

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΠΙΝΔΟ ΜΕΧΡΙ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ 21^{ΟΥ} ΑΙΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝΤΟΥ ENSEMBLES

Στεφανίδης Στέφανος

Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων, Τμήμα Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη, ststefanid@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αξιολογείται η ικανότητα των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) να προσομοιώνουν τις θερμοκρασίες του αέρα στον ορεινό όγκο της κεντρικής Πίνδου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικοί σταθμοί που βρίσκονται στον ορεινό χώρο και διαθέτουν μακροχρόνιες χρονοσειρές θερμοκρασίας καθώς και δεδομένα από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα ENSEMBLES. Κατά την αξιολόγηση, συγκρίθηκαν τα δεδομένα των σταθμών με το κοντινότερο σημείο πλέγματος των RMCs για την περίοδο βάσης 1974-2000. Ως δείκτες αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και το BIAS. Από την αξιολόγηση προέκυψε πως καλύτερη προσομοίωση της θερμοκρασίας παρουσιάζει το μοντέλο ICTP (RegCM3) και έπεται το μοντέλο του HC (METO- HC_HadR M3Q0). Τέλος σε ότι αφορά τις μελλοντικές εκτιμήσεις για την περίοδο 2074-2100 καταγράφονται τάσεις αύξησης της μηνιαίας θερμοκρασίας κατά 3,7 °C σύμφωνα με το πρώτο μοντέλο και 4,8 °C σύμφωνα με το δεύτερο, ομοίμορφα κατανεμημένες στους μήνες του έτους.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: θερμοκρασία, χρονοσειρές, RCMs, κλιματική αλλαγή

FUTURE ESTIMATIONS OF TEMPERATURE CHANGE OVER CENTRAL PINDUS UNTIL THE END OF THE 21TH CENTURY USING REGIONAL CLIMATE MODELS OF ENSEMBLES

Stefanidis Stefanos

Laboratory of Mountainous Water Management and Control, Faculty of Forestry & Natural Environment, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki, ststefanid@gmail.com

ABSTRACT

In this study the ability of regional climate models (RCMs) to represent temperature condition over mountainous area of central Pindus were evaluated. In order to achieve the goals of the current research, temperature data from mountainous meteorological stations with long-term time series and data from the European project ENSEMBLES were used. During the evaluation process temperature data from meteorological stations were compared with data from the nearest grid point of RCMs, for the base period 1974-2000. As evaluator indexes RMSE, MAE and BIAS were used. The results showed that best simulations were made from the model ICTP (RegCM3) and followed the model HC (METO- HC_HadR M3Q0). Finally, regarding the future estimations for the period 2074-2100, increase trend in monthly temperature was recorded around 3,7 °C according the first model and 4,8 °C due the second one, evenly distributed through the months of the year.

KEY WORDS: temperature, time series, RCMs, climate change

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κλιματικό σύστημα είναι ένα σύνθετο σύστημα αλληλεπιδράσεων, που αποτελείται από την ατμόσφαιρα, την επιφάνεια της γης, τα χιόνια και τους πάγους, τους ωκεανούς, τα λοιπά επιφανειακά και υπόγεια νερά των ηπείρων και τους ζωντανούς οργανισμούς (IPCC, 2007). Για την περιγραφή του κλίματος χρησιμοποιείται ο μέσος όρος και η μεταβλητότητα μετεωρολογικών παραμέτρων όπως βροχόπτωση, θερμοκρασία, άνεμος κλπ, για χρονική διάρκεια τουλάχιστον 30 έτη. Το κλιματικό σύστημα εξελίσσεται κάτω από την επίδραση της εσωτερικής του δυναμικής και εξαιτίας αλλαγών σε διάφορους εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα.

Η θερμοκρασία του αέρα είναι ένα συνεχές στοιχείο (έχει πάντα κάποια τιμή) και θεωρείται ένα από τα βασικότερα στοιχεία που διαμορφώνει το κλίμα μίας περιοχής. Παρουσιάζει μεγάλη ημερήσια και ετήσια κύμανση και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, τον προσανατολισμό και την απόσταση από την θάλασσα. Το μέγεθος και οι μεταβολές της θερμοκρασίας αέρα επηρεάζουν πολλές διεργασίες, όπως για παράδειγμα την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες, την εξατμισοδιαπνοή των φυτών, το είδος των κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι) καθώς και την ένταση των αποσθρώσεων, και της ποσότητας των παραγόμενων φερτών υλικών, από τις ορεινές λεκάνες απορροής (Στάθης, 1998).

