

Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής

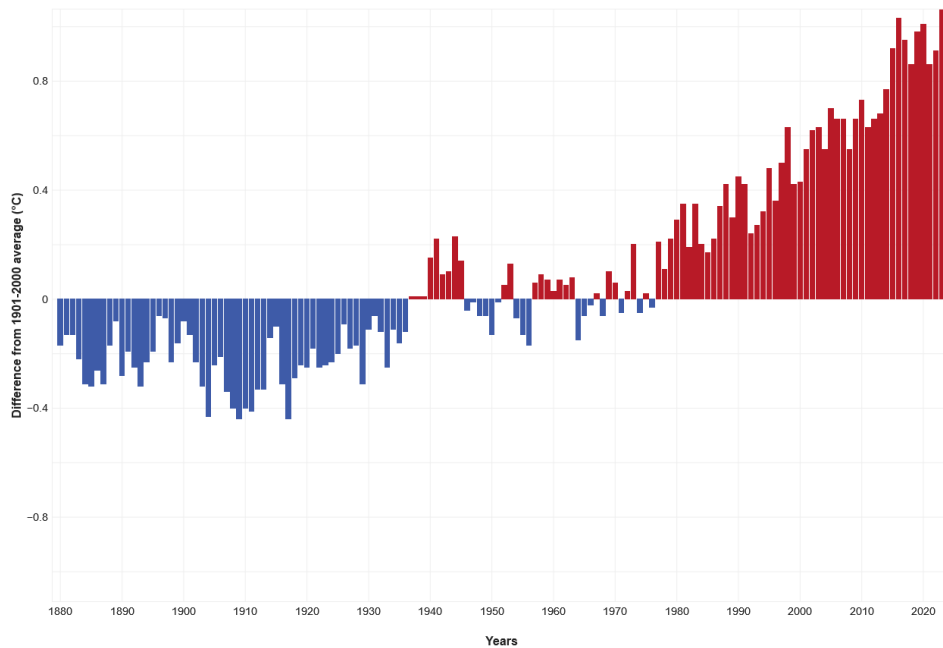
Ηλίας Αγαθαγγελίδης, Μεταδιδάκτορας, Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ

Περίληψη

Καθώς αυξάνονται οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπιακών αερίων, το ίδιο συμβαίνει και με τη θερμοκρασία του πλανήτη. Κατά την τελευταία δεκαετία σημειώθηκαν οι υψηλότερες καταγεγραμμένες θερμοκρασίες στην Ιστορία, ενώ σχεδόν όλες οι χώρες πλήττονται κάθε καλοκαίρι από συχνότερους καύσωνες. Σε ορισμένες περιοχές η εμφάνιση ακραίων βροχοπτώσεων και πλημμυρών είναι ολοένα και συχνότερη, ενώ παράλληλα πολλές περιοχές πλήττονται από εντονότερα και μεγαλύτερης διάρκειας φαινόμενα ξηρασίας. Μεγάλο ποσοστό της επιπλέον θερμότητας από την ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου απορροφάται από τους ωκεανούς, οι οποίοι διαστέλονται ως επακόλουθο θέρμανσης, με αποτέλεσμα την άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας. Σε αυτό συμβάλλει εξίσου σημαντικά το λιώσιμο των στρωμάτων πάγου της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής, ενώ επιπρόσθετα η έκταση του θαλάσσιου πάγου της Αρκτικής συνεχώς συρρικνώνεται.

1. Η εποχή του παγκόσμιου «βρασμού»

