίου ενδιαφέροντος, χρησιμοποιούνται στα RCM.

2.2.2 Περιοχικό μοντέλο

Στην παρούσα μελέτη, προτείνεται να χρησιμοποιηθεί το περιοχικό μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF) έκδοση v3.9.1 (Skamarock et al., 2008). Το μοντέλο αυτό είναι ένα σύστημα αριθμητικής πρόγνωσης καιρού και προσομοίωσης των διεργασιών της ατμόσφαιρας, κατάλληλα σχεδιασμένο τόσο για ερευνητικές όσο και για επιχειρησιακές εφαρμογές. Έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Κέντρο Ατμοσφαιρικών Ερευνών των ΗΠΑ (NCAR), την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των ΗΠΑ (NOAA), την Υπηρεσία Καιρού της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (AFWA), το Ναυτικό Ερευνητικό Εργαστήριο των ΗΠΑ, το

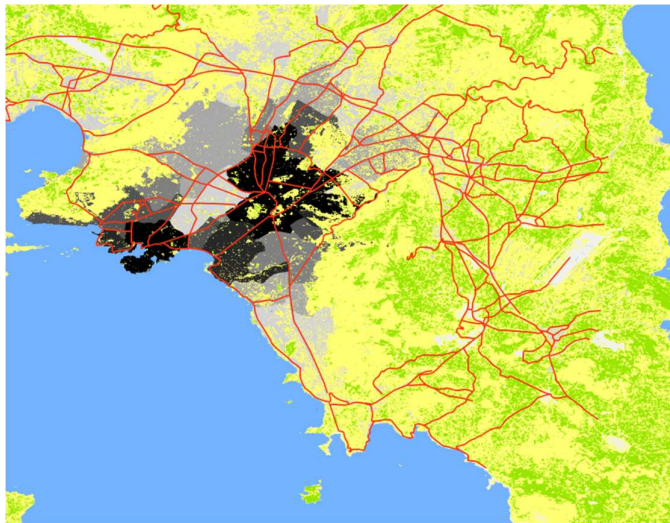
Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα και την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (FAA). Αποτελεί έναν ευέλικτο και εξελιγμένο κώδικα νέας γενιάς, με τη δυνατότητα να εκτελείται αποτελεσματικά από μικρές υπολογιστικές μονάδες (λάπτοπ, PC) έως και υπολογιστικά συστήματα υψηλών επιδόσεων (super computers).

Ο δυναμικός πυρήνας του μοντέλου (Advanced Research WRF, ARW) χρησιμοποιεί τις μη υδροστατικές εξισώσεις του Euler. Για την επίλυση των εξισώσεων στο οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο Arakawa C οριζόντιο πλέγμα, ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο το σύστημα Eta-συντεταγμένων, οι οποίες ακολουθούν την τοπογραφία, με δυνατότητα προεπιλεγμένου αριθμού και διάταξης καθ' ύψος των Eta-επιπέδων (με το ανώτερο επίπεδο να βρίσκεται στα 50 hPa ~ 20 km). Στο WRF-ARW εκτός από τον δυναμικό πυρήνα ARW περιλαμβάνονται επίσης αλγόριθμοι φυσικής που προσφέρουν αριθμητικές και δυναμικές επιλογές, προ-επεξεργαστές για τη δημιουργία των αρχικών συνθηκών (WRF Pre processing System - WPS), όπως και σύστημα για την αφομοίωση δεδομένων (WRF-Var Data assimilation). Το μοντέλο καλύπτει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως ιδεατές προσομοιώσεις, ανάπτυξη αλγορίθμων παραμετροποίησης φυσικών διεργασιών (μικροφυσικής νεφών, ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, ακτινοβολίας, εδάφους: φυσική βλάστησης και ανθρωπογενών επιφανειών), αφομοίωσης δεδομένων, κ.α. Το μοντέλο προσομοιώνει επιτυχώς τις μετεωρολογικές συνθήκες από τη μικρο-κλίμακα (π.χ. αστική κλίμακα) έως και την πλανητική, καθώς έχει τη δυνατότητα της πολλαπλής χωρικής εστίασης (multiplenesting). Επίσης, το μοντέλο υποστηρίζει και κλιματικές εφαρμογές σε περιοχική κλίμακα, τόσο για πραγματικές συνθήκες όσο και για μελλοντικά κλιματικά σενάρια με το ανάλογο 'configuration' και τα ανάλογα δεδομένα εισόδου.

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις θα γίνουν με την εφαρμογή εστίασης 'διπλής κατεύθυνσης' (two-waynesting), όπου το χρονικό βήμα επίλυσης των εξισώσεων υποδιαιρείται και οι περιοχές εστίασης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, έτσι ώστε οι περιοχές με τη μεγαλύτερη χωρική διακριτική ικανότητα να επηρεάζουν τις ευρύτερες περιοχές εφαρμογής, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση των διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων. Θα γίνει χρήση του μοντέλου παραμετροποίησης του εδάφους Noah-Multi parameterization Land Surface Model (Noah-MP LSM) (Niu et al., 2011), σε συνδυασμό με το μοντέλο ενός στρώματος (single-layer) αστικού θόλου Urban Canopy Model (UCM) (Tewari et al., 2007 και οι αναφορές τους). Στο σχήμα Noah-MP LSM θα επιλεχθεί το τροποποιημένο σύστημα μεταφοράς ακτινοβολίας 'δύο ρευμάτων' (two stream) (Yang and Friedl, 2003; Niu and Yang, 2004). Για την παραμετροποίηση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος θα εφαρμοστεί το σχήμα Yonsei University (YSU) (Hong et al., 2006), για την ακτινοβολία μικρού και μεγάλου μήκους κύματος το μοντέλο Rapid Radiative Transfer Model for Global (RRTMG) (Iacono et al., 2008), για το επιφανειακό στρώμα η αναθεωρημένη θεωρία ομοιότητας MM5 (Jimenez et al., 2012) και τέλος, για την παραμετροποίηση της μικροφυσικής το σχήμα κλεισίματος πρώτης τάξης (WSM) 3-class (Hong et al., 2004).

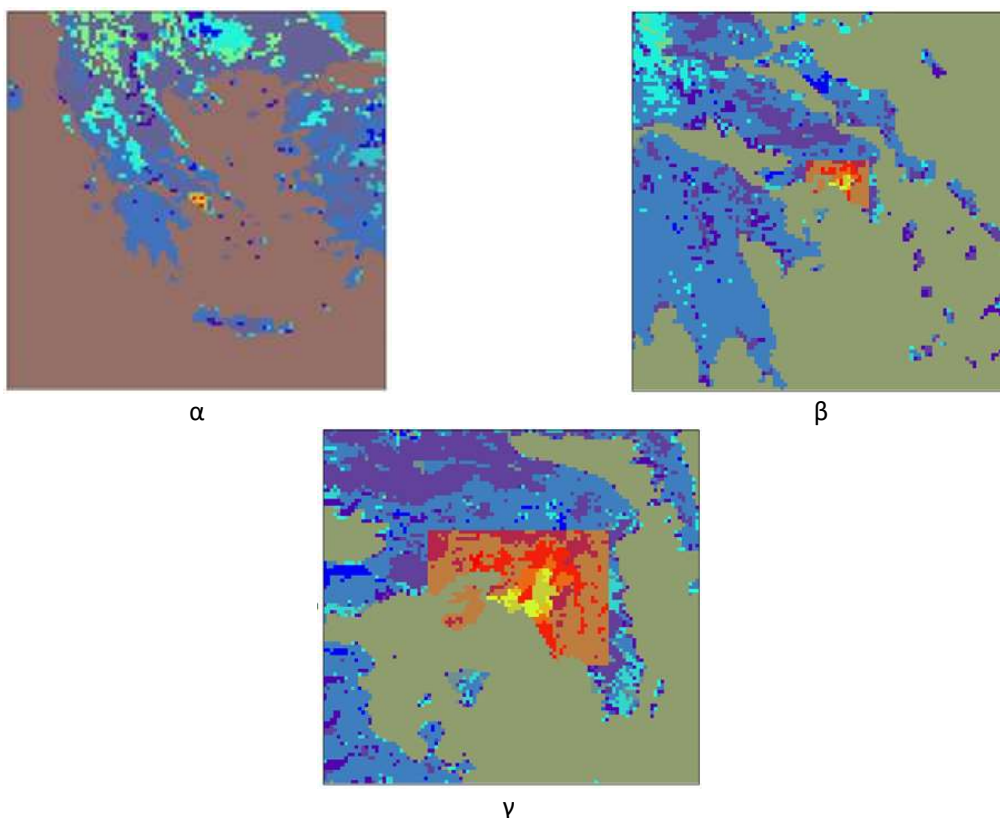
Όσον αφορά τη χρήση της γης και τους τύπους εδάφους, θα χρησιμοποιηθούν τα προκαθορισμένα σύνολα δεδομένων του Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) με 21 κατηγορίες χρήσης γης και 16 κατηγορίες εδάφους. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις συμπληρώνονται με δεδομένα υψηλής ανάλυσης σχετικά με τη χωρική κατανομή των χρήσεων γης και της εδαφοκάλυψης, που προέρχονται από ανάλυση δορυφορικής εικόνας. Συγκεκριμένα, η χρήση γης της ευρύτερης περιοχής της Αττικής αντικατοπτρίζεται από τη συλλογή στοιχείων βλάστησης και αστικών χρήσεων γης από μια δορυφορική εικόνα χωρικής ανάλυσης 30 m (Landsat Thematic Mapper, Πανεπιστήμιο Αιγαίου) όπως φαίνεται στο σχήμα 1, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται από τους Paraggelis et al. (2012). Επιπλέον, εφαρμόζεται κατηγοριοποίηση

