

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΓΗΣ

Γεώργιος Ζαρκαδούλας
Φυσικός – M.Sc. Ε.Μ.Π.

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η διαφαινόμενη αλλαγή του κλίματος του πλανήτη έχει λάβει μεγάλη δημοσιότητα, απασχολώντας σχεδόν καθημερινά την κοινή γνώμη και τα μέσα μαζικής ενημέρωσης. Ενίοτε, οι διάφορες προσεγγίσεις που παρουσιάζονται συνοδεύονται σχεδόν πάντοτε από μια υπερβολή σχετικά με τη μορφή της παγκόσμιας θέρμανσης και την έκταση της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, η ρύπανση του φυσικού περιβάλλοντος προκαλεί τέτοιες αλλαγές, ώστε να μεγαλώνει την ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο, ενώ στο παρελθόν ήταν ένα φυσικό φαινόμενο, τώρα τείνει να γίνει ένα σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα με τις ανάλογες επιπτώσεις στο κλίμα, τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Το θέμα αυτό εγείρει δύο σημαντικά ερωτήματα. Αλλάζει όντως το παγκόσμιο κλίμα; Και αν ναι, μπορούν οι παρατηρούμενες μεταβολές του κλίματος να αποδοθούν στη μεταβαλλόμενη σύνθεση της ατμόσφαιρας;

Ροή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

Ένα μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της Γης απορροφάται ή σκεδάζεται. Έτσι, στην επιφάνεια της Γης φτάνει τόσο άμεση, όσο και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, που μαζί αποτελούν την παγκόσμια ακτινοβολία. Ένα μέρος της παγκόσμιας ακτινοβολίας ανακλάται και το υπόλοιπο απορροφάται από τη γήινη επιφάνεια με αποτέλεσμα αυτή να θερμαίνεται και να γίνεται πηγή θερμικής ακτινοβολίας προς την ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια η ατμόσφαιρα θερμαίνεται με τη διαδικασία διανταλλαγής θερμότητας με τη γήινη επιφάνεια και τότε εκπέμπει θερμική ακτινοβολία τόσο προς την επιφάνεια (καθοδική ατμοσφαιρική ακτινοβολία), όσο και προς το διάστημα (ανοδική ατμοσφαιρική ακτινοβολία).

Η άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία περιλαμβάνεται στην περιοχή των μηκών κύματος 0,2-5 μm, με το ισχυρότερο τμήμα της στην ορατή και υπέρυθρη περιοχή. Έτσι η ακτινοβολία αυτή χαρακτηρίζεται «μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία». Η θερμική ακτινοβολία της γήινης επιφάνειας και της ατμόσφαιρας περιλαμβάνεται στην περιοχή μηκών κύματος 5-100 μm και ονομάζεται «μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία».

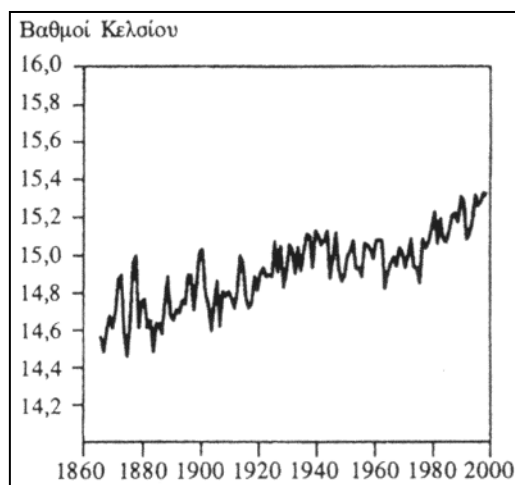
Το φαινόμενο του θερμοκηπίου ως ρυθμιστής της θερμοκρασίας της Γης

Το «φαινόμενο του θερμοκηπίου» (greenhouse effect) είναι όρος που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τη διαδικασία θέρμανσης της επιφάνειας της Γης. Η ηλιακή φωτεινή ακτινοβολία εκπέμπεται σε μικρού μήκους κύματα, εισέρχεται στη Γη και τη θερμαίνει. Η ένταση της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1373 W/m^2 (ηλιακή σταθερά). Αν όλη αυτή η ενέργεια έφθανε στην επιφάνεια της Γης και απορροφούνταν, ο πλανήτης θα είχε εξατμισθεί από καιρό. Η ωφέλιμη προσπίπτουσα ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας για έναν κύκλο 24 h είναι το 1/4 του ποσού αυτού, δηλαδή 343

W/m^2 . Από το ποσό αυτό, ανακλώνται προς το διάστημα περίπου $103 W/m^2$ (θεωρώντας ότι η πλανητική λευκαύγεια είναι της τάξης του 0,3) και περίπου $240 W/m^2$ απορροφώνται από την επιφάνεια της Γης και την ατμόσφαιρα. Έχει υπολογισθεί ότι το ποσό της ηλιακής ενέργειας που φθάνει κάθε ημέρα στην επιφάνεια της Γης ισοδυναμεί περίπου με ενέργεια 684 δισεκατομμυρίων τόνων άνθρακα.