Με τον όρο κλιματική αλλαγή αναφερόμαστε στη μεταβολή των μέσων όρων των μετεωρολογικών συνθηκών όπως προκύπτουν από μια σειρά συνεχών παρατηρήσεων με διάρκεια ίση ή μεγαλύτερη από 30 χρόνια (Ahrens 2003). Τέτοιου τύπου μεταβολές περιλαμβάνουν στατιστικά σημαντικές διακυμάνσεις ως προς τη μέση κατάσταση ή τη μεταβλητότητα του κλίματος. Οι κλιματικές αλλαγές οφείλονται σε φυσικές διαδικασίες, καθώς και στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Όποια κι αν είναι τα πραγματικά αίτια για τις κλιματικές μεταβολές, οι βασικοί μηχανισμοί της δημιουργίας τους φαίνεται ότι έχουν σχέση με τις μεταβολές στο ενεργειακό ισοζύγιο στην επιφάνεια της Γης και στη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας (Στάθης, 2015).

Σύμφωνα με την έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για το κλίμα (IPCC) που δημοσιεύτηκε το 2007, το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί πλέον αδιαμφισβήτητο γεγονός. Σε ότι αφορά την χώρα μας έχουν καταγραφεί τάσεις αύξησης των θερμοκρασιών αέρα (Tolika, 2008, Tolika et al., 2012, Nastos and Kapsomenakis, 2015, Feidas, 2017, Mamara et al., 2017, Paparrizos and Matzarakis, 2017).

Οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στα οικοσυστήματα αλλά και στις ανθρώπινες δραστηριότητες καθιστά επιτακτική επιτακτική την ανάγκη μελέτης του μελλοντικού κλίματος (Gedney et al., 2006, Wu et al., 2012, Papadaki et al., 2016). Τα κλιματικά μοντέλα είναι αξιόπιστο εργαλείο στην εκτίμηση κλιματικών αλλαγών, προσπαθώντας να αναπαραστήσουν το κλίμα χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις φυσικούς νόμους. Τα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούν σενάρια εκπομπών (SRES) για την μελέτη πιθανών αλλαγών στο κλίμα. Τα σενάρια αυτά αποτελούν μία προσπάθεια αναπαράστασης της εξέλιξης των μελλοντικών εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων λαμβάνοντας υπόψη δημογραφικές αλλαγές, κοινωνικοοικονομική και τεχνολογική εξέλιξη καθώς και άλλους παράγοντες που έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν τις εκπομπές των αερίων όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και το διοξείδιο του θείου (SO₂).

Τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (GCMs) είναι αριθμητικά μοντέλα που προσομοιώνουν τις φυσικές διαδικασίες στην ατμόσφαιρα, τον ωκεανό, την κρυόσφαιρα και την επιφάνεια του εδάφους, βασιζόμενα στους νόμους διατήρησης της ορμής, της μάζας, της ολικής ενέργειας και της ποσότητας των υδρατμών. Αποτελούν τα μοναδικά κλιματικά εργαλεία που μπορούν, συνδυαζόμενα με περιφερειακά μοντέλα, να αποδώσουν φυσικές και γεωγραφικές εκτιμήσεις σχετιζόμενες με την τοπική αλλαγή κλίματος. Αποτελούν εργαλεία

προσομοίωσης της απόκρισης του κλίματος στις αυξανόμενες συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου και έχουν την δυνατότητα να παρέχουν εκτιμήσεις της τοπικής αλλαγής του κλίματος.

Η χωρική ανάλυση των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη 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 (Mearns et al. 2001).

Χρησιμοποιώντας ως βάση τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (AOGCMs) και διάφορες μεθόδους υποβιβασμού κλίμακας, κατέστη δυνατή η απόκτηση ακριβέστερων δεδομένων σε υψηλότερη ανάλυση. Οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις δυναμικές και τις στατιστικές. Οι δυναμικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τα Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα (RCMs) ενώ οι στατιστικές χρησιμοποιούν τις παρατηρούμενες σχέσεις ανάμεσα στη μεγάλη κλίμακα κυκλοφορία και στο τοπικό κλίμα (Τολίκα 2005). 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 επανάλυση (reanalysis).

Στην παρούσα εργασία αξιολογείται η καταλληλότητα των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) του Ευρωπαϊκού προγράμματος ENSEMBLES να προσομοιώνουν τις μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή αυτών στο μέλλον λόγω κλιματικής αλλαγής. Η μελέτη έχει ιδιαίτερη σημασία, αφού δεν έχουν γίνει αξιολογήσεις της καταλληλότητας των μοντέλων αυτών καθώς και εκτίμηση του μεγέθους τις μελλοντικής μεταβολής της θερμοκρασίας, λόγω κλιματικής αλλαγής με βάση δεδομένα ορεινών μετεωρολογικών σταθμών.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στον ορεινό όγκο της κεντρικής Πίνδου. Η περιοχή παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον επειδή τροφοδοτεί μεγάλο μέρος της ηπειρωτικής Ελλάδας με νερό καθώς επίσης εμφανίζονται εντατικά χειμαρρικά φαινόμενα (αποσαθρώσεις και ολισθήσεις) λόγω των ευδιάβρωτων πετρωμάτων που απαντώνται (φλύσχης και ασβεστόλιθος). Επιπρόσθετα είναι από τις λίγες περιοχές που διαθέτουν μακροχρόνιες χρονοσειρές θερμοκρασίας αέρα. Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα δίνονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Μετεωρολογικοί σταθμοί στην περιοχή έρευνας

