

Πως λειτουργούν τα κλιματικά μοντέλα

Ηλίας Αγαθαγγελίδης, Μεταδιδάκτορας, Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ

Περίληψη

Τα κλιματικά μοντέλα είναι σύνθετα προγράμματα προσομοίωσης, τα οποία αναπαριστούν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ατμόσφαιρας, της ξηράς, των ωκεανών και της βιόσφαιρας. Τα κλιματικά μοντέλα προσομοιώνουν το κλίμα, δηλαδή τη μέση κατάσταση των μετεωρολογικών συνθηκών για μακρά χρονική περίοδο (π.χ. 30 έτη), και όχι την κατάσταση του καιρού σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Σε ένα κλιματικό μοντέλο υπεισέρχονται πλήθος φυσικών παραμέτρων και διεργασιών, έτσι ώστε να περιγραφεί το κλίμα με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Οι προσομοιώσεις των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων έχουν κατά κανόνα χαμηλή χωρική ανάλυση, της τάξης των 100 χιλιομέτρων. Για μια πιο λεπτομερή αποτύπωση των κλιματικών συνθηκών, χρησιμοποιούνται ειδικές κατηγορίες κλιματικών μοντέλων ή αναπτύσσονται στατιστικές τεχνικές. Τα μοντέλα μας βοηθούν να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι ανθρώπινες επιλογές επηρεάζουν άμεσα τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες του πλανήτη.

1. Χρησιμοποιώντας μοντέλα για να κατανοήσουμε τη φύση

Η χρήση μοντέλων αποτελεί διαχρονικά ένα από τα βασικά εργαλεία σε όλους τους επιστημονικούς τομείς. Με την ανάπτυξη μοντέλων, οι επιστήμονες αναπαριστούν με απλό τρόπο πολύπλοκα συστήματα και επιτυγχάνουν την περιγραφή σύνθετων φυσικών φαινομένων. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να κατανοήσουμε καλύτερα ένα φυσικό σύστημα, να εξετάσουμε τα μεμονωμένα στοιχεία από τα οποία αποτελείται, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτά αλληλοεπιδρούν. Επιπλέον, μπορούμε να διερευνήσουμε αν και πως ένα σύστημα θα αλλάξει υπό συγκεκριμένες εξωτερικές αλλαγές, και συνεπώς να προβλέψουμε τη μελλοντική του πορεία.

Σήμερα, όλα σχεδόν τα επιστημονικά μοντέλα βασίζονται σε μαθηματικές εξισώσεις και εφαρμόζονται ως προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Καταλήγοντας μέσω των προσομοιώσεων σε συγκεκριμένες αριθμητικές εκτιμήσεις, τα αποτελέσματά των μοντέλων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση του αντίκτυπου υποθετικών σεναρίων ή την πρόβλεψη των μελλοντικών συνθηκών ενός συστήματος. Φυσικά, ένα μοντέλο παραμένει μια απλουστευμένη αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου. Επομένως, τα επιστημονικά μοντέλα υφίστανται συνεχή αξιολόγηση της ορθότητάς τους και υπόκεινται σε συνεχείς τροποποιήσεις και βελτιώσεις των χαρακτηριστικών τους.

2. Τι είναι ένα κλιματικό μοντέλο;

Τα κλιματικά μοντέλα είναι σύνθετα προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή τα οποία προσομοιώνουν τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του κλίματος του πλανήτη. Με την πραγματοποίηση αυτών των προσομοιώσεων, μπορούμε να έχουμε μια εκτίμηση για τη μελλοντική κατάσταση του κλίματος υπό την επίδραση των μεταβαλλόμενων συνθηκών λόγω της κλιματικής αλλαγής. Επομένως, οι επιστήμονες χρησιμοποιούν κλιματικά μοντέλα για να διερευνήσουν τον τρόπο με τον οποίο οι ανθρώπινες επιλογές, όπως η αύξηση ή η μείωση της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, επηρεάζουν το κλίμα του πλανήτη. Τα μοντέλα μας επιτρέπουν να εξετάσουμε πλήθος διαφορετικών σεναρίων και να εκτιμήσουμε τα διαφορετικά αποτελέσματα που προκύπτουν. Για παράδειγμα, αν αυξηθεί η θερμοκρασία αέρα του πλανήτη κατά 3 °C, τι αντίκτυπο θα έχει αυτό ως προς τη συχνότητα και την ένταση των καταιγίδων που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου; Συνεπώς, η γνώση που αποκτάται από την εκτίμηση των μελλοντικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής μέσω μοντέλων παρέχει άμεση βοήθεια στις κυβερνήσεις και τους τοπικούς φορείς για την κατάρτιση των κατάλληλων σχεδίων προσαρμογής στους επερχόμενους κλιματικούς κινδύνους.