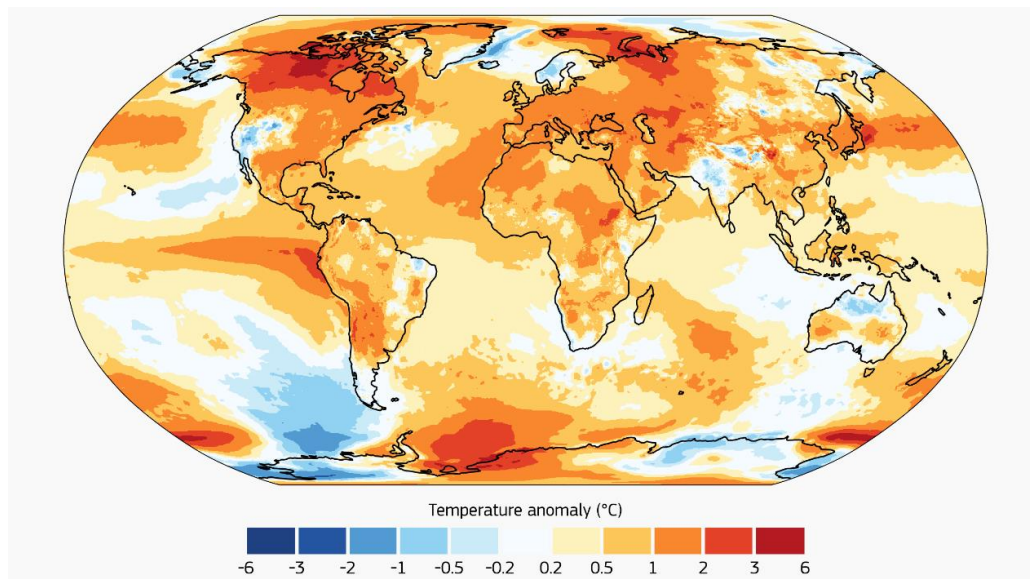
Οι παρατηρήσεις της θερμοκρασίας σε παγκόσμια κλίμακα δείχνουν μια σαφή θέρμανση του πλανήτη τα τελευταία 150 έτη, λόγω της αύξησης των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου. Συνδυάζοντας μετρήσεις θερμοκρασίας από πολλαπλές πηγές, έχει εκτιμηθεί ότι η μέση θερμοκρασία της Γης είναι σήμερα μεγαλύτερη κατά 1,1 °C συγκριτικά με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Αν και η Βιομηχανική Επανάσταση και κατά συνέπεια οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έχουν την απαρχή τους στα μέσα του 18^{ου} αιώνα, οι επιστήμονες κατά κανόνα χρησιμοποιούν την περίοδο 1850 – 1900 ως περίοδο αναφοράς. Αυτό συμβαίνει, καθώς τότε σημειώνεται η αρχή των συστηματικών μετρήσεων της θερμοκρασίας παγκοσμίως.



Εικόνα 1 Ετήσιες διαφορές της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας σε σχέση με τη μέση τιμή του 20^{ου} αιώνα.

Η υπερθέρμανση του πλανήτη ως συνέπεια της κλιματικής αλλαγής δεν συντελείται με γραμμικό τρόπο, έτσι συχνά παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας από έτος σε έτος ή από περιοχή σε περιοχή. Η παραπάνω διακύμανση οφείλεται στην ιδιαίτερη πολυπλοκότητα του κλιματικού συστήματος, με το φαινόμενο του θερμοκηπίου να είναι ένας μόνο από τους δεκάδες παράγοντες οι οποίοι διαμορφώνουν τις θερμοκρασίες παγκοσμίως. Επιπρόσθετα με την ανθρωπογενή επίδραση στο κλίμα, μεγάλα ποσά θερμότητας κινούνται εξαιτίας φυσικών διεργασιών δια μέσω της ατμόσφαιρας και των ωκεανών. Αυτοί οι μηχανισμοί επηρεάζουν άμεσα τη θερμοκρασία του πλανήτη, οδηγώντας σε ψυχρότερα ή θερμότερα έτη, όπως στην περίπτωση που επικρατεί το φαινόμενο Ελ Νίνιο, ή σε περιοχές με μικρότερη θερμική επιβάρυνση.

Παρόλο την ύπαρξη των παραπάνω ετήσιων και τοπικών διακυμάνσεων, η τάση αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη παγκοσμίως είναι αδιαμφισβήτητη. Σύμφωνα με υπολογισμούς, η Γη θερμαίνεται από το 1850 με ρυθμό 0,06 °C ανά δεκαετία, ενώ τα τελευταία 40 έτη, η ταχύτητα αύξησης της θερμοκρασίας έχει γίνει τρεις φορές μεγαλύτερη (αύξηση περίπου 0,2 °C ανά δεκαετία). Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό, τα 10 τελευταία έτη καταγράφηκαν ως τα 10 θερμότερα στην Ιστορία, μάλιστα, το 2023 είναι το έτος με τις υψηλότερες καταγεγραμμένες μέσες θερμοκρασίες στον πλανήτη. Όπως εκτιμάται από τους επιστήμονες, η μέση θερμοκρασία της Γης το 2023 υπερέβη κατά περίπου 1,4 °C τη μέση θερμοκρασία του πλανήτη κατά το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα.