Α/Α	Μετεωρολογικός σταθμός	Συντεταγμένες		Υψόμετρο σταθμού (m)	Περίοδος παρατηρήσεων
		X	Y		
1	Μεγάλη Κερασιά	285600,09	4402608,09	500	1974-2016
2	Περτούλι	282117,05	4380487,00	1180	1961-2016

Το κλίμα της περιοχής μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεταβατικό (μεσογειακό-μεσευρωπαϊκό) με πολύομβρο και ψυχρό χειμώνα και σχετικά θερμό και ξηρό θέρος. Επίσης, η περιοχή ανήκει στο πανευρωπαϊκό δίκτυο προστασίας της φύσης Natura 2000 και συγκεκριμένα περιλαμβάνει τον Τόπο Κοινοτικής Σημασίας (TKΣ) σύμφωνα με τα κριτήρια της οδηγίας 92/43/ΕΟΚ με κωδικό GR1440002, «Κερκέτιο Όρος (Κόζιακας)».

Εντός της περιοχής έρευνας βρίσκεται και το Πανεπιστημιακό Δάσος Περτουλίου. Το δημόσιο δάσος Περτουλίου περιήλθε στη κυριότητα του Ελληνικού Κράτους, με τη σύμβαση της Κωνσταντινουπόλεως στις 24-5-1883 (Φ.Ε.Κ. 512/7-12-1883). Το δάσος αυτό, σύμφωνα

με το από 31.1.1935 Πρωτόκολλο Παράδοσης και Παραλαβής, που υπογράφηκε από το Υπουργείο Γεωργίας για την παράδοση και από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης για τη παραλαβή, παραχωρήθηκε κατά νομή μαζί με τα δημόσια νομήματα του. Η παραχώρηση έγινε ύστερα από το 15/12/1934 Προεδρικό Διάταγμα «Περί παραχώρησης κατά νομή εις το Πανεπιστήμιον Θεσσαλονίκης Δημοσίων δασών για σκοπούς εκπαιδευτικούς και ερευνών». Το δάσος βρίσκεται στην Κεντρική Πίνδο και εκτείνεται μεταξύ των ορεινών όγκων Κόζιακα και Μπορντούρα με συνολική έκταση 33.000 στρέμματα.

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στην έρευνα αυτή, για την εκτίμηση των μελλοντικών συνθηκών της θερμοκρασία αέρα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από επτά σύγχρονα περιοχικά μοντέλα, του Ευρωπαϊκού προγράμματος ENSEMBLE(<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>), με υψηλή χωρική ανάλυση (25x25 km). 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, περιοχική, πλανητική) και χρονικών (εποχική, δεκαετία, μεγαλύτερη από δεκαετία) κλιμάκων. Η εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος έγινε υπό το σενάριο SRESA1B. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται πληροφορίες για τα RCMs που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των RCMs που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα

Ακρωνύμιο	Ινστιτούτο Ανάπτυξης	Χωρική Ανάλυση	Κατακόρυφα Επίπεδα	Βασική Βιβλιογραφική Αναφορά
DMI- ECHAM	DMI, Denmark	0.22° x 0.22°	19	Christensen et al. 1998
ETHZ- CLM	ETHZ, Switzerland	0.22° x 0.22°	32	Böhm et al. 2006
METO- HC_HadR M3Q0	HC, UK	0.22° x 0.22°	19	Collins et al. 2006
ICTP- REGCM3	ICTP, Italy	0.22° x 0.22°	18	Giorgi & Shields 1999
KNMI- RACMO2	KNMI, Netherlands	0.22° x 0.22°	40	Meijgaard et al. 2008
MPI-M- REMO	MPI, Germany	0.22° x 0.22°	27	Jacob et al. 2001
SMHIRCA	SMHI, Sweden	0.22° x 0.22°	24	Kjellström et al. 2005

Για τον προσδιορισμό των συνθηκών του παρόντος κλίματος και της σύγκρισής τους με μελλοντικές κλιματικές συνθήκες και αλλαγές κρίνεται απαραίτητο να οριστεί μία περίοδος βάσης (baseline period). Σκόπιμο είναι να τονισθεί ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου θα πρέπει να συγκρίνονται μόνο με την περίοδο βάσης και όχι με προηγούμενα έτη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι στην πραγματικότητα δεν συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου με τις πραγματικές παρατηρήσεις αλλά ή μέση τιμή των αποτελεσμάτων με τη μέση τιμή των παρατηρήσεων, οπότε πρέπει οι μέσες τιμές να αναφέρονται στις ίδιες περιόδους. Λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών, ορίστηκε ως περίοδος βάσης η περίοδος 1974-2000 και η μελλοντική περίοδος 2074-2100.