Η Γη αφού θερμανθεί επανεκπέμπει - μαζί με μια μικρή συνεισφορά θερμότητας από το εσωτερικό της - τη θερμότητά της προς το διάστημα. Αυτή η ανακλώμενη θερμική ακτινοβολία, που εκπέμπεται σε μεγάλου μήκους κύματα, είναι η υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα αέρια της ατμόσφαιρας απορροφούν ορισμένη από τη θερμική ακτινοβολία και την ανακλούν πίσω στο έδαφος, σύμφωνα με το νόμο Stefan - Boltzmann, εμποδίζοντάς την να επανακάμψει προς το διάστημα, συμβάλλοντας έτσι στη δημιουργία ενός περιβάλλοντος πιο φιλικού για τη ζωή. Η σχέση των Stefan - Boltzmann εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η θερμική ισορροπία της Γης. Σύμφωνα με αυτήν είναι: $R_o = \epsilon \sigma T^4 \text{ cal}/(\text{cm}^2/\text{s})$ (1) όπου R_o η ενέργεια που εκπέμπεται με μορφή ακτινοβολίας, ϵ ο λόγος της πραγματικής ακτινοβολίας προς την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία, σ η σταθερά Stefan - Boltzmann και T η απόλυτη θερμοκρασία.

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι δεν προκαλείται συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας της Γης, αφού αυτή αυξάνει ταχύτατα (ανάλογη του T^4) την εκπομπή ενέργειας με την μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, ώστε να διατηρείται η θερμική ισορροπία. Έτσι, η μέση επιφανειακή θερμοκρασία του πλανήτη παραμένει σταθερή. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου τείνει να ανυψώσει την θερμοκρασία της θερμικής ισορροπίας και διατηρεί τη μέση γήινη επιφανειακή θερμοκρασία στο επίπεδο των 15°C (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια της Γης για τα έτη 1866 έως 2000. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στη θερμοκρασία οφείλονται και στην κλιματική μεταβλητότητα ως αποτέλεσμα της μεταβολής των φυσικών συνθηκών και όχι απαραίτητα στις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Πηγή: Goddard Institute, (State of the World, 1997).

Τα αέρια του θερμοκηπίου - Δυναμικό θέρμανσης GWP

Συντελεστής του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι ένα σύνολο αερίων της γήινης ατμόσφαιρας που είναι αναπόσπαστα συστατικά της για εκατομμύρια χρόνια και αναφέρονται ως «αέρια του θερμοκηπίου» (greenhouse gases). Τα

αέρια αυτά, είναι οι υδρατμοί (H_2O), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το τροποσφαιρικό όζον (O_3) και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O). Επιπλέον οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs), μια οικογένεια προϊόντων της χημικής βιομηχανίας που δεν υπήρχαν στην ατμόσφαιρα πριν το 1930, λειτουργούν ως αέρια του θερμοκηπίου διότι παρουσιάζουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Παρά το γεγονός ότι η χρήση τους έχει απαγορευτεί από το 1987 με το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, οι συγκεντρώσεις τους στην ατμόσφαιρα θα συνεχίσουν να είναι υψηλές για αρκετές δεκαετίες, αφού έχουν διάρκεια ζωής περί τα 100 χρόνια.

Ωστόσο, υπάρχουν αέρια, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το μονοξείδιο του αζώτου (NO), το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και μη μεθανιούχες πτητικές οργανικές ενώσεις, τα οποία δεν ανήκουν στα αέρια του θερμοκηπίου, αλλά συνεισφέρουν στην ενίσχυση του φαινομένου αντιδρώντας με άλλες χημικές ενώσεις, κάτι που επιφέρει μεταβολές στις συγκεντρώσεις των αερίων ρυπαντών της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα το CO παράγεται κατά την ατελή καύση καυσίμων που περιέχουν άνθρακα. Τα NO και NO_2 δημιουργούνται με την καύση της βιομάζας και από το ατμοσφαιρικό N_2O . Οι μη μεθανιούχες πτητικές οργανικές ενώσεις προέρχονται από τις μεταφορές, τις βιομηχανικές διεργασίες, την καύση βιομάζας και τη μη βιομηχανική χρήση διαλυτών.