Εικόνα 2 Διαφορά της μέσης θερμοκρασίας για το έτος 2023 συγκριτικά με τη μέση τιμή της περιόδου αναφοράς 1991 – 2020.

Αν και, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από έτος σε έτος δύναται να υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, βλέπουμε ότι ο στόχος για τη διατήρηση της αύξησης της θερμοκρασίας κάτω από τον 1,5 °C πολύ σύντομα θα καταρριφθεί. Το κρίσιμο όριο του 1,5 °C αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα τέθηκε με τη Συμφωνία του Παρισιού για το Κλίμα το 2015. Επιπλέον, το 2018 η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή ανέδειξε ότι η συγκράτηση της θερμοκρασίας στο παραπάνω όριο, θα περιορίσει σημαντικά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα οικοσυστήματα, την ανθρώπινη υγεία και την οικονομία συγκριτικά με μια αύξηση των 2 °C. Αν και μισός βαθμός Κελσίου φαντάζει μικρή διαφορά, μελέτες δείχνουν ότι από αυτόν εξαρτάται αν δεκάδες εκατομμύρια επιπλέον άνθρωποι θα εκτίθενται σε ισχυρούς καύσωνες ή αν οι κοραλλιογενείς ύφαλοι του πλανήτη χαθούν τελείως από τους ωκεανούς. Επιπλέον, οι επιστήμονες προειδοποιούν ότι η θερμοκρασία του πλανήτη μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 4 °C ως το τέλος του 21^{ου} αιώνα, εάν επιβεβαιωθεί το δυσμενέστερο σενάριο για τις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα.

Όσον αφορά την Ευρώπη, στις αρχές της δεκαετίας του 1980 η μέση θερμοκρασία της παρουσίαζε πολύ μικρή αύξηση συγκριτικά με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Η κατάσταση έχει αλλάξει ωστόσο ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Μάλιστα, η θερμοκρασιακή αύξηση στην Ευρώπη, είναι κατά 1 °C μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή παγκοσμίως. Αυτή η υπερθέρμανση σημειώνεται κυρίως στις βόρειες περιοχές της Ευρώπης τον χειμώνα και στην κεντρική και νοτιοανατολική Ευρώπη κατά τους θερινούς μήνες.

Εκτός από τη μέση αύξηση της θερμοκρασίας παγκοσμίως, έχει παρατηρηθεί τις τελευταίες δεκαετίες ένας ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός επεισοδίων καύσωνα. Οι καύσωνες τείνουν επιπλέον να είναι συχνότεροι, να διαρκούν περισσότερο, και να είναι πιο έντονοι. Σε μερικά από τα πρόσφατα επεισόδια καύσωνα σημειώθηκαν πρωτοφανείς υψηλές θερμοκρασίες που υπερέβησαν τα προηγούμενα ρεκόρ δεκαετιών. Για παράδειγμα, ο καύσωνας του 2010 στη Ρωσία εκτιμάται ότι οδήγησε στον θερμότερο Ιούλιο από το 1880. Ο αριθμός των νεκρών που αποδίδονται στον συγκεκριμένο καύσωνα υπολογίζεται ότι ξεπέρασε τις 11.000. Επιπλέον, εκτός από την αύξηση των ακραίων υψηλών θερμοκρασιών, παρατηρείται επιπρόσθετα και μείωση των ελαχίστων θερμοκρασιών κατά τους χειμερινούς μήνες. Ταυτόχρονα, σημειώνονται σημαντικές μεταβολές στη διαδοχή των εποχών μέσα στο έτος, η άνοιξη φθάνει νωρίτερα και το φθινόπωρο αργότερα, προκαλώντας αποσταθεροποίηση των οικοσυστημάτων.