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των μοντέλων να προσομοιώνουν το κλίμα της περιοχής έρευνας έγινε σύγκριση των δεδομένων των υφιστάμενων μετεωρολογικών

σταθμών με το κάθε φορά πλησιέστερο σημείο πλέγματος (grid point) των μοντέλων, για την περίοδο 1974-2000. Ως δείκτες αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν η τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και το BIAS. Το RMSE θεωρείται ένας από πιο αξιόπιστους δείκτες γιατί απεικονίζει την απόκλιση από τις παρατηρούμενες τιμές και όχι από την μέση τιμή, όπως συμβαίνει με την τυπική απόκλιση. Όπως είναι γνωστό το RMSE επηρεάζεται περισσότερο από τιμές με μεγάλο σφάλμα ενώ το MAE από πολλά μικρότερα σφάλματα. Τέλος το BIAS δίνει μια εικόνα τις συνολικής υποεκτίμησης ή υπερεκτίμησης. Ο συνδυασμός των παραπάνω δεικτών δίνει μία πλήρη εικόνα της καταλληλότητας του κάθε μοντέλου. Η μαθηματική εξίσωση του εκάστοτε δείκτη περιγράφεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (x_i - y_i)^2} \quad (3.1)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |x_i - y_i| \quad (3.2)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum x_i - y_i \quad (3.3)$$

όπου N είναι ο αριθμός των δειγμάτων, x_i και y_i οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες τιμές αντίστοιχα για $i=1,2,\dots,n$. Όσο μικρότερες είναι οι τιμές της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, τόσο πιο αξιόπιστη θεωρείται η πρόβλεψη.

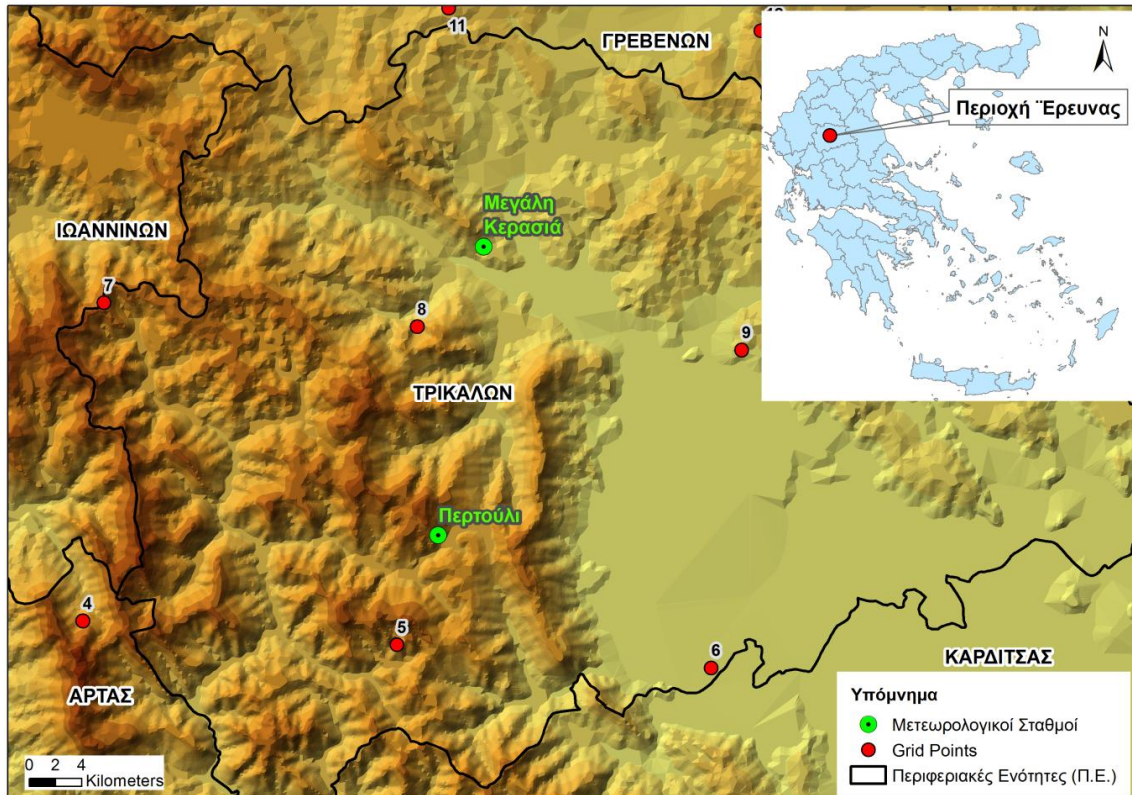
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) να προσομοιώνουν το κλίμα της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τα πλησιέστερα σημεία πλέγματος (grid points) στην περιοχή. Η κατανομή των σημείων πλέγματος στην ευρύτερη περιοχή έρευνας καθώς και η θέση των μετεωρολογικών σταθμών που διαθέτουν δεδομένα θερμοκρασίας αέρα δίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1).