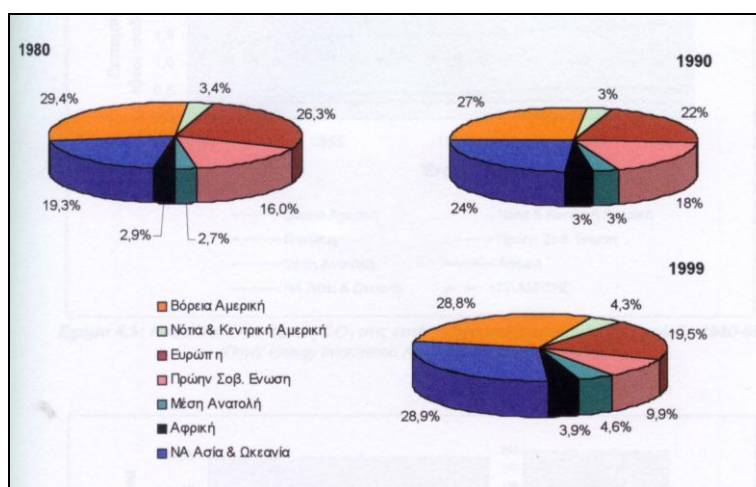
Η ποσοστιαία συμμετοχή των αερίων του θερμοκηπίου στην θέρμανση του πλανήτη δεν είναι σταθερή, δηλαδή τα αέρια αυτά επηρεάζουν το κλίμα σε διαφορετικό βαθμό. Για να εκτιμηθεί με ποσοτικούς όρους η συμμετοχή των θερμοκηπιακών αερίων έχει ορισθεί ένας δείκτης που ονομάζεται «δυναμικό θέρμανσης» (Global Warming Potential, GWP), ο οποίος εξαρτάται από το φάσμα απορρόφησης του κάθε αερίου, τον χρόνο παραμονής του στην ατμόσφαιρα, το μοριακό του βάρος και την περίοδο που ενδιαφέρει να εκτιμηθεί η συμμετοχή του κάθε αερίου. Για παράδειγμα το CH_4 σε ένα χρονικό ορίζοντα 100 ετών είναι 21 φορές ισχυρότερο αέριο του θερμοκηπίου από το CO_2 , το N_2O 310 φορές ισχυρότερο, ενώ οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), υποκατάστατα των CFCs, έως 11.700 φορές ισχυρότεροι από το CO_2 .

Πιθανά σενάρια για το ρυθμό αύξησης της συγκέντρωσης CO_2

Πολλές φορές γίνεται αναγωγή του όγκου ή της μάζας των εκλύσεων από τα άλλα αέρια του θερμοκηπίου σε ισοδύναμες εκλύσεις CO_2 . Ως «ισοδύναμη συγκέντρωση CO_2 » εννοείται η συγκέντρωση CO_2 που προκύπτει, αν μετατραπούν όλα τα αέρια του θερμοκηπίου σε ισοδύναμα μόρια CO_2 , λαμβάνοντας υπόψη για κάθε αέριο το «δυναμικό θέρμανσης». Τα σενάρια κλιματικής αλλαγής υιοθετούν μια θερμοκρασία κλιματικής ευαισθησίας και οι προβλέψεις τους αναφέρονται συνήθως στην ισοδύναμη συγκέντρωση CO_2 . Ο χρόνος που απαιτείται για το διπλασιασμό της συγκέντρωσης του CO_2 σε σχέση με τα επίπεδα πριν από την έναρξη της βιομηχανικής περιόδου, χρησιμοποιείται σε γενικές γραμμές σαν σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής της σύνθεσης της ατμόσφαιρας. Σύμφωνα με τα σενάρια της Διακυβερνητικής Επιτροπής του Ο.Η.Ε. για τις Κλιματικές Αλλαγές (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), διπλασιασμός της συγκέντρωσης του CO_2 αναμένεται να συμβεί το έτος 2060. Ο διπλασιασμός των ισοδυνάμων ποσοτήτων CO_2 θα συμβεί νωρίτερα από τον διπλασιασμό του ίδιου του CO_2 . Μία συμβολική χρονολογία είναι αυτή κατά την οποία το ισοδύναμο CO_2 θα διπλασιαστεί σε σχέση με την συγκέντρωσή

του πριν τη βιομηχανική εποχή. Οι εκτιμήσεις τοποθετούν το συμβολικό αυτό γεγονός μεταξύ του 2015 και του 2050, με μεγαλύτερη πιθανότητα γύρω στο 2030.

Δύο διακρατικοί οργανισμοί του Ο.Η.Ε. που συντονίζουν την IPCC, ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (World Meteorological Organization, WMO) και το Διεθνές Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα (United Nations Environment Program, UNEP), αναφέρουν ότι τα πιθανά σενάρια για το ρυθμό αύξησης της συγκέντρωσης του CO₂ στην ατμόσφαιρα είναι: α) Υψηλού ρυθμού που ισοδυναμεί σε διπλασιασμό της συγκέντρωσης του CO₂ μέχρι το έτος 2030, β) Μέσου ρυθμού που ισοδυναμεί σε διπλασιασμό της συγκέντρωσης του CO₂ μέχρι το έτος 2060 και γ) Χαμηλού ρυθμού που ισοδυναμεί σε διπλασιασμό της συγκέντρωσης του CO₂ μέχρι το έτος 2090.



Σχήμα 2. Ποσοστιαία συμμετοχή επτά γεωγραφικών περιφερειών στις παγκόσμιες εκπομπές CO₂ την περίοδο 1980 -2000. Πηγή: Energy Information Administration, (Διαδίκτυο).