Για να προσομοιώσουν τον καιρό και το κλίμα με ακρίβεια, τα κλιματικά μοντέλα πρέπει να αναπαριστούν όσο το δυνατόν πιστότερα τις πραγματικές συνθήκες του πλανήτη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει αφενός να ακολουθούν τους θεμελιώδεις νόμους της φυσικής, αφετέρου πρέπει επιπλέον να ενσωματώσουν πλήθος άλλων φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Οι επιμέρους συνιστώσες του κλιματικού συστήματος της Γης και ως εκ τούτου των κλιματικών μοντέλων είναι οι εξής:

- η ατμόσφαιρα, η οποία περιγράφεται από μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου και η βαρομετρική πίεση.
- οι ωκεανοί (π.χ., στάθμη της θάλασσας και τα θαλάσσια ρεύματα).
- η επιφάνεια του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων μηχανισμών όπως ο κύκλος του άνθρακα, και παραμέτρων όπως το ποσοστό κάλυψης από βλάστηση.
- η κρυόσφαιρα η οποία περιλαμβάνει τις περιοχές της Γης οι οποίες καλύπτονται από πάγο ή χιόνι.

Τα κλιματικά μοντέλα για να αναπαριστούν με σωστό τρόπο το κλιματικό σύστημα του πλανήτη, θα πρέπει όχι μόνο να προσομοιώνουν με ακρίβεια τη λειτουργία των τεσσάρων παραπάνω συνιστωσών του κλιματικού συστήματος, αλλά και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις.

Όλοι οι φυσικοί νόμοι και οι διαφορετικές διεργασίες του κλίματος ενσωματώνονται στο κλιματικό μοντέλο μέσω σύνθετων μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες λύνονται σε

ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ένα κλιματικό μοντέλο περιλαμβάνει εκατομμύρια γραμμές υπολογιστικού κώδικα και αποτελεί το αποτέλεσμα της συλλογικής, διαχρονικής προσπάθειας δεκάδων επιστημόνων. Καθώς τα κλιματικά μοντέλα επιχειρούν να προσομοιώσουν το κλίμα του συνόλου του πλανήτη για μακροχρόνια περίοδο (δεκάδες ή ακόμα και εκατοντάδες έτη), απαιτούν τεράστιες δυνατότητες σε υπολογιστική ισχύ. Για αυτόν τον λόγο, τα κλιματικά μοντέλα εφαρμόζονται σε υπερσύγχρονους υπερυπολογιστές των ερευνητικών κέντρων, οι οποίοι είναι ικανοί να πραγματοποιούν τρισεκατομμύρια αριθμητικές πράξεις ανά δευτερόλεπτο.