επτά διαφορετικών αστικών τύπων κυρίως με βάση το ύψος του κτιρίων και την πυκνότητα της δόμησης. Και οι δύο κώδικες του Noah LSM-MP και του UCM προσαρμόζονται έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψη το σύνολο των δεδομένων χρήσης γης της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 2-1 Οι χρήσεις γης και η εδαφικάλυψη της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, από τη δορυφορική εικόνα (Landsat Thematic Mapper, Πανεπιστήμιο Αιγαίου), χωρικής ανάλυσης 30x30 m. Οι αποχρώσεις του γκρι αντιστοιχούν σε 7 αστικές κατηγορίες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν 6 περιοχές με διαφορετική πυκνότητα κατοικιών και μία βιομηχανική/εμπορική κατηγορία.

Για την προσομοίωση του επιλεγμένου ενδεικτικού παρόντος έτους, οι αρχικές, πλευρικές και οριακές συνθήκες θα ληφθούν από τα δεδομένα μοντέλων παγκόσμιας κλίμακας όπως π.χ. του Global Final Analyses (FNL) του National Centers for Environmental Prediction (NCEP) με χωρική ανάλυση $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (ή $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) για ημερομηνίες μετά τις 08/07/2015 και θα ενημερώνονται κάθε 6 ώρες. Η θερμοκρασία θάλασσας (SST) θα αποκτηθεί από το High Resolution Real-Time Global SST (RTG SST HR) με χωρική ανάλυση $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$ και θα ανανεώνεται κάθε 24 ώρες. Για τις προσομοιώσεις θα εφαρμοστεί τριπλό πλέγμα εστίασης (σχ. 2), όπου το πρώτο πλέγμα περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή της κεντρικής Ελλάδας με χωρική ανάλυση 9x9 km, το δεύτερο την ευρύτερη περιοχή της στερεάς Ελλάδας και της βορειο-ανατολικής (BA) Πελοποννήσου με χωρική ανάλυση 3x3 km και το τρίτο θα είναι εστιασμένο στην ευρύτερη περιφέρεια Αττικής με χωρική ανάλυση 1x1 km. Στον κατακόρυφο άξονα θα θεωρηθούν 38 επίπεδα Eta (έως τα 50 hPa) με μεγαλύτερη ανάλυση κοντά στην επιφάνεια και πάνω από το αστικό οριακό στρώμα.



Εικόνα 2-2 Οι χρήσεις γης και η εδαφοκάλυψη των τριών πλεγμάτων εφαρμογής του μοντέλου: η ευρύτερη περιοχή της κεντρικής Ελλάδας με χωρική ανάλυση 9x9 km, η ευρύτερη περιοχή της στερεάς Ελλάδας και της ΒΑ Πελοποννήσου με χωρική ανάλυση 3x3 km και η ευρύτερη περιφέρεια Αττικής με χωρική ανάλυση 1x1 km.

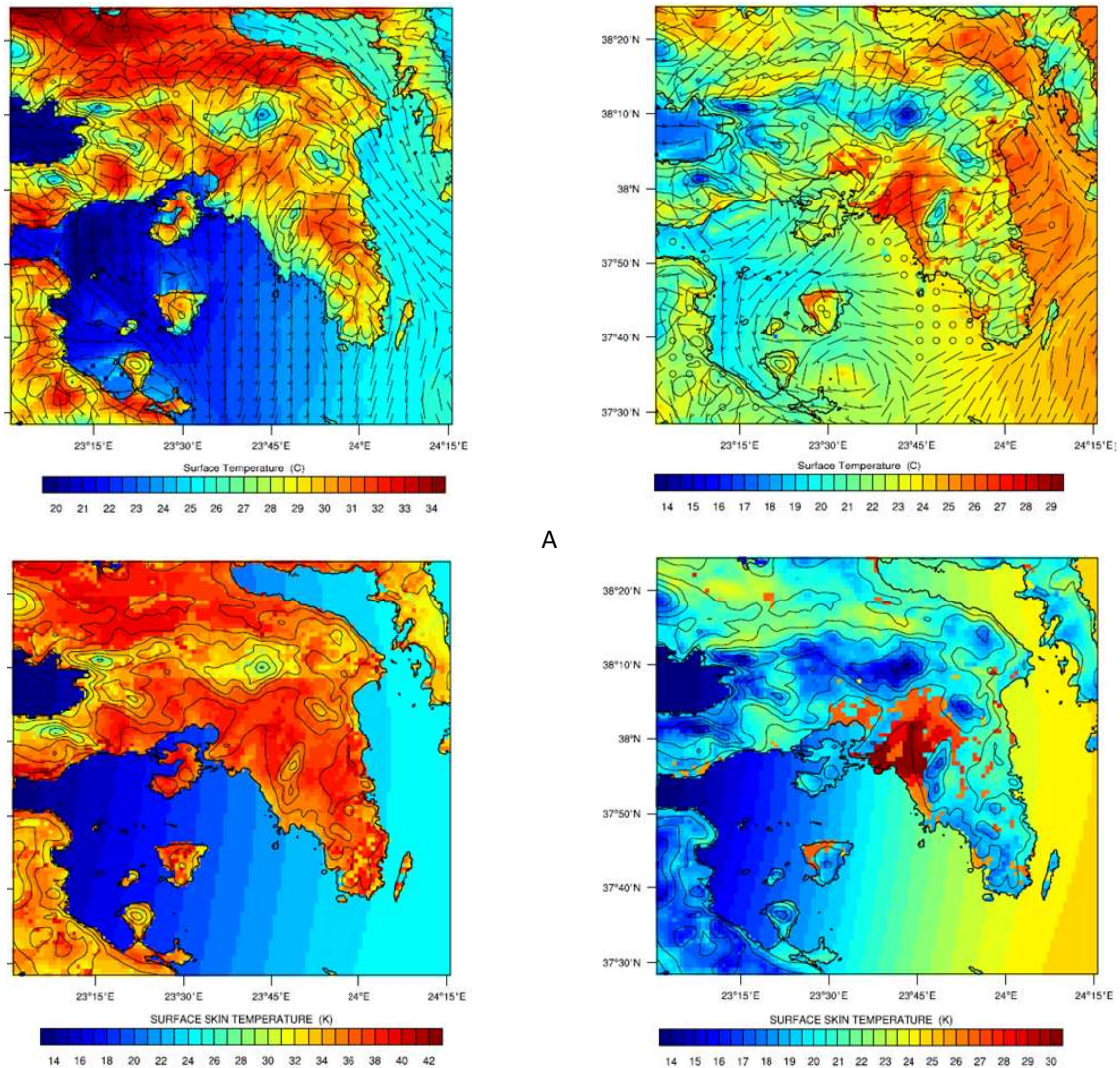
Για την προσομοίωση των επιλεγμένων μελλοντικών ετών (2080, 2100) οι αρχικές, πλευρικές και οριακές συνθήκες θα ληφθούν από τα δεδομένα NCAR CESM Global Bias-Corrected CMIP5 Output to Support WRF/MPAS Research dataset (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds316.1/#!description>). Το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει τα διορθωμένα δεδομένα εξόδου ενός κλιματικού μοντέλου από την 1η έκδοση του μοντέλου NCAR's Community Earth System Model (CESM1), που συμμετείχε στην 5η φάση του πειράματος συσχετισμένου μοντέλου Coupled Model Intercomparison Experiment (CMIP5). Η συγκεκριμένη δράση υποστηρίχθηκε από την 5η έκθεση αξιολόγησης της διακυβερνητικής επιτροπής για την κλιματική αλλαγή Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (IPCC AR5). Τα δεδομένα παρεμβάλλονται σε 26 επίπεδα πίεσης και παρέχονται σε αρχεία ανά 6ωρα διαστήματα. Οι μεταβλητές διορθώθηκαν προκαταρκτικά χρησιμοποιώντας τα πεδία Interim Reanalysis (ERA-Interim) του European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) για την περίοδο 1981-2005, ακολουθώντας τη μέθοδο των Bruyère et al. (2014). Τα αρχεία είναι διαθέσιμα για προσομοιώσεις του 20ου αιώνα (1951-2005) καθώς και τρία συνακόλουθα μελλοντικά σενάρια (Representative Concentration Pathway, RCP), τα RCP4.5, RCP6.0 και RCP8.5, για τα έτη 2006-2100.