Επιστημονικές της IPCC για τις κλιματικές αλλαγές

Το 1996, η IPCC με βάση λεπτομερέστερα στοιχεία, τόσο για τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, όσο και για τις αλλαγές που παρατηρήθηκαν στον υδρολογικό κύκλο, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι όλα τα υπάρχοντα στοιχεία συνηγορούν αναμφίβολα ότι “*οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζουν το κλίμα παγκοσμίως*” και διέτύπωσε την εκτίμηση ότι “*αν συνεχιστούν οι παρούσες τάσεις στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, τότε κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα η μέση παγκόσμια θερμοκρασία θα αυξηθεί γρηγορότερα σε σύγκριση με ότι παρατηρήθηκε εδώ και 10.000 χρόνια*”, (IPCC, 1996a). Το 2001, η IPCC σε πόρισμά της αναφέρει ότι “*τον 20ο αιώνα η μέση θερμοκρασία της Γης αυξήθηκε από 0,3^oC έως 0,6^oC, γεγονός που αναδεικνύει τον αιώνα αυτόν ως τον θερμότερο των τελευταίων 1.000 χρόνων*” (IPCC, 2001).

Το συμπέρασμα αυτό έγινε ευρέως αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα, καθώς αντιπροσωπεύει την παρούσα κατάσταση της επιστημονικής γνώσης. Από την πλειοψηφία των επιστημόνων εκφράζεται η γενική συμφωνία με τις διαπιστώσεις της IPCC, ότι δηλαδή εμφανίζεται η παγκόσμια θέρμανση και ότι τουλάχιστον εν μέρει προκαλείται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι φυσικές επιδράσεις ήταν σχετικά σημαντικότερες στη θέρμανση στις αρχές του 20ου αιώνα, ενώ οι ανθρώπινες επιδράσεις έχουν διαδραματίσει κυρίαρχο ρόλο στη θέρμανση που

παρατηρήθηκε στις πρόσφατες δεκαετίες. Η άνοδος αυτή της μέσης θερμοκρασίας κατά μερικά δέκατα του βαθμού έχει στατιστικό χαρακτήρα και ακούγεται ασήμαντη, αφού δεν γίνεται αισθητή από τους ανθρώπους. Ωστόσο, ακόμη και μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας διαταράσσει την ισορροπία της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να αλλάζει το καθεστώς των βροχοπτώσεων και των ανέμων αφενός, και αφετέρου οδηγεί σε άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας, η οποία αποδίδεται περισσότερο στη θερμική διαστολή του νερού των ωκεανών και δευτερευόντως στην τήξη των παγετώνων. Ήδη, ο δορυφόρος Topex/Poseidon από το 1993 υπέδειξε μια αύξηση του μέσου επιπέδου της θάλασσας κατά 2,5 mm/έτος.

Πέρα όμως από την πιθανολογούμενη κλιματική αλλαγή, έχουν γίνει άλλες δύο βέβαιες αλλαγές, μείζονος ψυχολογικού και κοινωνικού χαρακτήρα. Η πρώτη έχει την μορφή μιας συνεχώς εντεινόμενης ενημέρωσης από τα μέσα επικοινωνίας, τα οποία μεταφέρουν σε κάθε σπίτι πλημμύρες, καταστροφές και όποιο ακραίο καιρικό φαινόμενο συμβαίνει σε κάθε γωνιά του πλανήτη, μεγεθύνοντας πολλές φορές το παραμικρό φυσικό φαινόμενο που σε διαφορετική περίπτωση δεν θα γινόταν γνωστό. Έτσι, δημιουργείται η εντύπωση ότι τα φαινόμενα αυτά γίνονται πιο συχνά και ότι κάτι αρχίζει να αλλάζει στο κλίμα. Η δεύτερη αφορά τη στάση του ανθρώπου απέναντι στη φύση, η οποία αμύνεται και προειδοποιεί, πολλές φορές με οδυνηρό τρόπο, για τις επικείμενες επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών σε όλους τους τομείς των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Τα κλιματικά μοντέλα και οι αβεβαιότητές τους