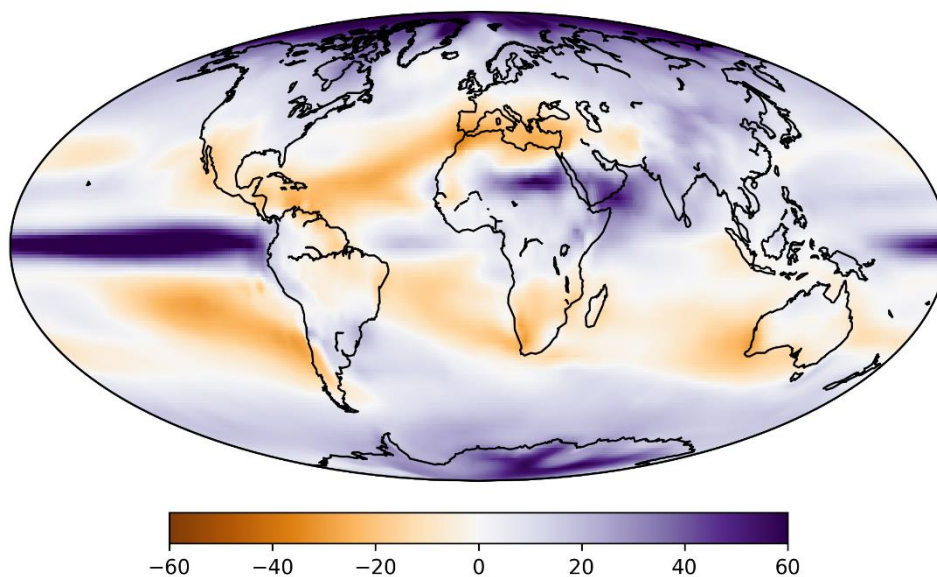
2. Η κλιματική αλλαγή διαταράσσει τον υδρολογικό κύκλο

Καθώς ο πλανήτης θερμαίνεται λόγω της αύξησης των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου, μεταβάλλεται ταυτόχρονα το σύνολο των συνιστωσών του κύκλου του νερού. Θερμότερο κλίμα σημαίνει εντονότερη εξάτμιση από τους ωκεανούς, την επιφάνεια του εδάφους και τα φυτά, και ισχυρότερη ικανότητα του ατμοσφαιρικού αέρα να συγκρατήσει υδρατμούς. Μια ατμόσφαιρα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υδρατμούς συνεπάγεται σφοδρότερες βροχοπτώσεις και μεγαλύτερη πιθανότητα σε πλημμυρικά φαινόμενα.

Όπως στην περίπτωση της θερμοκρασίας, οι μεταβολές στις βροχοπτώσεις λόγω κλιματικής αλλαγής δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στον πλανήτη. Ως αποτέλεσμα της υπερθέρμανσης της Γης, μερικές περιοχές τείνουν να δέχονται περισσότερες βροχοπτώσεις από ότι συνήθως και άλλες να γίνονται πιο ξηρές. Ακόμα και εάν σε ένα μέρος η μέση ετήσια βροχόπτωση δεν έχει μεταβληθεί σημαντικά, η ποσότητα της βροχής είναι συχνά συγκεντρωμένη σε πιο σύντομες χρονικές περιόδους, με παρατεταμένα διαστήματα ανομβρίας ενδιάμεσα.

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα και έπειτα, η βροχόπτωση έχει γενικά αυξηθεί στον Ισημερινό, στα μέσα και κυρίως τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη του βορείου ημισφαιρίου, ενώ έχει μειωθεί στις υποτροπικές περιοχές (στην ζώνη γύρω από τις 30 μοίρες γεωγραφικό πλάτος). Γενικότερα, ο ρυθμός αύξησης της βροχόπτωσης παρουσιάζει επιτάχυνση μετά τη δεκαετία του 1980. Στις περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής έχει παράλληλα καταγραφεί αύξηση της συχνότητας και της έντασης των σφοδρών βροχοπτώσεων. Στις υπόλοιπες ηπείρους υπάρχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα για την εκτίμηση της μακροχρόνιας τάσης των ακραίων βροχοπτώσεων, εν μέρει ως απόρροια του μικρότερου αριθμού μετεωρολογικών παρατηρήσεων. Ταυτόχρονα, υπάρχει παγκοσμίως η τάση για ισχυρότερους τροπικούς