Το μετεωρολογικό μοντέλο WRF παρέχει πλήθος στοιχείων/μεταβλητών εξόδου, όπως το τρισδιάστατο πεδίο του ανέμου, πεδία θερμοκρασίας, πίεσης και αναλογίας μίγματος υδρατμών, υετού, νεφών, χιονιού, ταχύτητα τριβής, ροών ακτινοβολίας, θερμότητας, ύψους οριακού στρώματος κ.α. ανά τακτά χρονικά

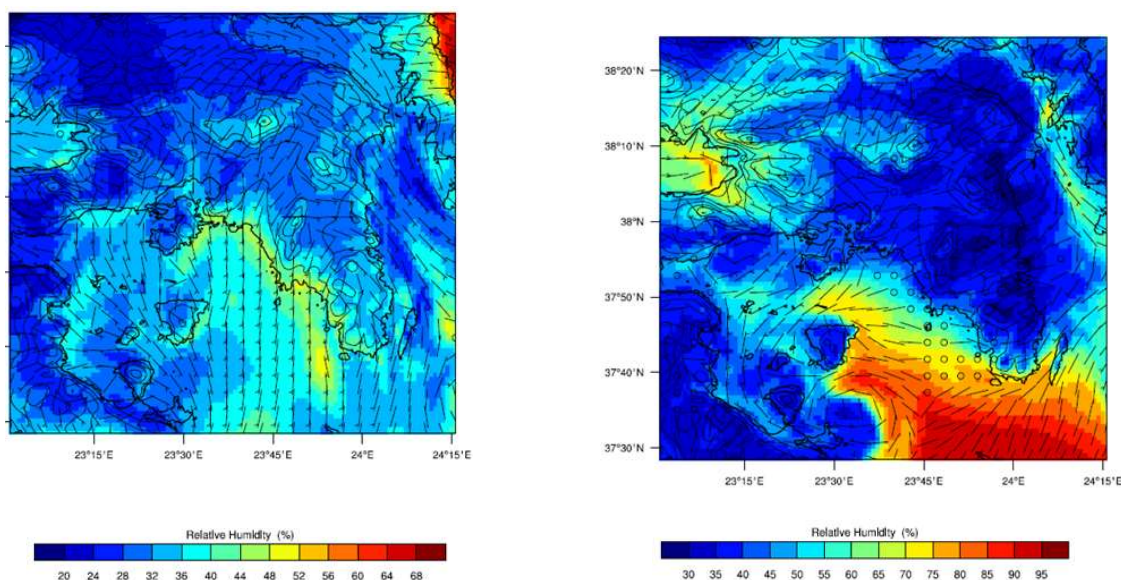
διαστήματα (της τάξης της μίας ώρας). Μετά τη συνάντηση της 31/10/2019 στο Αστεροσκοπείο Αθηνών, η πρόταση είναι να δοθούν δεδομένα:

- πεδίων θερμοκρασίας (ανά 3ωρο) για να πραγματοποιηθεί ο υποβιβασμός κλίμακας (downscaling) των δεδομένων των κλιματικών μοντέλων
- χρονοσειρές θερμοκρασίας και λοιπών μετεωρολογικών δεδομένων (π.χ. ανέμου, υγρασίας, ηλιοφάνειας κ.α.) σε επιλεγμένα σημεία της περιφέρειας Αττικής
- μετεωρολογικά στοιχεία εισόδου για επιλεγμένες χρονικές περιόδους στα μοντέλα ποιότητας αέρα
- χρονοσειρές επιλεγμένων διαφορών θερμοκρασίας στο λεκανοπέδιο της Αττικής, ενδεικτικών της έντασης της αστικής θερμικής νησίδας.
- αριθμός ημερών με ακραίες τιμές μεγίστων/ελαχίστων θερμοκρασιών, βροχοπτώσεων και ανέμων

Στην Εικόνα 2-3, παρουσιάζονται ενδεικτικά πεδία θερμοκρασίας αέρα, θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους, ανέμου και σχετικής υγρασίας από την εφαρμογή του μοντέλου WRF στο τρίτο πλέγμα.



β



Εικόνα 2-3 Πεδία α) θερμοκρασίας αέρα και ανέμου β) θερμοκρασίας εδάφους και γ) σχετικής υγρασίας και ανέμου στις 12:00 UT (αριστερά) και 20:00 UT (δεξιά) στις 19/09/2007