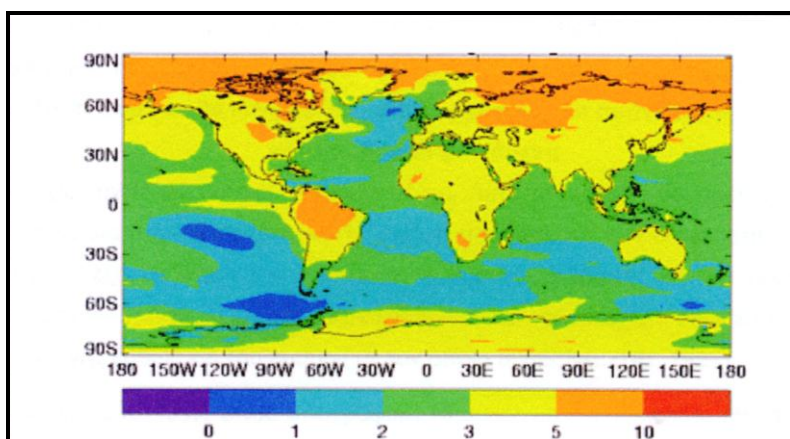
Τα κλιματικά μοντέλα προσπαθούν να αναπαραστήσουν τη εξέλιξη του κλίματος, έτσι ώστε να εξηγήσουν τις αλλαγές που έχουν συμβεί στο παρελθόν και να προβλέψουν το κλίμα του μέλλοντος, μελετώντας τις συνέπειες των επιδράσεων του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον. Για να εκτιμηθεί η ευαισθησία του κλίματος στις κλιματικές αλλαγές συνήθως λειτουργούν ταυτόχρονα δύο κλιματικά μοντέλα, ένα για την ατμόσφαιρα και ένα για τους ωκεανούς, τα οποία αν και ξεχωριστά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Παρόλα αυτά υπάρχουν κι άλλα μοντέλα, όπως ποταμών ή πάγων. Τα μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης του καιρού χωρίζονται σε Παγκόσμια Ατμοσφαιρικά Μοντέλα (Global Atmospheric Models) και σε Μοντέλα Περιορισμένης Περιοχής (Limited Area Models, LAMs). Η εκτίμηση της ευαισθησίας του κλίματος στις αλλαγές της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου γίνεται κυρίως μέσω των Μοντέλων Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models, GCMs), τα οποία αποτελούν απλοποιημένες αναπαραστάσεις της λειτουργίας του κλιματικού συστήματος. Για τον ίδιο σκοπό χρησιμοποιούνται ακόμη τα Μοντέλα Ενεργειακού Ισοζυγίου (Energy - Balance Models, EBMs) και τα Μοντέλα Ακτινοβολίας - Μεταγωγής Θερμότητας (Radiative - Convective Models, RCMs). Αυτά όμως παρουσιάζουν περιορισμένο γεωγραφικό και χρονικό πεδίο ενώ αποκλείουν τις υδρολογικές διαδικασίες. Επίσης, άλλα μοντέλα με βελτιώσεις στον τομέα της ατμοσφαιρικής δυναμικής είναι τα Στατιστικά - Δυναμικά Μοντέλα (Statistical - Dynamical Models, SDMs).

Πιο συγκεκριμένα τα GCMs προσπαθούν να αναπαραστήσουν τις φυσικές διαδικασίες που ελέγχουν το κλιματικό σύστημα, με εργαλεία τις εξισώσεις της υδροδυναμικής του Von Helmholtz και τις μεθόδους επίλυσης διαφορικών εξισώσεων με τη βοήθεια σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτά

παρουσιάζουν λεπτομερή αναπαράσταση των ατμοσφαιρικών κινήσεων και της ανταλλαγής θερμότητας καθώς και τις αλληλεπιδράσεις ξηράς - ωκεανών - πάγων. Φαινόμενα ανάδρασης, όπως οι διαδικασίες που μπορεί να ελαττώσουν ή να ενισχύσουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, περιλαμβάνονται αυτομάτως σε αυτά τα μοντέλα και αναφέρονται κυρίως σε αλλαγές στη χιονοκάλυψη ή στη παγοκάλυψη, στα σύννεφα και στους υδρατμούς. Στο μεγαλύτερο μέρος των πειραμάτων που πραγματοποιούνται γίνονται προσπάθειες να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις από τον απότομο διπλασιασμό των συγκεντρώσεων του CO₂ στο κλίμα (“equilibrium response” experiments). Τον τελευταίο καιρό δίνεται έμφαση σε περισσότερο ρεαλιστικά πειράματα (“transient response” experiments), στα οποία οι κλιματικές αλλαγές εκτιμούνται με βάση την υπόθεση ότι οι συγκεντρώσεις του CO₂ αυξάνονται σταδιακά (π.χ. 1% ανά έτος).

Τα κλιματικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας ωκεανών και ατμόσφαιρας συμφωνούν ότι και οι φυσικοί και οι ανθρωπογενείς παράγοντες έχουν συμβάλει σημαντικά στις αλλαγές της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα και προβλέπουν ότι η άνοδος της θερμοκρασίας πιθανότατα να συνεχιστεί κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα. Η αύξηση θα είναι εντονότερη στις πολικές περιοχές, γι’ αυτό η Αρκτική και η Ανταρκτική παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση κλιματικών αλλαγών. Ακόμη, προβλέπουν μείωση του χιονιού και των πάγων, αυξομειώσεις των βροχοπτώσεων ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων.

Σύμφωνα με έκθεση του Βρετανικού Κλιματολογικού Κέντρου Hadley Center, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από υπολογιστικά πειράματα κλιματικών μοντέλων (δύο διαφορετικών παραλλαγών των GCMs: Had CM2 και Had CM3), λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και των θειούχων ενώσεων προβλέπουν μια μακροχρόνια αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας της τάξης των 0,2^o C / δεκαετία, μια αύξηση που είναι δυο φορές μεγαλύτερη από αυτή που μπορούν να υποστούν τα πιο ευαίσθητα οικοσυστήματα (Hadley Center, 1995), (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Προβλεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας στο τέλος του 21ου αιώνα. Πηγή: The Met Office - Hadley Center for Climate Prediction and Research, (Διαδίκτυο).