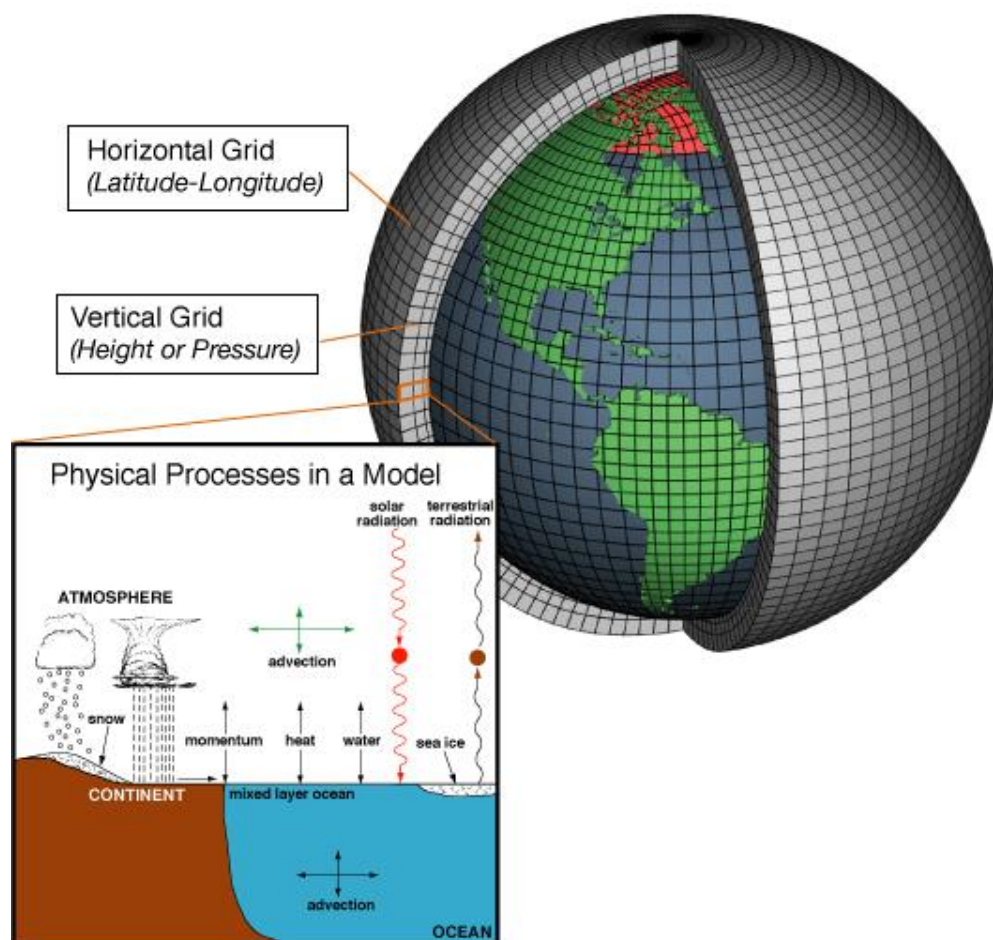
```
!-----  
! Calculate light absorption by the plant canopy  
!-----  
IF (CAN_RAD_MOD == 2) THEN  
  CALL ALBPFT (ROW_LENGTH*ROWS, LAND_PTS, &  
& LAND_INDEX, TILE_INDEX, TILE_PTS, ILAYERS, &  
& ALBSOIL, COS_ZENITH_ANGLE, LAI, ALB_TYPE_DUMMY, &  
& FAPAR_DIR, FAPAR_DIF, CAN_RAD_MOD)  
  
ENDIF  
  
!-----  
! Loop over Plant Functional Types to calculate the available moisture  
! and the values of canopy conductance, the carbon fluxes and the leaf  
! turnover rate  
!-----  
DO N=1, NPFT  
  
  IF (NTILES == 1) THEN  
    DO L=1, LAND_PTS  
      TSTAR(L) = TSTAR_TILE(L,1)  
      Z0(L) = Z0_TILE(L,1)  
    ENDDO  
  ELSE  
    DO L=1, LAND_PTS
```

Εικόνα 1 Παράδειγμα κώδικα υπολογισμών ενός κλιματικού μοντέλου.

3. Πώς αναπαρίσταται η Γη μέσα στα κλιματικά μοντέλα;

Λόγω της τεράστιας πολυπλοκότητας του κλιματικού συστήματος και των περιορισμών σε υπολογιστική ισχύ (ακόμα και κάνοντας χρήση ενός υπερυπολογιστή), τα κλιματικά μοντέλα δεν είναι δυνατόν να περιγράψουν με συνεχή τρόπο τις συνθήκες οι οποίες επικρατούν σε κάθε σημείο της Γης. Αντίθετα, μέσα σε ένα κλιματικό μοντέλο ο πλανήτης χωρίζεται σε μια σειρά από διαδοχικούς κύβους ή όπως αποκαλούνται «πλεγματικά κελιά». Το καθένα από αυτά τα κελιά έχει οριζόντια χωρική διάσταση της τάξης των 100 χιλιομέτρων. Ένα παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο αποτελείται από χιλιάδες πλεγματικά κελιά τα οποία καλύπτουν όλη την επιφάνεια της Γης, ενώ επίσης εκτείνονται κατακόρυφα από τον πυθμένα των ωκεανών έως την κορυφή της ατμόσφαιρας. Μέσω μαθηματικών εξισώσεων υπολογίζονται οι ροές ενέργειας και μάζας από και προς κάθε πλεγματικό κελί για διαδοχικές χρονικές στιγμές, προσομοιώνοντας έτσι τις φυσικές διεργασίες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, κάθε πλεγματικό κελί χαρακτηρίζεται από διαφορετική τιμή μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία του αέρα και η ταχύτητα του ανέμου.

Ωστόσο, ορισμένες φυσικές διεργασίες, όπως η ανάπτυξη τοπικών καταιγίδων, λαμβάνουν χώρα σε χωρικές κλίμακες πολύ μικρότερες από τις διαστάσεις των κελιών του μοντέλου, ή είναι πολύ χρονοβόρες για να επιλυθούν μέσω μαθηματικών εξισώσεων σε κάθε χρονικό βήμα του μοντέλου. Για την τελευταία περίπτωση, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου των διαφόρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Τέτοιου είδους φαινόμενα ενσωματώνονται στο κλιματικό μοντέλο προσεγγιστικά και με σχετικά απλουστευμένη μορφή. Οι διαδικασίες για την ενσωμάτωση σύνθετων μηχανισμών στο μοντέλο ονομάζονται «παραμετροποιήσεις» του μοντέλου. Η βελτίωση της ακρίβειας των παραμετροποιήσεων αποτελεί ένα από τα πιο επίκαιρα και υπό διερεύνηση επιστημονικά θέματα στον τομέα της προσομοίωσης του καιρού και του κλίματος.