Τα δεδομένα των σταθμών συγκρίθηκαν με τα δεδομένα από το πλησιέστερο σε κάθε σταθμό σημείο πλέγματος. Έτσι τα δεδομένα του σταθμού του Περτουλίου συγκρίθηκαν με το σημείο πλέγματος πέντε (5), που βρίσκεται σε απόσταση 8,9 km από τον σταθμό και έχει υψομετρική διαφορά +140 m, ενώ του σταθμού της Μεγάλης Κερασιάς με το σημείο πλέγματος οχτώ (8), που απέχει 7,8 km και έχει υψομετρική διαφορά +340 m. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για την περίοδο βάσης (1974-2000) δίνονται στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 3 & 4).

Πίνακας 3: Δεδομένα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) Μ/Σ Περτουλίου και πέμπτου σημείο πλέγματος RCMs

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡΤ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μ/Σ ΠΕΡΤΟΥΛΙ	-0,2	0,5	2,8	7,1	12,3	16,4	18,6	18,2	14,4	9,4	5,2	1,5
DMI_ECHAM	2,3	2,0	4,4	8,0	12,5	17,4	20,5	20,3	16,3	11,5	7,4	2,6
ETHZ	-1,9	-1,2	1,4	5,1	10,8	17,2	22,3	22,0	16,3	9,3	4,2	0,3
HC	1,1	1,6	3,1	8,4	12,9	17,5	21,2	22,1	16,1	10,5	6,0	3,2
ICTP	1,4	1,3	3,7	7,5	12,4	17,4	19,3	18,6	14,2	8,9	5,4	2,1
KNMI	1,9	2,0	4,6	8,5	13,5	18,8	21,3	20,7	15,9	10,5	6,6	2,6
MPI	2,1	2,4	5,1	8,3	12,9	18,0	21,5	21,8	17,5	11,8	7,3	3,1
SHMI	2,6	2,9	5,8	9,0	12,6	16,5	18,2	18,1	14,5	10,0	6,7	3,0



Σχήμα 1: Θέσεις των σημείων πλέγματος (gridpoints) και των μετεωρολογικών σταθμών.

Πίνακας 4: Δεδομένα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας($^{\circ}\text{C}$)Μ/Σ Μεγ. Κερασιάς και όγδοο σημείο πλέγματος RCMs

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μ/Σ ΜΕΓ. ΚΕΡΑΣΙΑ	0,1	1,0	3,0	6,4	11,0	14,5	16,9	16,6	13,2	8,9	4,1	0,9
DMI_ECHAM	4,0	4,0	6,4	9,9	14,4	19,6	23,1	23,2	18,8	13,4	9,0	4,9
ETHZ	-0,6	0,5	3,4	7,0	12,4	18,5	22,8	22,4	17,1	10,5	5,3	1,6
HC	1,7	2,1	3,1	7,2	12,4	15,1	19,2	21,0	15,2	9,3	5,6	2,3
ICTP	1,4	1,3	3,7	7,5	12,4	17,4	19,3	18,6	14,2	8,9	5,4	2,1
KNMI	2,2	2,1	4,9	9,0	14,1	19,4	21,9	21,3	16,4	10,9	6,9	2,8
MPI	4,4	4,6	7,2	10,2	14,9	20,2	23,6	24,0	19,6	13,9	9,4	5,3
SHMI	2,3	2,6	5,6	8,9	12,5	16,5	18,7	18,6	14,5	9,7	6,5	2,7