2.3 Κλιματικά σενάρια

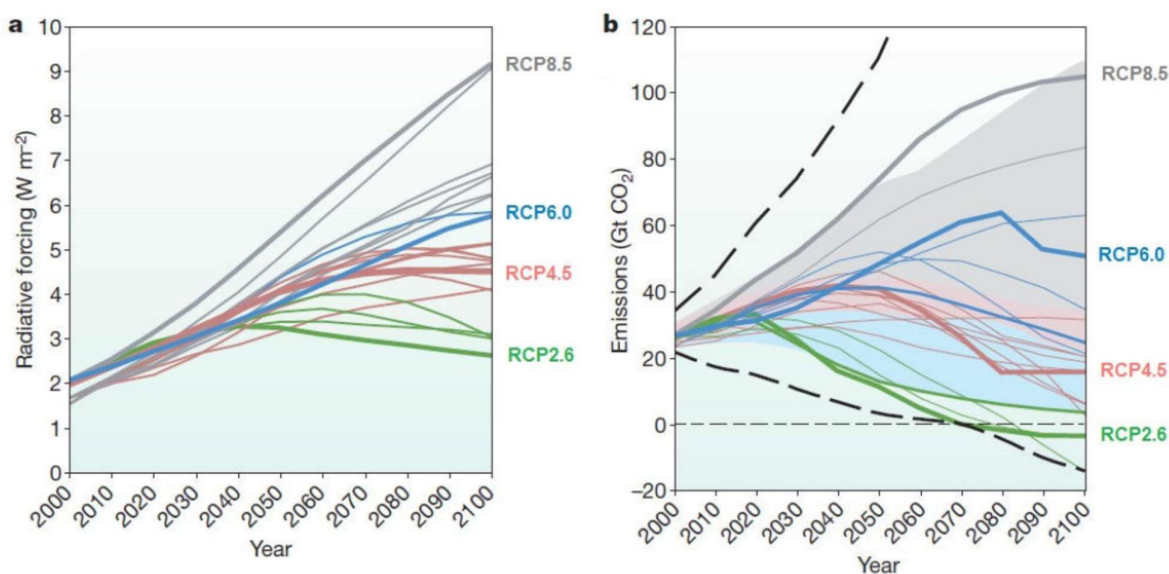
Με βάση τις εκτιμήσεις της Πέμπτης Έκθεσης Αξιολόγησης (Fifth Assessment Report- AR5) της IPCC, έχουν προταθεί τέσσερα κλιματικά σενάρια εκπομπών αερίων (Representative Concentration Pathways - RCPs), τα οποία συνδέονται με χρονοσειρές συγκεντρώσεων εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου, αιωρούμενων σωματιδίων και χημικά ενεργών αερίων στην ατμόσφαιρά, καθώς και με αλλαγές χρήσεων γης. Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τα τέσσερα αυτά διαφορετικά σενάρια είναι ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού, οι οικονομικές δραστηριότητες, ο τρόπος ζωής, οι πηγές ενέργειας, η τεχνολογική ανάπτυξη, οι μελλοντικές χρήσεις γης και η γενικότερη πολιτική απέναντι στις κλιματικές αλλαγές. Στα σενάρια αυτά περιλαμβάνονται ένα ήπιο σενάριο (RCP2.6), δύο μέτρια (RCP4.5 και RCP6.0) και ένα σενάριο με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου (RCP8.5). Το RCP2.6 είναι ένα αντιπροσωπευτικό σενάριο στο οποίο η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας συγκριτικά με την προ-βιομηχανική εποχή εκτιμάται κάτω από 2°C (IPCC, 2014).

Στη συγκεκριμένη εργασία, οι κλιματικές προβλέψεις έχουν βασιστεί στο μέτριο (RCP4.5) και στο ακραίο σενάριο (RCP8.5), τα οποία περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω:

Το **RCP4.5** αναπτύχθηκε από την ομάδα GCAM του ινστιτούτου Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute (JGCRI) των Ηνωμένων Πολιτειών. Πρόκειται για ένα σενάριο σταθεροποίησης κατά το οποίο το ενεργειακό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας σταθεροποιείται μετά το 2100, χωρίς να υπερβαίνει τον μακροπρόθεσμο στόχο (Clarke et al. 2007). Το συγκεκριμένο σενάριο λαμβάνει υπόψη ότι θα υλοποιηθούν προγράμματα αναδάσωσης και ότι θα πραγματοποιηθούν αλλαγές στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Επιπλέον οι εκπομπές μεθανίου αναμένονται να είναι σταθερές, ενώ οι εκπομπές CO₂ επιτρέπεται να αυξηθούν με αργούς ρυθμούς έως το 2040 και να αρχίσουν να μειώνονται από τότε και μετά. Το RCP4.5 αντιπροσωπεύει γενική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας και στη χρήση ορυκτών

καυσίμων, ενώ υποθέτει αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της χρήσης πυρηνικής ενέργειας (Thomson et al., 2011).

Το **RCP8.5** αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο MESSAGE και το IIASA Integrated Assessment Framework του International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) στην Αυστρία. Το σενάριο αυτό χαρακτηρίζεται από αυξανόμενες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οδηγώντας σε υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου (Riahi et al. 2007). Αναπαριστά μία μελλοντική κατάσταση κατά την οποία δεν θα υλοποιηθούν πολιτικές μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου και οι εκπομπές μεθανίου και N_2O θα αυξηθούν με ταχείς ρυθμούς μέχρι το τέλος του αιώνα. Θα αυξηθεί η χρήση γης λόγω του αυξανόμενου πληθυσμού καθώς και η χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας και για τη μετακίνηση (Riahi et al., 2011).



Εικόνα 2-4 Κλιματικά σενάρια (Representative Concentration Pathways - RCPs): α) αλλαγή της ενίσχυσης της ακτινοβολίας (radiative forcing) συγκριτικά με την προ-βιομηχανική εποχή και β) εκπομπές CO₂ για τα διάφορα RCPs σενάρια. Με έντονο χρώμα σημειώνονται τα τέσσερα RCPs σενάρια και με λεπτές γραμμές τα μεμονωμένα σενάρια από 30 περίπου υποψήφια RCPs σενάρια (Moss et al., 2010)

2.4 Στόχος Αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση των προβλέψεων της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης των περιοχικών μοντέλων χρησιμοποιούμε ως παρατηρήσεις αναφοράς τα ημερήσια πλεγματικά δεδομένα E-OBS (έκδοση 13) (Haylock et al., 2008). Τα E-OBS καλύπτουν ολόκληρη την Ευρώπη και βασίζονται σε σύνολο δεδομένων των σταθμών ECA & D (European Climate Assessment and Dataset) και επιπλέον σε περισσότερους από 2000 σταθμούς από διαφορετικά αρχεία. Διατίθεται σε τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις, ενώ εδώ χρησιμοποιούμε την έκδοση 0.22°, η οποία εφαρμόζει την πλεγματική περιστροφή των πειραμάτων EURO-CORDEX. Το πλέγμα των δεδομένων E-OBS 0.22° αντιστοιχεί σε οριζόντια ανάλυση περίπου 25 km. Κάθε 'κουτί' πλέγματος E-OBS 0.22° περιέχει τέσσερα κουτιά του πλέγματος 0.11° EURO-CORDEX. Σύμφωνα με

τον Kotlarski et al. (2014), προηγούμενες μελέτες αμφισβήτησαν την ποιότητα των E-OBS σε περιοχές με αραιή κάλυψη σε σταθμούς και ιδιαίτερα σε ημέρες με ακραίες συνθήκες (Bellprat et al., 2012; Kyselý and Plavcová, 2010; Rajczak et al., 2013) και την αποτελεσματική χωρική ανάλυσή τους (π.χ., Hanel and Buishand, 2011, Kyselý and Plavcová, 2010). Υψηλότερες αποκλίσεις βρέθηκαν σε περιοχές με μικρότερη πυκνότητα σταθμών και σε περιοχές με πολύπλοκα εδάφη όπου η παρεμβολή συνήθως υποβαθμίζεται. Ωστόσο, το ξεκάθαρο πλεονέκτημα των δεδομένων E-OBS είναι η χωρική κάλυψη ολόκληρης της Ευρώπης καθώς και η μεγάλη χρονική κάλυψη (1950-2012), γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για την κατά προσέγγιση αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των προβλέψεων της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης από τα περιοχικά μοντέλα (RCMs) στην Ευρώπη.

3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Μοντέλα που αξιολογούνται

Στα πλαίσια του συγκεκριμένου προγράμματος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας ένα σύνολο τεσσάρων περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCM) του **EURO-CORDEX** (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment). Τα συγκεκριμένα μοντέλα χαρακτηρίζονται από 12km (0.11°) οριζόντια ανάλυση και είναι τα εξής:

- Το περιοχικό κλιματικό μοντέλο RCA4 του SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) (Stranberg et al., 2014) οδηγούμενο από 3 διαφορετικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας: το CNRM-CM5 (Voldoire et al., 2012) από εδώ και στο εξής **CNRM-RCA4**, το Hadley Centre Global Environmental Model version 2 Earth System, το οποίο εν συντομία αναφέρεται ως Had GEM-ES (HadGEM) (Collins et al., 2011; Martin et al., 2011), του Met Office Hadley Centre (MOHC), από εδώ και στο εξής **MOHC-RCA4** και το μοντέλο του Max Planck Institute for Meteorology, το MPI-ESM-LR (Pope et al., 2013), από εδώ και στο εξής **MPI-RCA4**.
- Η έκδοση 5.2 του περιοχικού μοντέλου ALADINRCM του CNRM (Météo France Institute) (Herrmann et al., 2011) οδηγούμενο από το CNRM-CM5 (Voldoire et al., 2012), από εδώ και στο εξής **CNRM-ALADIN**.