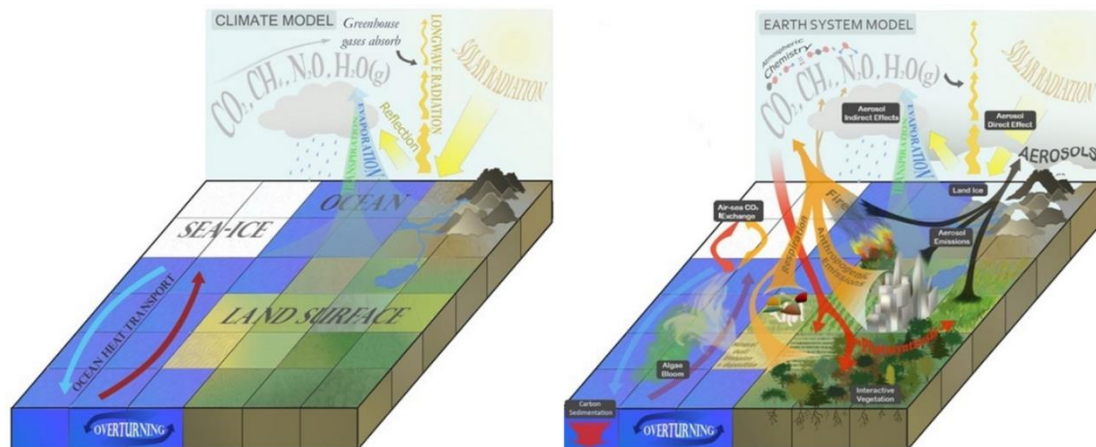
Εικόνα 2 Σχηματική αποτύπωση του τρόπου με τον οποίο η Γη χωρίζεται σε πλεγμιακά κελιά και απεικόνιση μερικών από τις φυσικές διεργασίες οι οποίες λαμβάνονται υπόψη σε ένα κλιματικό μοντέλο.

4. Ποιες είναι οι διαφορετικές κατηγορίες κλιματικών μοντέλων;

Τα πρώτα και απλούστερης μορφής κλιματικά μοντέλα ονομάζονταν «Μοντέλα Ενεργειακού Ισοζυγίου» (Energy Balance Models, EBMs). Τα EBMs στην πραγματικότητα δεν προσομοίωναν το κλίμα του πλανήτη, αλλά υπολόγιζαν την ισορροπία μεταξύ της ενέργειας που εισέρχεται στο σύστημα Γη-Ατμόσφαιρα και της ενέργειας που επανεκπέμπεται προς το διάστημα. Μέσω της μεταβολής του παραπάνω ισοζυγίου λόγω της ανθρωπογενούς ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου, μπορούσε να γίνει μια εκτίμηση για τη συνολική αύξηση της θερμοκρασίας της Γης. Παρόμοια με τα EBMs στη φιλοσοφία και τις γενικές τους παραδοχές, ήταν τα «Μονοδιάστατα Κλιματικά Μοντέλα». Στα συγκεκριμένα μοντέλα επιτρεπόταν επιπρόσθετα η μεταφορά θερμότητας και η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα, ωστόσο μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Ένα μεγάλο άλμα στην προσομοίωση και επακόλουθα στην κατανόηση του κλίματος αποτέλεσαν τα «Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα» (Global Climate Models, GCMs) ή, όπως είναι εναλλακτικά γνωστά, τα «Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας» (General Circulation Models, GCMs). Αυτά τα μοντέλα εισήγαγαν την τρισδιάστατη περιγραφή των φυσικών διεργασιών του πλανήτη. Δηλαδή προσομοιώνουν το κλίμα με τρόπο που προσομοιάζει πολύ περισσότερο στην πραγματικότητα, καθώς λαμβάνουν υπόψη τη μεταφορά θερμότητας και υδρατμών μεταξύ των διαφορετικών περιοχών της Γης. Στις αρχικές εκδόσεις των Παγκόσμιων Κλιματικών Μοντέλων, οι διάφορες συνιστώσες του κλιματικού συστήματος (όπως η ατμόσφαιρα και οι ωκεανοί) δεν αλληλοεπιδρούσαν άμεσα μεταξύ τους. Ωστόσο σύντομα, τα αρχικά GCMs μετεξελιχθηκαν στα «συζευγμένα κλιματικά μοντέλα». Σε αυτού του είδους τα μοντέλα πραγματοποιείται προσομοίωση των διεργασιών στα όρια μεταξύ των συστημάτων, όπως η ανταλλαγή υδρατμών μεταξύ της επιφάνειας της θάλασσας και της ατμόσφαιρας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους κλιματικών συστημάτων και κατά συνέπεια η πιο ακριβής προσομοίωση του κλίματος.