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι τα μοντέλα εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις στην προσομοίωση των θερμοκρασιών. Οι αποκλίσεις αυτές έως ένα βαθμό δικαιολογούνται και από την υψομετρική διαφορά που καταγράφηκε ανάμεσα στα σημεία πλέγματος και τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Στα παραπάνω θα πρέπει να συνυπολογίσουμε ότι σε έρευνα για την περιοχή της κεντρικής Πίνδου (Στεφανίδης κ.α., 2017) βρέθηκε ότι σύμφωνα με την σχέση της θερμοβαθμίδας που διερευνήθηκε εμφανίζεται αύξηση της θερμοκρασίας κατά $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ υψόμετρο. Επίσης σημειώνεται ότι οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες ανάμεσα στο σημείο πλέγματος οχώ των RCMs και τον σταθμό της μεγάλης Κερασιάς όπου η υψομετρική διαφορά ήταν μεγαλύτερη (340 m). Για την αξιολόγηση και εύρεση του καταλληλότερου μοντέλου εφαρμόστηκαν οι στατιστικοί δείκτες που περιγράφηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα των δεικτών δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης καταλληλότητας των RCMs

	ΠΕΡΤΟΥΛΙ			ΜΕΓ. ΚΕΡΑΣΙΑ		
	RMSE	MAE	BIAS	RMSE	MAE	BIAS
DMI_ECH AM	1,7	1,4	1,6	4,6	4,2	-3,9
ETHZ	2	1,6	1,8	3	2,2	-1,8
HC	1,6	1,4	1,6	1,8	1,3	-1,1
ICTP	0,7	0,5	0,7	1,5	1,2	-1,0
KNMI	1,8	1,6	1,8	3,2	2,8	-2,5
MPI	2,3	1,9	2,2	5,2	4,7	-4,5
SHMI	1,6	1,0	1,2	1,9	1,7	-1,5

Όσο μικρότερες είναι οι τιμές των δεικτών τόσο καλύτερα τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου μοντέλου, συνεπώς οι παραμετροποιήσεις που έχουν γίνει σε αυτό είναι καταλληλότερες για την συγκεκριμένη περιοχή. Παρατηρείται ότι σε όλες στις συγκρίσεις και σύμφωνα με όλους τους δείκτες την μικρότερη απόκλιση παρουσιάζει το μοντέλο ICTP (RegCM3) και έπεται το μοντέλο του HC (METO-HC_HadR M3Q0). Επίσης οι προβλέψεις είναι ακριβέστερες για τους ανοιξιάτικους και φθινοπωρινούς μήνες.

Για την διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις θερμοκρασίες αέρα στην περιοχή έρευνας, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα τωνσημείων πλέγματος πέντε (5) και οχτώ (8) των μοντέλων ICTP (RegCM3) και HC (METO- HC_HadR M3Q0) που βρέθηκε έχουν την καλύτερη προσομοίωση για την περιοχή. Ως περίοδος αναφοράς χρησιμοποιείται η περίοδος 1974-2000, ενώ οι μελλοντικές εκτιμήσεις γίνονται για την περίοδο 2074-2100. Στους παρακάτω πίνακες δίνονται τα αποτελέσματα από την διερεύνηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα σύμφωνα με τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα που επιλέχθηκαν.

Πίνακας 6: Διαφορές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) της περιόδου αναφοράς από την μελλοντική περίοδο σύμφωνα με το μοντέλο HC και το πέμπτο σημείο πλέγματος

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1974-2000	1,8	2,8	5,1	8,4	12,9	18,5	23,2	23,7	18,1	11,5	7,0	3,6
2074-2100	6,2	6,8	8,7	12,0	18,0	24,4	30,1	29,6	23,6	15,9	11,1	7,6
Μεταβολή ($^{\circ}\text{C}$)	+4,4	+4,0	+3,6	3,6	+5,1	+5,9	+6,9	+5,9	+5,5	+4,4	+4,1	+4,0

Πίνακας 7: Διαφορές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) της περιόδου αναφοράς από την μελλοντική περίοδο σύμφωνα με το μοντέλο ICTP και το πέμπτο σημείο πλέγματος

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1974-2000	1,5	1,4	3,8	7,5	12,2	17,1	19,1	18,4	14,2	8,9	5,5	2,2
2074-2100	4,3	4,7	6,8	10,0	16,0	21,2	23,9	22,9	18,4	12,8	9,5	5,2
Μεταβολή ($^{\circ}\text{C}$)	+2,8	+3,3	+3,0	+2,5	+3,8	+4,1	+4,8	+4,5	+4,2	+3,9	+4,0	+3,0

Πίνακας 8: Διαφορές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) της περιόδου αναφοράς από την μελλοντική περίοδο σύμφωνα με το μοντέλο HC και το όγδοο σημείο πλέγματος

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1974-2000	3,0	4,1	6,4	9,6	14,4	20,3	24,9	25,2	19,6	12,6	7,8	4,7
2074-2100	7,4	8,1	10,0	13,4	19,7	26,2	31,7	31,1	25,0	17,1	12,2	8,8
Μεταβολή ($^{\circ}\text{C}$)	+4,4	+4,0	+3,6	+3,8	+5,3	+5,9	+6,8	+5,9	+5,4	+4,5	+4,4	+4,1