Ωστόσο, τα μοντέλα GCMs αποκλίνουν σημαντικά όσον αφορά τις εκτιμήσεις σε περιφερειακή και τοπική κλίμακα, όπου οι αβεβαιότητες είναι μεγαλύτερες και προέρχονται κυρίως από την ελλιπή γνώση και

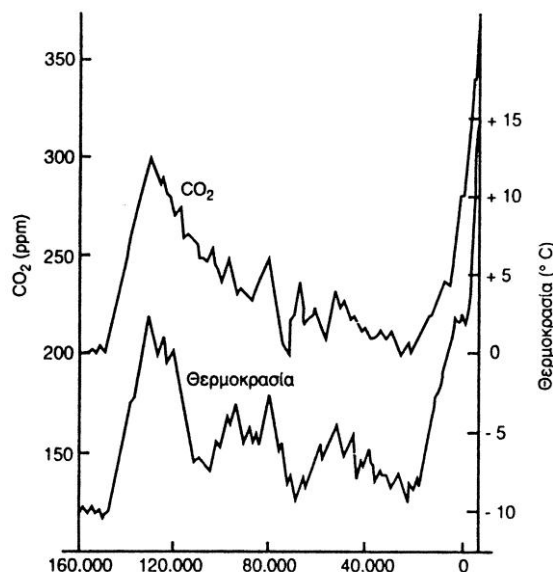
προσομοίωση (simulation) παραμέτρων, όπως είναι τα νέφη, οι ωκεανοί, τα αέρια του θερμοκηπίου και οι πολικοί πάγοι. Επίσης αυτά εμπριέχουν και ορισμένους περιορισμούς, με σημαντικότερους τους ακόλουθους: α) Η περιορισμένη διακριτική ικανότητα των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων οδηγεί στο να μην μπορούν να απεικονισθούν επακριβώς πολλά γεωγραφικά χαρακτηριστικά, όπως επίσης και οι αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της Γης, β) Οι φυσικές διακυμάνσεις του κλίματος σε τοπικό επίπεδο είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που προβλέπονται από το μέσο κλίμα ηπείρων ή ευρύτερων περιοχών, γ) Η ανισομερής χωρική δράση των αερολυμάτων δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη στα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα. Να σημειωθεί ότι ελάχιστα πειράματα συμπεριλαμβάνουν στα δεδομένα τους τις εκπομπές των αεροζόλ, ενώ ακόμα και όταν συμβαίνει κάτι τέτοιο αυτό γίνεται με πολύ απλοποιημένο τρόπο και δ) Οι αλλαγές στις χρήσεις γης, όπως η αποδάσωση και η ερημοποίηση, δεν λαμβάνονται συχνά υπόψη, παρόλο που επηρεάζουν καθοριστικά το κλίμα σε τοπικό επίπεδο.

Σε γενικές γραμμές οι προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων βρίσκονται ακόμη στη σφαίρα των εντελώς προσεγγιστικών εκτιμήσεων, λόγω ανεπάρκειας γνώσεων σχετικά με τους βιογεωχημικούς κύκλους (αλληλεπίδραση ατμόσφαιρας - ωκεανού, δυναμική νεφοκάλυψης και αλληλεπίδραση με ακτινοβολία). Επιπλέον αυτά βασίζονται μεταξύ των άλλων και σε υποθέσεις που είναι, όχι μόνο άγνωστες, αλλά είναι αδύνατον να γίνουν γνωστές με την ακρίβεια που απαιτείται για τον καθορισμό της ανάλογης πολιτικής σχετικά με την ενέργεια, τη γεωργία και τα δάση.

Αν και τα υπάρχοντα κλιματικά μοντέλα διαχειρίζονται ένα μικρό μόνο αριθμό κλιματικών παραγόντων, η αξιοπιστία τους βελτιώνεται συνέχεια, ώστε αυτά να παραμένουν μέχρι στιγμής τα καλύτερα εργαλεία στα χέρια των ερευνητών για την πρόβλεψη της έκτασης και του μεγέθους των μελλοντικών κλιματικών αλλαγών. Σήμερα η διερεύνηση των πιθανών επιπτώσεων που μπορεί να έχουν τέτοιες αλλαγές αποτελεί σημαντική επιστημονική πρόκληση.

Τελικά θα υπάρξει μονιμότερη κλιματική αλλαγή;

Είναι γεγονός ότι η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου καθώς και η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας τις τελευταίες δεκαετίες δεν αμφισβητείται επιστημονικά (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Μεταβολή της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα και της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας από το 160.000π.Χ. μέχρι σήμερα. Πηγή: Κουϊμτζή Θ., κ.ά., «Χημεία Περιβάλλοντος».