Τα πιο σύγχρονα κλιματικά μοντέλα ονομάζονται «Earth-System Models» (ESMs) και ενσωματώνουν επιπρόσθετα τους βιοχημικούς κύκλους του πλανήτη, δηλαδή την ανταλλαγή χημικών ενώσεων μεταξύ της βιόσφαιρας, του ατμοσφαιρικού αέρα και των ωκεανών. Πιο συγκεκριμένα, τα παραπάνω κλιματικά μοντέλα προσομοιώνουν τον κύκλο του άνθρακα, τον κύκλο του αζώτου, ποικίλες διεργασίες της ατμοσφαιρικής χημείας, καθώς και δυναμικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά της βλάστησης. Όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί έχουν ισχυρή επίδραση στον τρόπο με τον οποίο το κλίμα αντιδρά στις αυξανόμενες συγκεντρώσεις θερμοκηπιακών αερίων. Για παράδειγμα, η κατάσταση ενός δασικού οικοσυστήματος αναμένεται να μεταβληθεί εξαιτίας αλλαγών στη θερμοκρασία και τις βροχοπτώσεις. Αυτό με τη σειρά του επηρεάζει την ικανότητα των δέντρων του δάσους να απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρά με την ηλιακή ακτινοβολία.

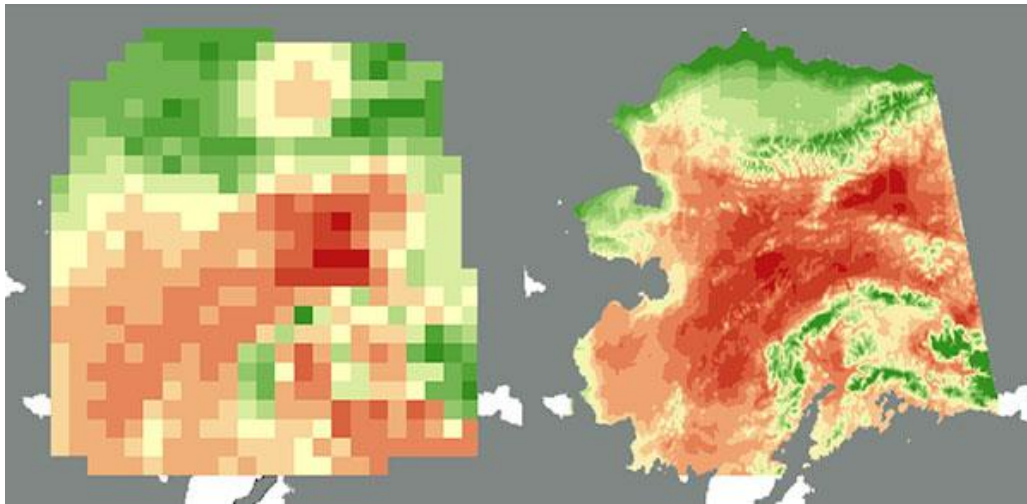


Εικόνα 3 Τα Earth System Models (δεξιά εικόνα) ενσωματώνουν πλήθος βιοχημικών διεργασιών, οι οποίες δεν εμπεριέχονταν παλαιότερα στα Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα (αριστερή εικόνα).

Τα «Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα» (Regional Climate Models, RCMs) αποτελούν μια ειδική κατηγορία κλιματικών μοντέλων. Όπως είδαμε προηγουμένως, τα Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα έχουν περιορισμένη χωρική ανάλυση, της τάξης των 100 χιλιομέτρων ανά κελί προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει, καθώς το υπολογιστικό κόσμος της προσομοίωσης του συνόλου του πλανήτη δεν επιτρέπει μικρότερο μέγεθος των πλεγματικών κελιών. Από την άλλη, τα RCMs εστιάζοντας μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές, μπορούν να διαθέτουν πολύ πιο λεπτομερή χωρική ανάλυση, της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Αυτή η χωρική κλίμακα επιτρέπει μια ακριβέστερη περιγραφή των χαρακτηριστικών του γήινου ανάγλυφου, της κάλυψης γης, και του τύπου της βλάστησης. Όλα τα παραπάνω επηρεάζουν άμεσα το κλιματικό σύστημα. Επιπρόσθετα τα περιοχικά μοντέλα μπορούν να προσομοιώνουν φαινόμενα μικρότερης χωρικής κλίμακας, χωρίς την ανάγκη χρήσης παραμετροποιήσεων. Επομένως, οι προσομοιώσεις των RCMs είναι τις περισσότερες φορές υψηλότερης ακρίβειας από αυτές που προκύπτουν από τη χρήση Παγκόσμιων Κλιματικών Μοντέλων. Επίσης, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στη περίπτωση κατά την οποία θέλουμε να μελετήσουμε την επίδραση της κλιματικής αλλαγής σε τομείς περιορισμένης σχετικά χωρικής εμβέλειας, όπως για παράδειγμα, στον αγροτικό τομέα μιας χώρας ή στις αστικές περιοχές της.