Πίνακας 9: Διαφορές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) της περιόδου αναφοράς από την μελλοντική περίοδο σύμφωνα με το μοντέλο ICTP και το όγδοο σημείο πλέγματος

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
1974-2000	1,4	1,3	3,7	7,5	12,4	17,4	19,3	18,6	14,2	8,9	5,4	2,1
2074-2100	4,2	4,6	6,9	10,2	16,3	21,5	24,2	22,8	18,3	12,9	9,4	5,1
Μεταβολή ($^{\circ}\text{C}$)	+2,8	+3,3	+3,2	+2,7	+3,9	+4,1	+4,9	+4,2	+4,1	+4,0	+4,0	+4,0

Βάση των αποτελεσμάτων των παραπάνω πινάκων, προκύπτει ότι θα υπάρξει σημαντική αύξηση των θερμοκρασιών στο μέλλον στην περιοχή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, και στα δύο μοντέλα, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία θα είναι $3,7^{\circ}\text{C}$ συμφωνά με το μοντέλο ICTP (RegCM3) και $4,8^{\circ}\text{C}$ σύμφωνα με το μοντέλο HC (METO- HC_HadR M3Q0). Οι αυξήσεις αυτές εμφανίζονται ομοιόμορφα κατανεμημένες στους μήνες του έτους.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θερμοκρασία του αέρα είναι μία από τις σημαντικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους και παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη κύμανση τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Η γνώση της μεταβολής της στο μέλλον συμβάλει στον ορθό προγραμματισμό υδρονομικών έργων διότι επηρεάζει τόσο την διαίτα της απορροής, μέσω της εξατμισοδιαπνοής, όσο και την αποσάθρωση των πετρωμάτων και την παραγωγή φερτών υλικών. Στην περιοχή έρευνας εξαιτίας του ορεινού χαρακτήρα οι θερμοκρασίες χαρακτηρίζονται μέτριες ως χαμηλές συγκριτικά με τις ευρύτερες συνθήκες του ελλαδικού χώρου.

Από την αξιολόγηση της καταλληλότητας των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) του Ευρωπαϊκού προγράμματος ENSEMBLE να προσομοιώνουν τις συνθήκες θερμοκρασίας, προέκυψε ότι καλύτερα αποτελέσματα δίνει το μοντέλο ICTP (RegCM3) και έπεται το μοντέλο του HC (METO- HC_HadR M3Q0). Οι παραμετροποιήσεις λοιπόν που έχουν γίνει στα προαναφερθέντα μοντέλα είναι καταλληλότερες για την συγκεκριμένη περιοχή. Από την επαλήθευση των μοντέλων φαίνεται όμως επίσης ότι αυτά έχουν σφάλματα συγκρίσιμα με την πρόβλεψη για αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ των δυο περιόδων. Η αβεβαιότητα των μοντέλων αναμένεται να είναι ακόμη μεγαλύτερη στην μελλοντική περίοδο αφού δεν έχουν βαθμονομηθεί για τις μελλοντικές συνθήκες γεγονός που περιορίζει την εμπιστοσύνη στις προβλέψεις των μοντέλων αυτών.

Σχετικά με τις μελλοντικές εκτιμήσεις των θερμοκρασιών αέρα στο ορεινό όγκο της κεντρική Πίνδου, τα προαναφερθέντα μοντέλα δείχνουν μία σημαντική αύξηση για την περίοδο 2074-2100. Επιπρόσθετα παρατηρείται ότι οι αυξήσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στους μήνες του έτους.