Οι τρεις πρώτες προσομοιώσεις ουσιαστικά πραγματοποιούνται από το περιοχικό μοντέλο SMHI χρησιμοποιώντας οριακές συνθήκες από τρία διαφορετικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (CNRM, MOHC και MPI), οι οποίες καθιστούν τις προσομοιώσεις τόσο διαφορετικές μεταξύ τους ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ως τρία ξεχωριστά μοντέλα.

Όλα τα μοντέλα παρέχουν ημερήσια δεδομένα για την περίοδο 1970-2100. Οι προσομοιώσεις που αφορούν στις τωρινές συνθήκες καλύπτουν την περίοδο 1970-2005, ενώ τα σενάρια μελλοντικών εκπομπών της IPCC, RCP4.5 και RCP8.5, χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις μετά το 2005, καλύπτοντας την περίοδο 2006-2100.

3.2 Δεδομένα παρατηρήσεων

Δεδομένα παρατηρήσεων θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από το σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Θησείο) συνελέχθησαν για του σκοπούς του προγράμματος. Τα δεδομένα θερμοκρασίας αφορούν σε μέγιστες, ελάχιστες και μέσες ημερήσιες τιμές και τα δεδομένα βροχόπτωσης σε συνολική ημερήσια βροχόπτωση. Οι παρατηρήσεις καλύπτουν την περίοδο 1996-2014.

3.3 Μέθοδος Ανάλυσης

Η μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιείται, εφαρμόζεται σε εποχικές και ετήσιες μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για όλα τα μοντέλα. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες μελέτες (Kotlarski et al., 2014) και αποτελεί ένα καλά τεκμηριωμένο μέτρο που αξιολογεί την ποιότητα των

κλιματικών προσομοιώσεων των περιοχικών μοντέλων σε σύγκριση με τα πλεγματικά δεδομένα αναφοράς. Επίσης, αντιπροσωπεύει τα χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά των σφαλμάτων και καταδεικνύει την αναπόφευκτη εξάπλωση των επιδόσεων των μοντέλων στην αναπαραγωγή του σημερινού κλίματος.

3.4 Περιγραφή και μεθοδολογία εφαρμογής περιοχικού μοντέλου ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Στην παρούσα μελέτη, προτείνεται να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο ατμοσφαιρικής ρύπανσης 'The Air Pollution Model' TAPM (Hurley et al., 2008). Το TAPM είναι ένα τρισδιάστατο ατμοσφαιρικό μοντέλο που προσομοιώνει τις φυσικοχημικές ατμοσφαιρικές διεργασίες στην επιλεγμένη περιοχή προσομοίωσης, σε υψηλή χωρική ανάλυση (κυψελίδες 1000m). Το μοντέλο αναπτύχθηκε και διατίθεται από το εθνικό ερευνητικό κέντρο CSIRO της Αυστραλίας. Αποτελεί ένα προγνωστικό εργαλείο προσομοίωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με Graphical User Interface (GUI), που εγκαθίσταται και εκτελείται με υψηλή ταχύτητα και αποτελεσματικά σε μικρές υπολογιστικές μονάδες (PC).

Η συνιστώσα του TAPM που αφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελείται από 4 υπο-μοντέλα. 1) Το μοντέλο τύπου Euler που λύνει την εξίσωση της συνέχειας και υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων ανά κελί και ανά ώρα για την επιλεγμένη περιοχή και περίοδο προσομοίωσης. Οι προσομοιώσεις είναι υψηλής χωρικής ανάλυσης (1000 m), με την μέθοδο της τηλεσκοπικής εστίασης, πάνω από μεγάλες γεωγραφικές περιοχές (πχ 1000km²), εστιάζοντας σε επιλεγμένες περιοχές (πχ 5km²). Σχετικά με απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο, για να προσομοιωθεί ένα ημερολογιακό έτος (πχ με τηλεσκοπική εστίαση χωρικής ανάλυσης από 64 σε 16, 4 και 1km) χρειάζεται περίπου 10 ημέρες, 2) Το μοντέλο τύπου Lagrange που προσομοιώνει την διασπορά κατάντι πηγών, 3) Το μοντέλο ανύψωσης πλουμίου που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής και της ανύψωσης από τις σημειακές πηγές και 4) μοντέλο προσομοίωσης της επίδρασης των κτιρίων που θέτει την διασπορά εξαρτημένη από τις επιδράσεις των κτιρίων στην τοπική μετεωρολογία και την τύρβη.

Το TAPM προσομοιώνει την αέρια φωτοχημεία, χημεία αέριας και υγρής φάσης για το SO₂ και τα σωματίδια, καθώς και την σωματιδιακή σκόνη. Οι ρύποι για τους οποίους λαμβάνονται δεδομένα εξόδου είναι: HF, VOC, CO ή CO₂, NOX, NO₂, O₃, SO₂, και αιωρούμενα σωματίδια.

Τα βασικά δεδομένα εισόδου στο μοντέλο είναι η μετεωρολογία και οι εκπομπές αέριας ρύπανσης.

Μετεωρολογία: Το μοντέλο είναι συμβατό τόσο με τα NCE Pre analysis όσο και με τα ECMWF ERA5 reanalysis ensemble means.

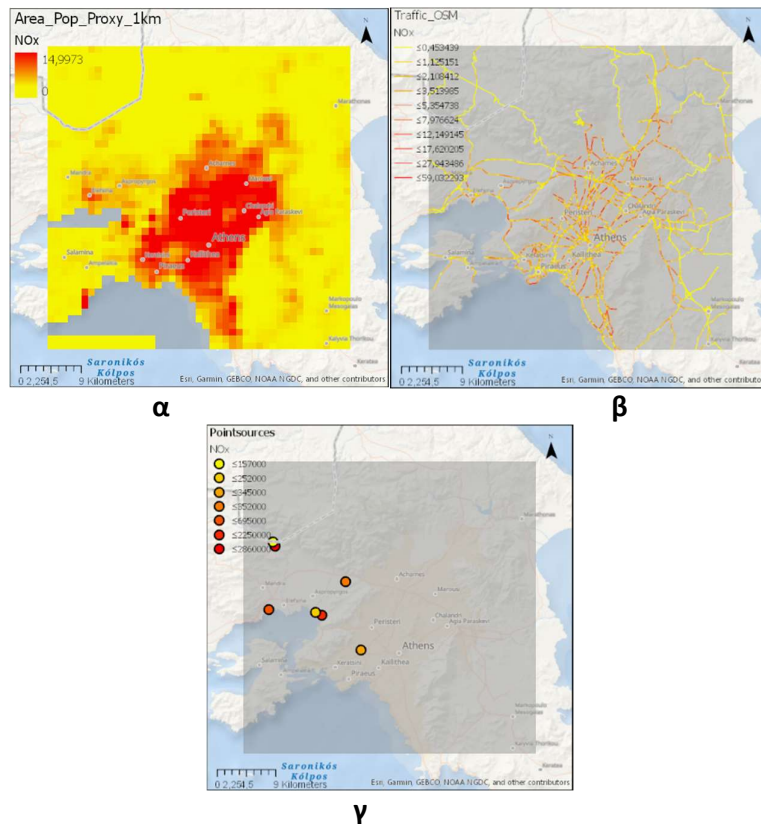
Εκπομπές: Δέχεται ρυθμούς εκπομπής ρύπων που προέρχονται από 3 τύπους πηγών: επιφανειακές (πχ οικιακή θέρμανση, λιμάνια, αεροδρόμια), σημειακές (πχ βιομηχανικές καμινάδες) και γραμμικές (πχ οδικό δίκτυο).