κυκλώνες, κάτι το οποίο μπορεί να αποδοθεί στις υψηλότερες θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας, οι οποίες τροφοδοτούν τους κυκλώνες με μεγάλα ποσά ενέργειας και συμβάλλουν στην εντονότερη εξάτμιση του νερού. Ιδιαίτερα σε ότι αφορά την περιοχή του Ατλαντικού, η συχνότητα και η σφοδρότητα των κυκλώνων εμφανίζει σημαντική αύξηση. Παρόμοια τάση έχει καταγραφεί και για την περίπτωση των μεσογειακών κυκλώνων. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των κλιματικών μοντέλων, η γενικότερη τάση της βροχόπτωσης τις τελευταίες δεκαετίες αναμένεται να συνεχιστεί και για μελλοντικές περιόδους. Δηλαδή, σύμφωνα με τα μοντέλα αναμένεται περαιτέρω αύξηση των βροχοπτώσεων στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη του βορείου ημισφαιρίου και τον Ισημερινό (ειδικά στον Ειρηνικό ωκεανό), και μια συνεχιζόμενη μείωση στα υποτροπικά γεωγραφικά πλάτη. Η μελλοντική μείωση της βροχόπτωσης για την περιοχή της Μεσογείου βρέθηκε ότι μπορεί να φτάσει έως και το 20% κατά το τέλος του 21^{ου} αιώνα. Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για το Κλίμα η ημερήσια βροχόπτωση εξαιτίας ακραίων φαινομένων θα αυξάνει κατά 7% για κάθε επιπλέον βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα λόγω της κλιματικής αλλαγής, με μια συνολική αύξηση της τάξης του 16 – 24%.



Εικόνα 3 Εκτιμώμενη διαφορά μέσω κλιματικών μοντέλων της μέσης βροχόπτωσης για το την περίοδο 2081 – 2100, συγκριτικά με τη μέση τιμή της περιόδου 1981 – 2000.

Η υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα και οι μεγαλύτερες συνεχόμενοι περίοδοι χωρίς βροχοπτώσεις οδηγούν σε μικρότερα ποσοστά υγρασίας στο έδαφος και ευνοϊκότερες συνθήκες για την ανάπτυξη ξηρασίας. Ειδικότερα μερικές από τις περιοχές που αντιμετωπίζουν ήδη σήμερα σημαντικό έλλειμμα νερού, αναμένεται να έχουν ακόμα λιγότερες βροχοπτώσεις στο μέλλον, το οποίο θα επιφέρει μεγάλες απώλειες στη γεωργική παραγωγή. Γενικότερα, σε όλο τον πλανήτη οι παρατηρήσεις καταδεικνύουν ότι οι περίοδοι ξηρασίας έχουν αυξηθεί σε συχνότητα, ένταση και διάρκεια. Το ποσοστό της Γης το οποίο

υπόκειται σε παρατεταμένα φαινόμενα ξηρασίας υπολογίζεται ότι έχει υπερδιπλασιαστεί τις τελευταίες δεκαετίες. Αν η μέση παγκόσμια θερμοκρασία αυξηθεί κατά 3 °C, εκτιμάται ότι η συχνότητα των περιόδων ξηρασίας θα διπλασιαστεί στην Ευρώπη. Η λεκάνη της Μεσογείου είναι ανάμεσα στις περιοχές που πλήττονται ιδιαίτερα από εντεινόμενες ξηρασίες, ιδίως κατά τους θερινούς μήνες. Αυτό αναμένεται να επιφέρει ιδιαίτερα δυσχερείς επιπτώσεις όσον αφορά τον κίνδυνο δασικών πυρκαγιών και τα υδατικά αποθέματα. Προσομοιώσεις κλιματικών μοντέλων δείχνουν ότι οι καλοκαιρινοί μήνες με ακραία ξηρασία στη Μεσόγειο θα είναι η τυπική κατάσταση στο τέλος του αιώνα. Παράλληλα, υπό τις κατάλληλες συνθήκες στις θερμές περιόδους, θα εκδηλώνονται σφοδρές καταιγίδες. Σε αυτό συμβάλλουν οι ολοένα και συχνότεροι θαλάσσιοι καύσωνες, καθώς και το γεγονός ότι η θερμότερη ατμόσφαιρα μπορεί να συγκρατήσει περισσότερους υδρατμούς.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι τοπικές μελλοντικές μεταβολές στη βροχόπτωση είναι δύσκολο να εκτιμηθούν με μεγάλη ακρίβεια, αποτελώντας από τις μεγαλύτερες πηγές αβεβαιότητας των κλιματικών μοντέλων. Ωστόσο, το σύνολο των κλιματικών μοντέλων εκτιμούν μια σημαντική διαταραχή του υδρολογικού κύκλου παγκοσμίως, κάτι που επηρεάζει εκτός από την βροχόπτωση, και άλλες σημαντικές παραμέτρους και διεργασίες, όπως η εξατμισοδιαπνοή, η υγρασία του εδάφους και ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδάτων.