Οι προσομοιώσεις των Περιοχικών Κλιματικών Μοντέλων τροφοδοτούνται με δεδομένα τα οποία προέρχονται από τα αποτελέσματα προγενέστερων προσομοιώσεων των Παγκόσμιων Κλιματικών Μοντέλων. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι τα Περιοχικά Κλιματικά Μοντέλα βελτιώνουν την αρχική χωρική ανάλυση των παγκόσμιων μοντέλων. Ο επιστημονικός όρος για την παραπάνω διαδικασία ονομάζεται «υποκλιμάκωση» ή «υποβιβασμός κλίμακας» των αρχικών προσομοιώσεων. Τα περιοχικά μοντέλα έχουν παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με τα

παγκόσμια, δηλαδή επιλύουν εκ νέου τις μαθηματικές εξισώσεις στα πλεγματικά σημεία της περιοχής προσομοίωσης. Αύτη η μεθοδολογία υποκλιμάκωσης ονομάζεται «δυναμικός υποβιβασμός κλίμακας». Βρίσκεται σε αντιπαράθεση με τη διαδικασία του «στατιστικού υποβιβασμού κλίμακας», κατά τον οποίο οι εκτιμήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων σε υψηλότερη χωρική ανάλυση πραγματοποιούνται μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής πολύπλοκων στατιστικών αλγορίθμων.



Εικόνα 4 Παράδειγμα βελτίωσης της χωρικής ανάλυσης ενός Παγκόσμιου Κλιματικού Μοντέλου (αριστερή εικόνα) έπειτα από την εφαρμογή τεχνικών υποβιβασμού κλίμακας (δεξιά εικόνα).

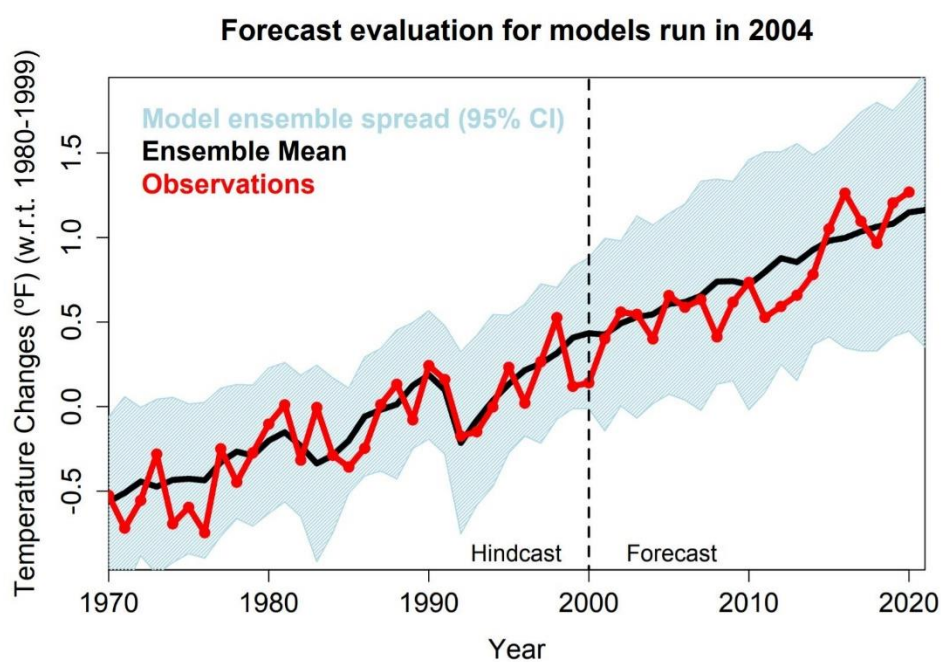
5. Αξιολόγηση της ακρίβειας των προσομοιώσεων