Τέλος, όπως αναλύθηκε παραπάνω, πρέπει να σημειωθεί ότι τα RCMs παρουσιάζουν σφάλματα στην προσομοίωση κλιματικών παραμέτρων, για τον λόγο αυτό τα αποτελέσματα τους θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή και επιφύλαξη. Τα μοντέλα προσομοιώνουν πολύ καλύτερα τις θερμοκρασίες από ότι τις βροχοπτώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι τα κλιματικά μοντέλα κατά την προσομοίωση των βροχοπτώσεων περιλαμβάνουν παραμετροποιήσεις με μεγαλύτερο ποσοστό αβεβαιότητας, όπως είναι η πρόγνωση των νεφών. Παρά τις αβεβαιότητες των μοντέλων η αναμενόμενη τάση αύξησης της θερμοκρασίας και η κύμανση αυτής στον χρόνο κατά τις ερχόμενες δεκαετίες, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό και λήψη αποφάσεων από τους ειδικούς.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέκυψαν από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα ENSEMBLES (GOCE-CT-2003-505539) με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Παναγιώτη Μαχαίρα, Καθηγητή του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στην Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Κωνσταντία Τολικά για τις πολύτιμες συμβουλές της στην επεξεργασία των στοιχείων αυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Στάθης, Δ., 1998. *Τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της Πίνδου από υδρολογική άποψη*. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, 238 σελ.
- Στάθης, Δ., 2015. *Μαθήματα Δασικής Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών Εκδόσεις Κάλλιπος, 239 σελ.
- Στεφανίδης, Σ., Στάθης, Δ. και Χατζηχριστάκη, Χ. 2017. *Το υδατικό ισοζύγιο των ορεινών λεκανών απορροής της κεντρικής Πίνδου*. Πρακτικά 18^{ου} Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, Έδεσσα, 1178- 1185.
- Τολικά, Κ. 2005. *Εκτιμώμενες κλιματικές αλλαγές στον ελληνικό χώρο κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα με τη χρήση κλιματικών μοντέλων*. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, 312 σελ.
- Ahrens, D.C. 2003. *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Pacific Grove: Brooks Cole, 549 pp.
- Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. 2006. *Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data*. Geophysical Research Letters, 33, L07304, doi: 10.1029/2015GL025546.
- Christensen, O. B., Christensen, J. H., Machehauer, B., & Botzet, M. 1998. *Very high-resolution regional climate simulations over Scandinavia—Present climate*. Journal of Climate, 11(12): 3204-3229.
- Collins, M., Booth, B. B., Harris, G. R., Murphy, J. M., Sexton, D. M., & Webb, M. J. 2006. *Towards quantifying uncertainty in transient climate change*. Climate Dynamics, 27(2-3): 127-147.
- Feidas, H. 2017. *Trend analysis of air temperature time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: recent trends and an update to 2013*. Theoretical and Applied Climatology, 129(3-4): 1383-1406.
- Gedney, N., Cox, P.M., Betts, R. A, Boucher, O., Huntingford, C., Stott, P. 2006. *Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records*. Nature 439: 835–838.

- Giorgi, F., & Shields, C. 1999. *Tests of precipitation parameterizations available in latest version of NCAR regional climate model (RegCM) over continental United States*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 104(D6): 6353-6375.
- IPCC 2007. *Climate change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon et al. (Editors), Cambridge University Press.
- Jacob, R., Schafer, C., Foster, I., Tobis, M., & Anderson, J. 2001. *Computational design and performance of the Fast Ocean Atmosphere Model, version one*. Computational Science—ICCS: 175-184.
- Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., & Samuelsson, P. 2005. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3), report. SMHI, Norrköping, Sweden.
- Mamara, A., Anadranistakis, M., Argiriou, A. A., Szentimrey, T., Kovacs, T., Bezes, A., & Bihari, Z. 2017. *High resolution air temperature climatology for Greece for the period 1971–2000*. Meteorological Applications, 24(2): 191-205.
- Mearns, L. O., Easterling, W., Hays, C., & Marx, D. 2001. *Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios: Part I. The uncertainty due to spatial scale*. Climatic Change, 51(2): 131-172.
- Meijgaard, E., Van Ulft, L. H., Berg, W. J., Bosveld, F. C., Van den Hurk, B. J. J. M., Lenderink, G., & Siebesma, A. P. 2008. *The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Nastos, P. T., & Kapsomenakis, J. 2015. *Regional climate model simulations of extreme air temperature in Greece. Abnormal or common records in the future climate?* Atmospheric Research, 152: 43-60.
- Papadaki C., Soulis K.X., Muñoz-Mas R., Martinez-Capel F., Zogaris S., Ntoanidis L., Dimitriou E., 2016. *Potential impacts of climate change on flow regime and fish habitat in mountain rivers of the south-western Balkans*. Science of the Total Environment, 540: 418-428.
- Paparrizos, S., & Matzarakis, A. 2017. *Present and future responses of growing degree days for Crete Island in Greece*. Advances in Science and Research, 14: 1-5.
- Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Maheras, P., & Vafiadis, M. 2008. *Simulation of future changes in extreme rainfall and temperature conditions over the Greek area: a comparison of two statistical downscaling approaches*. Global and Planetary Change, 63(2): 132-151.
- Tolika, K., Zanis, P., & Anagnostopoulou, C. 2012. *Regional climate change scenarios for Greece: future temperature and precipitation projections from ensembles of RCMs*. Global NEST Journal, 14(4): 407-421.
- Wu, Y., Liu, S., Abdul-Aziz, O.I., 2012. *Hydrological effects of the increased CO₂ and climate change in the Upper Mississippi River Basin using a modified SWAT*. Climate Change. 110: 977–1003.