Εικόνα 4 Τα φαινόμενα ξηρασίας αναμένεται να γίνουν πιο έντονα και με μεγαλύτερη διάρκεια.

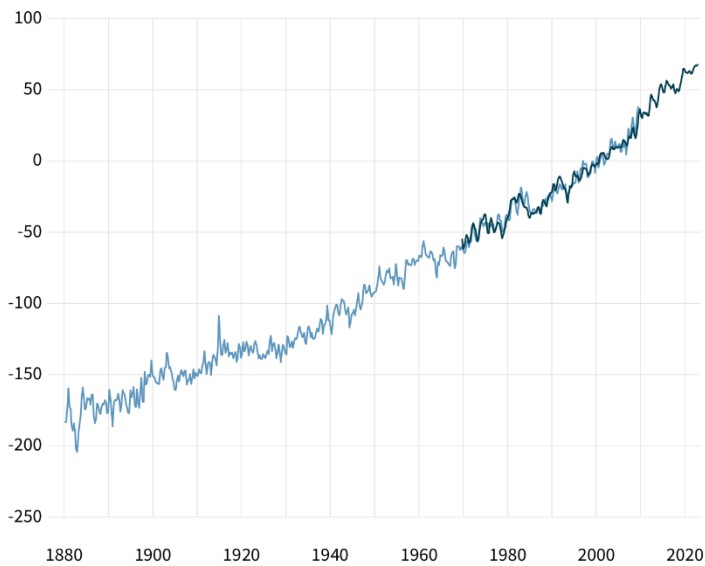
3. Άνοδος της στάθμης της θάλασσας

Εκτιμάται ότι οι ωκεανοί έχουν απορροφήσει έως και 90% της επιπλέον θερμότητας η οποία έχει προκύψει στο κλιματικό σύστημα, εξαιτίας της ανθρωπογενούς ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτή η υπερθέρμανση των ωκεανών αποφέρει πλήθος

σημαντικών συνεπειών, όπως για παράδειγμα την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, τη μεταβολή της ωκεάνιας κυκλοφορίας, τον περιορισμό της κατακόρυφης ανάμιξης του νερού των ωκεανών, τη μείωση της διαλυτότητας του άνθρακα στο νερό, καθώς και πλήθος άλλων δυσχερών επιπτώσεων για τα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, το μέσο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας ανήλθε παγκοσμίως κατά περίπου 17 cm. Ο ρυθμός ανύψωσης έχει επιπρόσθετα αυξηθεί σημαντικά τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, φτάνοντας περίπου τα 3.4 cm αύξησης ανά δεκαετία. Αυτή η αυξητική τάση αναμένεται να συνεχιστεί αδιάλειπτα κατά τον 21^ο αιώνα, καθώς αποτελεί απόρροια δύο βασικών μηχανισμών. Από τη μία πλευρά, επιτελείται θερμική διαστολή του νερού, δηλαδή, καθώς οι ωκεανοί γίνονται θερμότεροι ο όγκος τους αυξάνεται. Ωκεανοί με μεγαλύτερο όγκο συνεπάγονται άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας. Ταυτόχρονα, μεγάλες ποσότητες νερού στον πλανήτη αλλάζουν φυσική κατάσταση, περνώντας από την στερεή στην υγρή φάση. Συγκεκριμένα, από το λιώσιμο των ορεινών παγετώνων και των πάγων της Γροιλανδίας και της Αρκτικής, προστίθενται κάθε έτος εκατομμύρια επιπλέον τόνοι νερού στους ωκεανούς. Επιπλέον, άκρως ανησυχητικά είναι τα αποτελέσματα πρόσφατης έρευνας η οποία ανέδειξε το γεγονός ότι το νερό που προκύπτει από το λιώσιμο των πάγων, ρέει κατά μήκος ρωγμών στη βάση του πάγου της Ανταρκτικής, μειώνοντας την επιφανειακή τριβή, και επιταχύνοντας περαιτέρω τη ροή των πάγων προς τον ωκεανό.