Όλα τα επιστημονικά μοντέλα, συμπεριλαμβανομένων των κλιματικών μοντέλων, εμπεριέχουν κάποιο βαθμό αβεβαιότητας. Σε ότι αφορά τα κλιματικά μοντέλα αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι είναι δύσκολο σε μια προσομοίωση να αναπαραχθεί επακριβώς η πολύπλοκη συμπεριφορά ορισμένων ατμοσφαιρικών διεργασιών. Ορισμένες από αυτές τις διεργασίες είναι επιπρόσθετα χαοτικής φύσης, όπως για παράδειγμα η τύρβη, η οποία έχει χαρακτηριστεί ως «το σημαντικότερο άλυτο πρόβλημα της κλασικής φυσικής». Τέτοιες διεργασίες είναι δύσκολο να ενσωματωθούν επακριβώς σε ένα μοντέλο, και συνήθως προσεγγίζονται μέσω της διαδικασίας των παραμετροποιήσεων, την οποία είδαμε σε προηγούμενη ενότητα.

Στις διαφορετικές επιλογές παραμετροποιήσεων εντοπίζονται και οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ των κλιματικών μοντέλων από τα διάφορα ερευνητικά κέντρα παγκοσμίως. Σε συνδυασμό με επιπρόσθετες διαφορές στα χαρακτηριστικά κάθε προσομοίωσης (π.χ. στη χωρική ανάλυση ή στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της Γης), παρουσιάζονται σε ορισμένες περιπτώσεις διαφοροποιήσεις στις μελλοντικές εκτιμήσεις

μεταξύ των διαφόρων κλιματικών μοντέλων. Για ορισμένες μεταβλητές (όπως για τη θερμοκρασία του αέρα) η πλειονότητα των μοντέλων συμφωνεί μεταξύ τους, προσφέροντας επομένως ισχυρή εμπιστοσύνη ως προς την εκτιμωμένη μελλοντική εκτίμηση. Για άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η βροχόπτωση, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των κλιματικών μοντέλων είναι μεγαλύτερες. Για να μειωθεί η αβεβαιότητα, συνήθη τακτική αποτελεί ο συνδυασμός πολλαπλών προσομοιώσεων σε μία συγκεντρωτική εκτίμηση. Αυτή η μεθοδολογία ονομάζεται τεχνική του «σμήνους προσομοιώσεων» (ensemble), σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται η μέση τιμή πλήθους διαφορετικών εκτιμήσεων οι οποίες προέρχονται από ένα μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων διαφορετικών κλιματικών μοντέλων.

Παρά την αβεβαιότητα και τη διακύμανση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών προσομοιώσεων, η αξιολόγηση των κλιματικών μοντέλων καταδεικνύει ότι παρουσιάζουν σημαντική ακρίβεια στις εκτιμήσεις τους. Η αξιολόγηση των μοντέλων πραγματοποιείται με τη μεθοδολογία του «hindcasting», δηλαδή τη χρησιμοποίηση των κλιματικών μοντέλων για την εκτίμηση του κλίματος παρελθόντων ετών. Η κλιματική προσομοίωση συγκρίνεται στη συνέχεια με το ιστορικό παρατηρήσεων από μετεωρολογικούς σταθμούς. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί, τα κλιματικά μοντέλα (πιο συγκεκριμένα το ensemble των προσομοιώσεων τους) αναπαράγουν με αξιοσημείωτη ακρίβεια τη διαχρονική πορεία της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Με παρόμοιες διαδικασίες τα κλιματικά μοντέλα υπόκεινται σε μια συνεχή διαδικασία αξιολόγησης των εκτιμήσεων όλων των παραμέτρων τους, για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία στις προβλέψεις των μελλοντικών κλιματικών αλλαγών.



Εικόνα 5 Αποτύπωση της συμφωνίας της μέσης τιμής των κλιματικών προσομοιώσεων (μαύρη καμπύλη) με τις παρατηρήσεις (κόκκινη καμπύλη). Δεδομένα από την 4^η έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή.

6. Το μέλλον των κλιματικών μοντέλων

Η ικανότητα των κλιματικών μοντέλων να περιγράψουν την πραγματική κατάσταση που επικρατεί στο κλίμα του πλανήτη σχετίζεται στενά με τις διαρκείς τεχνολογικές εξελίξεις, καθώς και με τη διαθεσιμότητα μετεωρολογικών παρατηρήσεων. Καθώς η υπολογιστική ισχύς αυξάνεται και το πλήθος των παρατηρήσεων διευρύνεται, η ακρίβεια των προσομοιώσεων των κλιματικών μοντέλων αναμένεται να παρουσιάζει συνεχή βελτίωση.