Ωστόσο, κανένας επιστήμονας δεν διατείνεται ότι απάντησε τεκμηριωμένα στο πρόβλημα, αν το φαινόμενο αυτό είναι υπεύθυνο για την αύξηση της μέσης γήινης θερμοκρασίας. Το σαφές αίτιο των αλλαγών αυτών, δηλαδή η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου από ανθρώπινες δραστηριότητες, αποτελεί ένα αδιευκρίνιστου ύψους ποσοστό των αιτίων που επηρεάζουν καθοριστικά τις όποιες κλιματικές αλλαγές, εξαιτίας της πολυπλοκότητάς τους και της ίδιας της χαοτικής τους φύσης. Η βασική υποψία, ότι δεν είναι δυνατό το θερμικό περιεχόμενο της ατμόσφαιρας να μεγαλώνει εξαιτίας κυρίως της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου και το γεγονός αυτό να μην έχει επίπτωση στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, δεν είναι επιστημονική απόδειξη, ώθησε όμως τη διεθνή κοινότητα σε επανειλημμένες συζητήσεις για τη λήψη μέτρων σχετικών με τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Σχετικά με το μέλλον, η εκδήλωση ενός ενισχυμένου φαινομένου θερμοκηπίου αποτελεί σοβαρή επιστημονική πρόβλεψη. Ωστόσο, η εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε τοπικό επίπεδο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τρεις πολυδιάστατους και σημαντικού βαθμού αβεβαιότητας παράγοντες, που εμποδίζουν μια ακριβέστερη πρόβλεψη για την αναμενόμενη κλιματική αλλαγή. Ο πρώτος είναι οι μελλοντικές συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και οι αλλαγές στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας. Ο δεύτερος είναι η ευαισθησία του κλίματος σε τέτοιες αλλαγές συμπεριλαμβανομένων και των φαινομένων ανάδρασης, ενδογενών του κλιματικού συστήματος που μπορεί να αυξήσουν ή να ελαττώσουν την αρχική θέρμανση. Ο τρίτος παράγοντας είναι η θερμική αδράνεια των ωκεανών που δημιουργεί μια καθυστέρηση στην αντίδραση του κλιματικού συστήματος και επιβραδύνει το ρυθμό της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας. Έτσι τα μέχρι τώρα αποτελέσματα των ερευνών για την πρόγνωση των κλιματικών αλλαγών δεν είναι κατηγορηματικά και σαφή.

Αντίθετα, σαφείς είναι οι διαφορετικές ερμηνείες, που φτάνουν συχνά να γίνονται αφορμή για αντιμαχίες μεταξύ των επιστημόνων, καταδεικνύοντας πόσο δύσκολες και αμφισβητήσιμες είναι οι προγνώσεις για το κλίμα. Πράγματι, είναι δύσκολο να ανιχνευθούν οι πιθανές κλιματικές αλλαγές, καθώς οι έντονες διακυμάνσεις του κλίματος σε τοπικό επίπεδο καλύπτονται, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, από τις φυσικές διακυμάνσεις. Η αντίδραση του κλιματικού συστήματος στην ακτινοβολία παρουσιάζει μια τεράστιου βαθμού πολυπλοκότητα, ενώ η χρονική διάρκεια επηρεασμού και αντίδρασης των μερών του κλιματικού συστήματος είναι μεγάλη σε σχέση με το χρόνο της μέσης ανθρώπινης ζωής. Η σχετικά μικρή περίοδος των παρατηρήσεων και το περιορισμένο αρχείο κλιματικών δεδομένων που υπάρχει σε πλανητικό επίπεδο καθιστά δύσκολη την ανίχνευση ξεκάθαρων τάσεων και δημιουργεί αβεβαιότητα γύρω από την κλίμακα των φυσικών διακυμάνσεων. Για παράδειγμα, η άνοδος της θερμοκρασίας των νερών των ωκεανών απαιτεί ένα μεγάλο χρονικό διάστημα και η εμφάνιση των επιπτώσεων στο κλίμα απαιτεί ένα ακόμα μεγαλύτερο διάστημα. Εξάλλου οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων που επηρεάζουν το κλιματικό σύστημα,

όπως είναι η ατμόσφαιρα, η βιόσφαιρα, η υδρόσφαιρα, οι πάγοι και το λεπτό στρώμα γης, δημιουργούν φαινόμενα που είναι χαοτικά, και για τις νομοτέλειες των χαοτικών συστημάτων η επιστήμη προς το παρόν γνωρίζει ελάχιστα πράγματα. Ελάχιστη είναι η γνώση για το πως θα αλλάξει το κλιματικό σύστημα, αν μεταβληθούν κατά ελάχιστο κάποιες παράμετροι της ύπαρξής του. Στις καταστάσεις αυτές, για ελάχιστες μεταβολές των όρων ύπαρξης παρουσιάζεται μια τεράστια μεταβολή του συστήματος. Σε μερικά χρόνια η γνώση στον τομέα αυτόν πιθανότατα να προχωρήσει. Σήμερα, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται στατιστικά, στη βάση της υπάρχουσας γνώσης των φυσικών επιστημών.