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις θα γίνουν χρησιμοποιώντας την μέθοδο της τηλεσκοπικής εστίασης, σε περιοχές κεντραρισμένες πάνω από την ευρύτερη περιοχή των Αθηνών. Οι περίοδοι προσομοίωσης θα επιλεγούν σε συμβατότητα με τις εφαρμογές του περιοχικού μοντέλου προσομοίωσης της μετεωρολογίας, τόσο για το έτος αναφοράς όσο και τα ενδεικτικά έτη του μεσο- και μακρο-πρόθεσμου μέλλοντος.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που θα τροφοδοτήσουν τις προσομοιώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης θα είναι συμβατά με αυτά που θα εισαχθούν στο περιοχικό μοντέλο προσομοίωσης της μετεωρολογίας.

Οι εκπομπές ρύπανσης βασίζονται στην ευρωπαϊκή βάση CAMS-REG, αλλά έχουν τροποποιηθεί σε υψηλής χωρικής ανάλυσης ωριαίους ρυθμούς εκπομπής των αέριων ρύπων, με τη χρήση αξιόπιστων διαθέσιμων μεταβλητών (proxies) υψηλής χωρικής ανάλυσης (Εικόνα 3-1).

Το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα για τη διερεύνηση σεναρίων από αλλαγή στις εκπομπές σε τομεακή κλίμακα και άλλων παρεμβάσεων που θα επιλεγθούν.



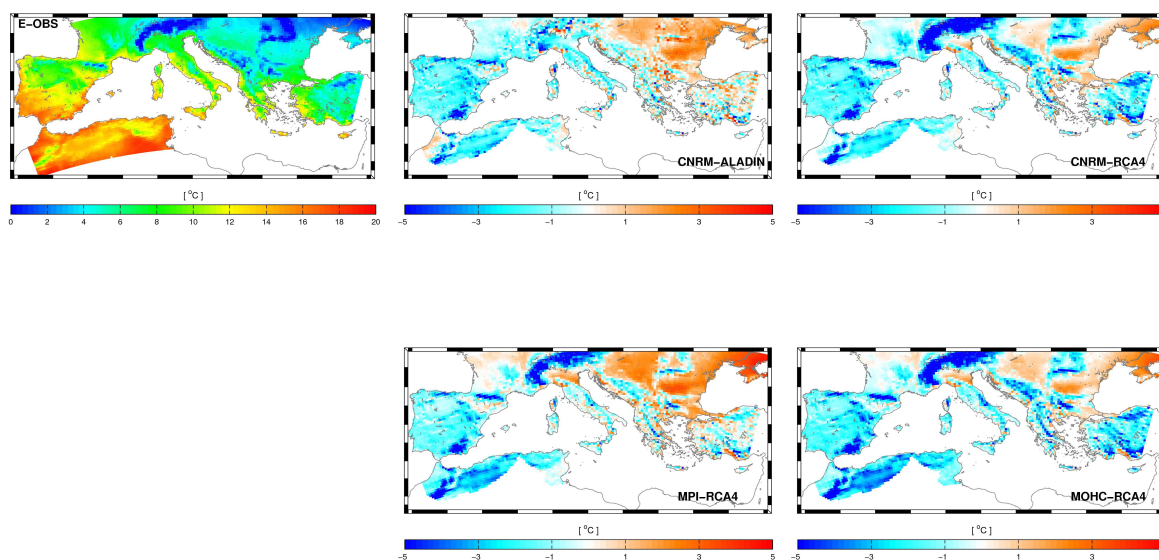
Εικόνα 3-1 Εκπομπές NO₂ από α) επιφανειακές, β) γραμμικές και γ) σημειακές πηγές της ευρύτερης περιφέρειας Αττικής με χωρική ανάλυση 1x1 km

4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

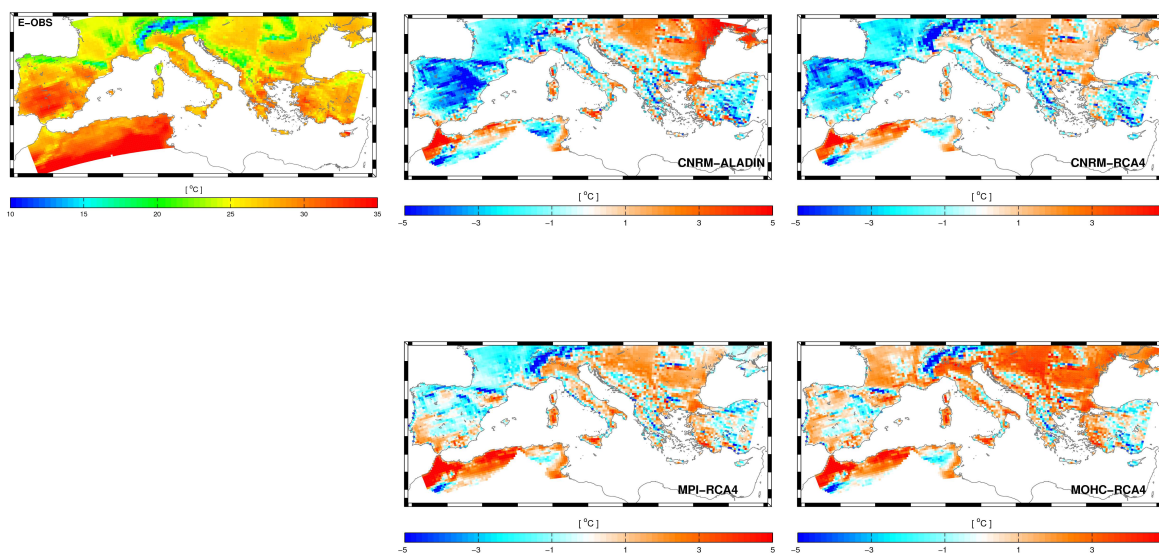
4.1 Προσομοιωμένο και παρατηρημένο μέσο κλίμα

Στις εικόνες 4-1 έως 4-4 φαίνεται η χωρική κατανομή της μέσης θερινής και χειμερινής απόκλισης της 35ετίας των μοντέλων για τη μέγιστη θερμοκρασία (ΤΧ) και βροχόπτωση. Το χειμώνα (Εικόνα 4-1) οι θερμοκρασία υποεκτιμάται για μεγάλα τμήματα της υπό εξέταση έκτασης. Οι αρνητικές αποκλίσεις κυμαίνονται από -1 έως -3 °C, με τις μεγαλύτερες αρνητικές τιμές μεταξύ των Άλπεων και της Ιβηρικής χερσονήσου. Για την Αθήνα (Περιστέρι) η πλειοψηφία των μοντέλων (CNRM-ALDIN, CNRM-RCA4 και MPI-RCA4) έχουν θερμή απόκλιση κατά 1 °C, με εξαίρεση το MOHC-RCA4 όπου η ψυχρή απόκλιση είναι λιγότερη από 1 °C. Στα CNRMRCMs η απόκλιση των ψυχρών θερμοκρασιών είναι εμφανής στις περισσότερες περιοχές της Μεσογείου (Εικόνα 4-2). Τα άλλα δύο μοντέλα (MPI-RCA4 και MOHC-RCA4) έχουν μία τάση να υπερεκτιμούν τη θερινή θερμοκρασία στις περισσότερες περιοχές της Μεσογείου. Για την Αθήνα όλα τα μοντέλα αποκλίνουν από τα E-OBS από -0.5 έως 0.5 °C.