Συγκεκριμένα, η αναμενόμενη μελλοντική πρόοδος στη τεχνολογία των υπολογιστών θα επιτρέψει στα κλιματικά μοντέλα να παράγουν δεδομένα ταχύτερα και με υψηλότερη χωρική ανάλυση. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, σε επιστημονικές μελέτες διαπιστώνεται ότι τα μοντέλα υψηλότερης χωρικής ανάλυσης τείνουν να συμφωνούν σε μεγαλύτερο βαθμό με τις παρατηρήσεις. Επιπλέον, δεδομένου ότι κάθε κλιματική προσομοίωση είναι αρκετά χρονοβόρα (μπορεί να διαρκέσει αρκετούς μήνες), πιο ισχυροί υπολογιστές στο μέλλον θα επιτρέψουν στους επιστήμονες να εξετάζουν μεγαλύτερο αριθμό διαφορετικών κλιματικών σεναρίων. Ωστόσο, ακόμα και με μεγαλύτερη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ η οποία αναμένεται τα επόμενα έτη, ένα κλιματικό μοντέλο παραμένει μια αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης του πλανήτη, και επομένως πάντα θα χαρακτηρίζεται από ορισμένη αβεβαιότητα. Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης συνοδεύεται από εξαιρετικές δυνατότητες για τη βελτίωση των κλιματικών μοντέλων, ειδικά σε περίπλοκες φυσικές διεργασίες, όπως για παράδειγμα ο σχηματισμός νεφών.

Ένας επιπλέον τρόπος για τη βελτίωση των κλιματικών μοντέλων αποτελεί η συλλογή περισσότερων παρατηρήσεων της ατμόσφαιρας και των ωκεανών της Γης. Σήμερα, υπάρχει ήδη διαθέσιμο ένα πλήθος από κλιματικά δεδομένα, τα οποία σε συνδυασμό με τις προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων επιτρέπουν αξιόπιστες εκτιμήσεις για το μελλοντικό κλίμα. Ωστόσο, η κατανομή αυτών των διαθέσιμων δεδομένων δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο τον πλανήτη ή σε ορισμένες περιοχές δεν καλύπτει μακροχρόνιες περιόδους. Στις περιπτώσεις αυτές, οι επιστήμονες δεν διαθέτουν ένα ασφαλές μέτρο σύγκρισης για τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του κλιματικού μοντέλου. Έτσι είναι δύσκολο να γνωρίζουν εάν για ορισμένες κλιματικές παραμέτρους ή για συγκεκριμένες περιοχές το μοντέλο είναι λιγότερο ακριβές και πολύ περισσότερο να αντιληφθούν τους λόγους πίσω από τυχόν αποκλίσεις. Επιπλέον, καθώς το κλίμα του πλανήτη εξελίσσεται διαρκώς, είναι σημαντικό να διαθέτουμε επικαιροποιημένα και λεπτομερή δεδομένα,

προκειμένου να κατανοήσουμε τις αλλαγές καθώς συμβαίνουν. Αυτό θα μας επιτρέψει να εκτιμήσουμε επακόλουθα με μεγαλύτερη ασφάλεια τις μελλοντικές αλλαγές. Η συνεχής επέκταση του παγκόσμιου δικτύου μετεωρολογικών σταθμών, όπως και η εκτόξευση νέων δορυφόρων παρατήρησης της Γης από διεθνείς οργανισμούς όπως η NASA, ενισχύουν σημαντικά το πλήθος των κλιματικών δεδομένων για το σύνολο του πλανήτη.

Η ανάπτυξη πιο προηγμένων κλιματικών μοντέλων στο μέλλον, μέσω της τεχνολογικής προόδου και της αξιοποίησης περισσότερων δεδομένων από μετεωρολογικές παρατηρήσεις, θα βελτιώσει σημαντικά την ικανότητα μας να κατανοήσουμε και να προβλέψουμε με μεγαλύτερη αξιοπιστία τις μεταβολές του κλίματος. Αυτό, με τη σειρά του, θα μας επιτρέψει να σχεδιάσουμε και να προετοιμάσουμε τις πόλεις και τα οικοσυστήματα του πλανήτη με πιο αποτελεσματικό τρόπο, προκειμένου να αντιμετωπιστούν καλύτερα οι επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης.

7. Βιβλιογραφία

Gettelman, Andrew, and Richard B. Rood. *Demystifying climate models: A users guide to earth system models*. Springer Nature, 2016.

McGuffie, Kendal, and Ann Henderson-Sellers. *The climate modelling primer*. John Wiley & Sons, 2014.

Stocker, Thomas. *Introduction to climate modelling*. Springer Science & Business Media, 2011.