Επιπλέον, το κλιματικό σύστημα είναι τόσο πολύπλοκο, ορισμένοι παράγοντες που συμμετέχουν στη διαμόρφωσή του τόσο απρόβλεπτοι και η αλληλεπίδραση αυτών των παραγόντων τόσο σύνθετοι, ώστε τα υπάρχοντα κλιματικά μοντέλα να χαρακτηρίζονται απλουστευμένα, δηλαδή ατελή και επομένως μειωμένης προγνωστικής ικανότητας, οι δε εκτιμήσεις τους πρέπει να εκλαμβάνονται μόνο ως σενάρια και όχι ως σίγουρες προβλέψεις.

Την τελευταία πενταετία δημοσιεύτηκαν σημαντικές εργασίες, οι οποίες αμφισβητούν την εγκυρότητα των προβλέψεων των σεναρίων της IPCC. Με αυτές τις μελέτες δεν επιχειρείται να δοθεί το μήνυμα ότι πρέπει να αγνοηθούν οι επιδράσεις του ανθρώπου στο περιβάλλον και κυρίως η επίδραση της αύξησης των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στο κλίμα. Ούτε είναι δυνατόν να προφητευτεί ότι δεν θα υπάρξει μονιμότερη κλιματική αλλαγή. Απλώς καταδεικνύεται πόσο δύσκολες και αμφισβητήσιμες είναι οι προγνώσεις, αλλά και πόσο μεταβλητό είναι ούτως ή άλλως το κλίμα στην ανθρώπινη μικροκλίμακα με ή χωρίς ανθρωπογενείς επιδράσεις. Εξάλλου η κλίμακα της κλιματικής ιστορίας είναι αστρονομική και οι πραγματικές και ουσιαστικές μεταβολές στο κλίμα συμβαίνουν μέσα σε χιλιάδες ή εκατομμύρια χρόνια. Η συνεχής ροή των φυσικών φαινομένων και ο πλούτος των εναλλαγών της συμπεριφοράς του κλίματος είναι σχεδόν αδύνατο να αναγνωρισθεί από τον άνθρωπο χωρίς τη βοήθεια μεγάλου αριθμού παρατηρήσεων, οι οποίες πρέπει να αναλυθούν στατιστικά. Με δεδομένο λοιπόν ότι οι προβλέψεις για το κλίμα δεν είναι ακόμη ολοκληρωμένες, οι αυξημένες συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ενδεχομένως να μην είναι γνήσια απόδειξη της ανθρώπινης επιρροής στο παγκόσμιο κλίμα.

ΠΗΓΕΣ

1. Βαρώτσος Κ., Kondratyev K., (1996), «Φυσικοχημεία Περιβάλλοντος», Τόμος Ι, «Ακτινοβολία-Θερμοκήπιο-Κλιματική Αλλαγή», Κωσταράκη, Αθήνα, 36, 64, 132.
2. Ρόκος Δ., (2003), «Από τη “βιώσιμη” ή “αιφόρο” στην αξιοβίωτη ολοκληρωμένη ανάπτυξη», (Η συμβολή της τηλεπισκόπησης και των ολοκληρωμένων συστημάτων πληροφοριών Γης και Περιβάλλοντος στη μελέτη και παρακολούθηση των πλανητικών μεταβολών (Global Change)), Λιβάνη, Αθήνα, 245, 247, 256.
3. Χατζημπίρος Κ., (2001), «Οικολογία - Οικοσυστήματα και προστασία του περιβάλλοντος», Συμμετρία, Αθήνα, 228, 231, 233.

4. Brown L. and Worldwatch Institute, (1997), «State of the World», Επιμέλεια Ελληνικής Έκδοσης Μ. Μοδινός, Bright C., «Αποτυπώνοντας την οικολογία της κλιματικής αλλαγής», Δ.Ι.Π.Ε. / Νέα Οικολογία, Αθήνα, 130, 131.
5. European Commission Directorate - General XI Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, (1996), «European Community environment legislation», Volume 2 - Air, Brussels, Luxembourg, 229.
6. Jakeman A.J, Beck M.B, McAleer M.J., (1993), «Modelling Change in Environmental Systems», Wiley and Sons, England, 456.
7. Mimikou M.A., (1995), «Climate Change», Chapter 3 of the book: «Environmental Hydrology», (Singh V.P.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 77.
8. Pethick J., (1984), «An Introduction to Coastal Geomorphology», Edward Arnold, London, 234.
9. Suplee C., «Κλίμα: Το μεγάλο αίνιγμα», Γαϊόραμα, Τεύχος 6ο, Έτος 3οο, Μάρτιος - Απρίλιος, 118, 133.
10. UNEP, (1992), «Climate Change and the Mediterranean», Edward Arnold, London.
11. Yann Arthus - Bertrand, (1999), «The earth from the air», Thames & Hudson, London, 373, 376.