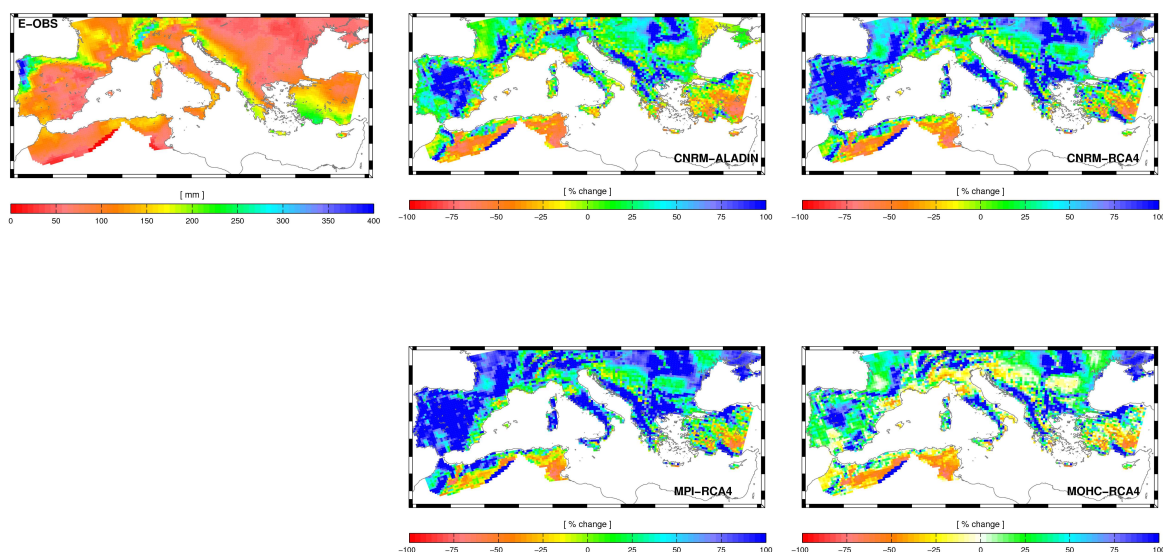
Όσον αφορά στη μέση εποχική βροχόπτωση, η αξιολόγηση δείχνει μία υγρή χειμερινή απόκλιση σχεδόν σε όλα τα μοντέλα και για τις περισσότερες περιοχές της Μεσογείου (Εικόνα 4-3). Η απόκλιση φτάνει και το 50% για την Ιβηρική χερσόνησο και τα Βαλκάνια. Για την Αθήνα όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν μία υγρή απόκλιση της τάξεως του 25%.



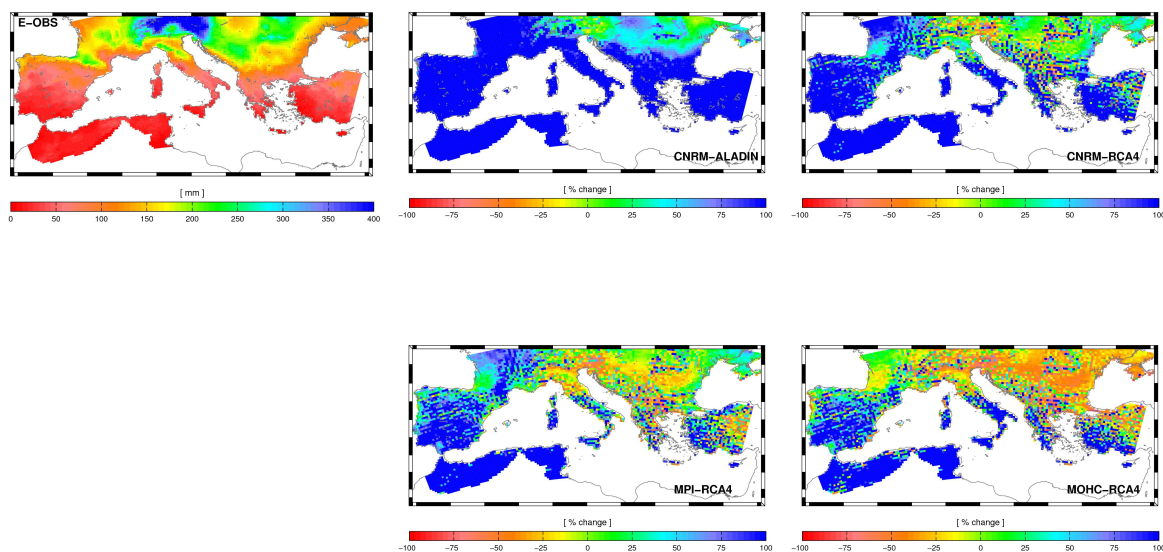
Εικόνα 4-1 Μέση χειμερινή απόκλιση της μέγιστης θερμοκρασίας για όλα τα μοντέλα και για την περίοδο 1971-2005. Το πάνω αριστερά σχήμα δείχνει την οριζόντια κατανομή της μέσης εποχικής θερμοκρασίας, όπως προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς E-OBS.



Εικόνα 4-2 Όπως στην Εικ. 4-1, αλλά για τη μέση μέγιστη θερινή θερμοκρασία.



Εικόνα 4-3 Όπως στην Εικ. 4-1, αλλά για τη μέση απόκλιση της χειμερινής βροχόπτωσης. Το πάνω αριστερά σχήμα δείχνει την οριζόντια κατανομή της μέσης χειμερινής βροχόπτωσης, όπως προέκυψε από τα δεδομένα αναφοράς E-OBS.



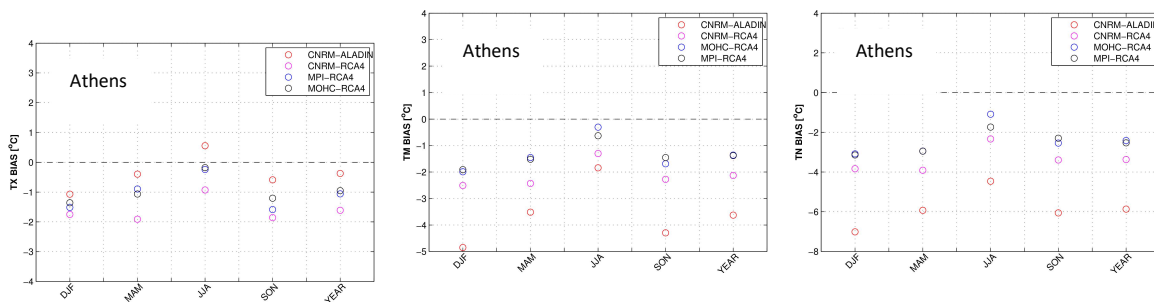
Εικόνα 4-4 Όπως στην Εικ. 4-3, αλλά για τη μέση μέγιστη θερινή βροχόπτωση

Στις Εικ. 4-5 και 4-6 συνοψίζονται οι μέσες αποκλίσεις των μέσων εποχικών και ετήσιων θερμοκρασιών και της βροχόπτωσης για την Αθήνα. Να σημειωθεί ότι οι αποκλίσεις υπολογίστηκαν μεταξύ των δεδομένων των παρατηρήσεων και του πλησιέστερου σημείου πλέγματος των μοντέλων. Οι υπολογισμοί αφορούν στο χρονικό διάστημα 1970-2005. Όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν μία ψυχρή απόκλιση μικρότερη των 2°C για τη μέση μέγιστη θερμοκρασία. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και για την ελάχιστη και μέση θερμοκρασία, αν και οι ψυχρότερη απόκλιση του CNRM-ALADIN μοντέλου είναι υψηλότερη από την TX

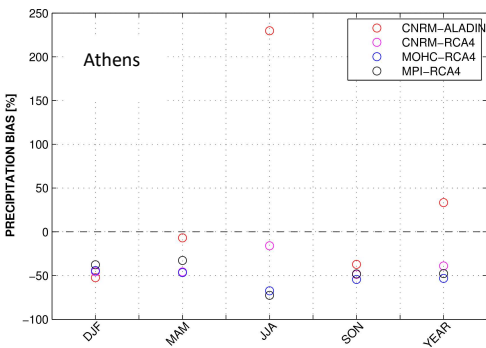
κατά 1°C περίπου. Επιπλέον, τα MPI-RCA4 και MOHC-RCA4 παρουσιάζουν παρόμοια μεταξύ τους αποτελέσματα με τις μικρότερες θερμές και ψυχρές αποκλίσεις.

Όσον αφορά στις μέσες αποκλίσεις για τη βροχόπτωση (Εικ. 4-6), το CNRM-ALADIN model παρουσιάζει πολύ υψηλή θερινή υγρή απόκλιση, ενώ τα υπόλοιπα μοντέλα παρουσιάζουν και υγρές και θερμές αποκλίσεις μικρότερης όμως κλίμακας.

Λαμβάνοντας υπ'όψιν τα παραπάνω αποτελέσματα, καταλήγουμε ότι τα μοντέλα MOHC-RCA4 και MPI-RCA4 είναι αυτά που αποτυπώνουν καλύτερα τα παρατηρούμενα εποχικά μοτίβα της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης.



Εικόνα 4-5 Μέση εποχική και ετήσια απόκλιση της μέγιστης (TX), ελάχιστης (TN) και μέσης ημερήσιας (TM) θερμοκρασίας για τα EURO-CORDEX μοντέλα για την Αθήνα



Εικόνα 4-6 Όπως στην εικόνα 4-5, αλλά για την εποχική και ετήσια απόκλιση για τη βροχόπτωση

5 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΕ ΥΨΗΛΗ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ-ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΧΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην παρούσα μελέτη θα παραχθούν κλιματικές προσομοιώσεις σε υψηλή χωρική ανάλυση (1x1 km). Για το σκοπό αυτό θα συνδυαστούν τα αποτελέσματα του περιοχικού μοντέλου WRF με αυτά του περιοχικού κλιματικού μοντέλου MPI-RCA4. Αναλυτικότερα, αρχικά θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση με το μοντέλο WRF, για ένα έτος το οποίο θα προκύψει από την ανάλυση μακρών χρονοσειρών παρατηρησιακών δεδομένων, ώστε να υπολογιστούν τα πεδία των μετεωρολογικών μεταβλητών ενδιαφέροντος σε πλέγμα χωρικής ανάλυσης 1x1km. Στη συνέχεια, τα δεδομένα του περιοχικού κλιματικού μοντέλου θα επαναχарτογραφηθούν (remapping) στο συγκεκριμένο πλέγμα χωρικής ανάλυσης και θα εφαρμοστεί μέθοδος διόρθωσης των συστηματικών σφαλμάτων (biascorrection) του περιοχικού κλιματικού μοντέλου σε σχέση με τα δεδομένα του WRF. Κατά αυτόν τον τρόπο συνδυάζεται η υψηλή χωρική ανάλυση του WRF με τις πολυετείς μελλοντικές προσομοιώσεις του περιοχικού κλιματικού μοντέλου

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα μοντέλα που αξιολογούνται στην παρούσα έκθεση, προσομοιώνουν αρκετά καλά τα βασικά χαρακτηριστικά του κλίματος της Αθήνας και της ευρύτερης περιοχής της Μεσογείου. Ως γενικό συμπέρασμα από τη σύγκριση των μοντέλων προκύπτει ότι τα μοντέλα MOHC-RCA4 και MPI-RCA4 είναι αυτά που αποτυπώνουν καλύτερα τα παρατηρούμενα εποχικά μοτίβα της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης. Μεταξύ των δύο, το MPI-RCA4 δίνει αποτελέσματα που προσεγγίζουν καλύτερα το κλίμα της Αθήνας, όπως αυτό αποτυπώνεται από τα παρατηρησιακά δεδομένα. Επομένως, για τις μακροπρόθεσμες κλιματικές προβλέψεις στη συνέχεια του έργου θα χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο μοντέλο.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bellprat O., Kotlarski S., Lüthi D., Schär C.: *Exploring Perturbed Physics Ensembles in a Regional Climate Model. Journal of Climate*, 25(13), 4582–4599, , 2012(a)

Bruyère C.L., Done J.M., Holland G.J., Fredrick S.: *'Bias Corrections of Global Models for Regional Climate Simulations of High-Impact Weather'*, *Clim. Dyn.*, 43, 1847-1856, 2014

Clarke L, Edmonds J, Jacoby H, Pitcher H, Reilly J, Richels R: *CCSP synthesis and assessment product 2.1, Part A: scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentration*,. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 2007

Collins W. J., Bellouin N., Doutriaux-Boucher M., Gedney N., Halloran P., Hinton T., Woodward, S.: *Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2*, *Geosci. Model Dev.*, 4(4), 1051–1075. , 2011

Hanel M., Buishand, T.A.: *Multi-model analysis of RCM simulated 1-day to 30-day seasonal precipitation extremes in the Czech Republic*, *Hydrology Conference 2010*, 412–413(Supplement C), 141–150. , 2012

Haylock M. R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G. Klok E. J., Jones P. D., New M.: *A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D20), n/a-n/a. , 2008

Herrmann M., Somot S., Calmanti S., Dubois C., Sevault F.: *Representation of spatial and temporal variability of daily wind speed and of intense wind events over the Mediterranean Sea using dynamical downscaling: impact of the regional climate model configuration*, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(7), 1983–2001. , 2011

Hong S.-Y., Dudhia J., Chen S.-H.: *A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation*. *Mon. Wea. Rev.* 132: 103–120, 2004

Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J.: *A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes*. *Mon Wea Rev* 134: 2318-2341, 2006

Hurley P.J.: *'TAPMV4. Part 1: Technical Description'*, *CSIRO Marine and Atmospheric Research Paper No. 25*. 59 pp., 2008

Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D.: *Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models*. *J. Geophys. Res.*: 113, D13103, 2008

IPCC (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press

Jiménez P.A., Dudhia J., González-Rouco J.F., Navarro J., Montávez J.P., García-Bustamante E.: A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. *Monthly Weather Review* 140, 898–918, 2012

Kotlarski S., Keuler K., Christensen O.B., Colette A., Déqué M., Gobiet A., Wulfmeyer V.: *Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble*, *Geoscientific Model Development*, 7(4), 1297–1333. , 2014

Kyselý J., Plavcová E.: A critical remark on the applicability of E-OBS European gridded temperature data set for validating control climate simulations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D23), n/a-n/a., 2010

Moss, R., J. Edmonds, K. Hibbard, et al., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 463, 747–756, doi:10.1038/nature08823

Mysiak, J., Surminski, S., Thieken, A., Mechler, R. & Aerts, J. 2016, "Brief communication: Sendai framework for disaster risk reduction - Success or warning sign for Paris?", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 16, no. 10, pp. 2189-2193

Niu G.-Y., Yang Z.-L.: The effects of canopy processes on snow surface energy and mass balances, *J. Geophys. Res.* 109, D23111, 2004

Niu G.-Y., Yang Z.-L., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y.: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.*, 116, D12109, 2011

Papaggelis G., Tombrou M., Dandou A., Kontos T.: An urban "green planning" approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. A case study of Athens, Greece. *Landscape and Urban Planning* 105: 174– 183, 2012

Popke D., Stevens B., Voice A.: Climate and climate change in a radiative-convective equilibrium version of ECHAM6, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5(1), 1-14, doi: 10.1029/2012MS000191, 2013

Rajczak J., Pall P., Schär C.: Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(9), 3610–3626. , 2013

Riahi K., Rao S., Krey V., Cho C., Chirkov V., Fischer G., Kindermann G., Nakicenovic N., Rafaj P.: RCP8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions, *Climatic Change*. 109:33, 2011

Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G.: *A description of the advanced research WRF version 3. NCAR TECHNICAL NOTE, NCAR/TN-475+STR, 113 pp., 2008*

Strandberg G., Bärring A., Hansson U., Jansson C., Jones C., Kjellström E.: *CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4, Reports Meteorology and Climatology, 116, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sverige, 2014*

Tewari M., Chen F., Kusaka H., Miao S.: *Coupled WRF/Unified Noah/urban-canopy modeling system. NCAR WRF Documentation. Boulder: NCAR, 1–20, 2007*

Voltaire A., Sanchez-Gomez E., Salas y Méria D., Decharme B., Cassou C., SéréniS., Chauvin F.: *The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation, Climate Dynamics, 40(9), 2091–2121., 2012*

Yang R., Friedl M. A.: *Modeling the effects of three-dimensional vegetation structure on surface radiation and energy balance in boreal forests, J. Geophys. Res. 108(D16), 8615, 2003*