Ο βαθμός κατά τον οποίο θα αυξηθεί το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας σχετίζεται άμεσα από τη μελλοντική πορεία των συγκεντρώσεων των θερμοκηπιακών αερίων, τον τρόπο με τον οποίο η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και των ωκεανών θα ανταποκριθούν στις παραπάνω μεταβολές, και με τον ρυθμό τήξης των πάγων της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής. Το 2013 η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή εκτίμησε ότι η αύξηση του επιπέδου της στάθμης της θάλασσας κατά το τέλος του 21^ο αιώνα αναμένεται να κυμανθεί μεταξύ 25 και 100 cm. Η παραπάνω αύξηση ενδεχομένως να είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση κατά την οποία οι πάγοι στα όρια της ακτογραμμής της Ανταρκτικής καταρρεύσουν. Καθώς οι συγκεκριμένοι πάγοι λειτουργούν ως ανάχωμα, στην περίπτωση κατάρρευσης τους έχει εκτιμηθεί μέσω προσομοιώσεων ότι η αύξηση της στάθμης της θάλασσας μπορεί να αγγίξει τα 150 cm. Ιδιαίτερα ανησυχητικές είναι επιπλέον ορισμένες πρόσφατες εργασίες που καταδεικνύουν ότι μεγάλο τμήμα της δυτικής Ανταρκτικής έχει εισέρθει σε φάση τήξης. Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας από το λιώσιμο των συγκεκριμένων πάγων θα μπορούσε να υπερβεί τα τρία μέτρα.



Εικόνα 5 Ετήσιες διαφορές της παγκόσμιας στάθμης της θάλασσας, συγκριτικά με τη μέση τιμή της περιόδου αναφοράς 1993 – 2008.

Αν και ενδεχομένως συχνά θεωρούμε ότι το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας βρίσκεται παγκοσμίως σε σταθερό ύψος, στην πραγματικότητα διαφοροποιείται σημαντικά ανά περιοχή, συχνά το ποσό διακύμανσης υπερβαίνει τα 30 cm. Για παράδειγμα, σε αρκετές περιοχές του πλανήτη παρουσιάζεται το φαινόμενο όπου οι παραλιακές περιοχές κατακλύζονται προοδευτικά από τη θάλασσα, καθώς το έδαφος εμφανίζει βαθμιαία καθίζηση ως επακόλουθο της αφαίρεσης υπόγειων υδάτων. Επιπλέον, μελλοντικές μεταβολές στην ωκεάνια κυκλοφορία εκτιμάται ότι θα οδηγήσουν σε σημαντικά διαφορετικές τοπικές αυξήσεις της στάθμης της θάλασσας. Επομένως, για την κατάρτιση σχεδίων προσαρμογής μιας περιοχής στην κλιματική αλλαγή απαιτούνται λεπτομερείς αναλύσεις που θα λαμβάνουν τοπικά χαρακτηριστικά, τόσο της ακτογραμμής όσο και των θαλασσιών ρευμάτων. Ο τρόπος σύνδεσης της παγκόσμιας με την τοπική αύξηση της στάθμης της θάλασσας αποτελεί ένα από τα πιο επίκαιρα ζητήματα προς διερεύνηση. Σε κάθε περίπτωση, ως απόρροια της ανόδου της θάλασσας, οι δυσχερείς επιπτώσεις αναμένεται να είναι μεγάλες για τον παράκτιο πληθυσμό, για μέρη τουριστικού ενδιαφέροντος, καθώς και όσον αφορά καλλιεργήσιμα εδάφη και ιχθυοκαλλιέργειες.

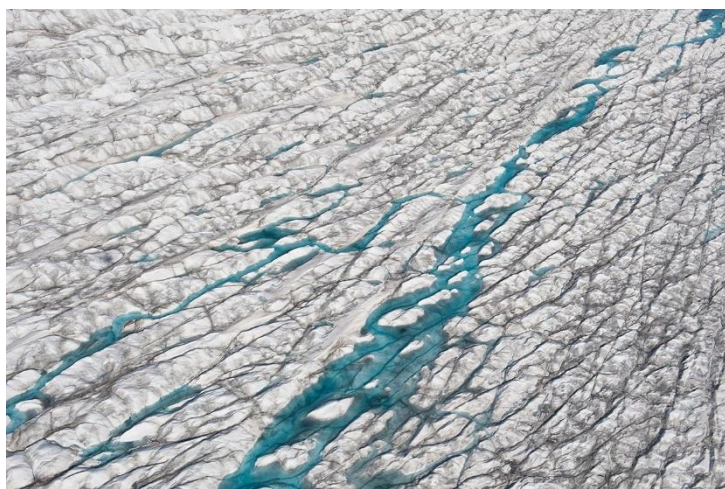
Εκτός από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τους ωκεανούς και με έναν επιπρόσθετο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, αυξάνεται η οξύτητα των ωκεανών, καθώς απορροφούν περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης συγκέντρωσης του. Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται οξίνιση των ωκεανών. Αν και η παραπάνω μεταβολή είναι σχετικά περιορισμένη έως σήμερα (μείωση του pH των ωκεανών κατά 0.1 μονάδες ή ισοδύναμα οι ωκεανοί έχουν γίνει κατά

30% πιο όξινοι), περαιτέρω αύξηση της οξύτητας μπορεί να αποβεί καταστροφική για τα ωκεάνια ενδιαιτήματα και τους οργανισμούς τους.

4. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις πολικές περιοχές

Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι ιδιαίτερα έντονες στις πολικές περιοχές του βορείου ημισφαιρίου. Ενώ η μέση άνοδος της θερμοκρασία σε παγκόσμιο επίπεδο είναι περίπου 1,1 °C, στην Αρκτική η άνοδος της θερμοκρασίας είναι έως και τέσσερις φορές μεγαλύτερη.

Οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην Αρκτική έχουν οδηγήσει σε σημαντική συρρίκνωση των Αρκτικών θαλάσσιων πάγων, τόσο όσον αφορά το πάχος τους, όσο και τη συνολική τους έκταση, η οποία μειώνεται με ρυθμό περίπου 10% ανά δεκαετία. Με την τήξη των θαλάσσιων πάγων, η επιφάνεια των πολικών περιοχών καλύπτεται πλέον σε μεγάλο βαθμό από το νερό του ωκεανού. Αυτό παρουσιάζει κατά πολύ μικρότερη ικανότητα ανάκλασης συγκριτικά με τον πάγο, με συνέπεια την έντονη πλέον απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και την περαιτέρω υπερθέρμανση της Αρκτικής. Επιπρόσθετα, η μείωση του πάχους του θαλάσσιου πάγου, τον καθιστά πιο ευάλωτο στη θραύση και κατά συνέπεια στην τήξη, καθώς μικρότερα κομμάτια πάγου λιώνουν με μεγαλύτερη ευκολία. Εκτός από τον θαλάσσιο πάγο της Αρκτικής, το στρώμα πάγου που καλύπτει τη χερσαία επιφάνεια της Γροιλανδίας τήκεται επίσης με ραγδαίους ρυθμούς, ως αποτέλεσμα των υψηλότερων θερμοκρασιών. Εκτιμάται αυτή η απώλεια σε πάγο είναι περίπου 270 δισεκατομμύρια τόνοι ανά έτος. Ο πάγος της Γροιλανδίας, αποτελεί ένα τεράστιο απόθεμα νερού, συγκεκριμένα περιέχει αρκετό νερό ώστε θα μπορούσε δυνητικά να προκαλέσει άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας κατά 7 μέτρα.



Εικόνα 6 Λιωμένος πάγος στο στρώμα πάγου της Γροιλανδίας.

Η τήξη των πάγων στον βόρειο Ατλαντικό εκτιμάται ότι ενδεχομένως επιφέρει ιδιαίτερα σοβαρές επιπτώσεις σε ότι αφορά την ωκεάνια κυκλοφορία. Συγκεκριμένα, η θερμοαλατική κυκλοφορία, είναι το παγκόσμιο σύστημα μεταφοράς υδάτινων μαζών λόγω διαφοράς στην πυκνότητα του νερού, η οποία αυξάνεται αν μειωθεί η θερμοκρασία ή αν αυξηθεί η αλατότητα. Στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη του Ατλαντικού, το νερά του επιφανειακού Ρεύματος του Κόλπου, μετακινούνται βορειότερα, ψύχονται από τον πολικό αέρα, και βυθίζονται ως επακόλουθος της μεγαλύτερης πυκνότητας. Επομένως, η αυξανόμενη θερμοκρασία των Αρκτικών περιοχών σε συνδυασμό με την μικρότερη αλατότητα, λόγω της ύπαρξης γλυκού νερού από την τήξη των πάγων, εκτιμάται ότι θα διαταράξει τη θερμοαλατική κυκλοφορία. Η διαταραχή της θαλάσσιας κυκλοφορίας συμπεριλαμβάνεται μάλιστα στα κρισιμότερα σημεία καμπής του κλιματικού συστήματος. Ως σημείο καμπής θεωρείται ένα όριο το οποίο εάν ξεπεραστεί θα οδηγήσει σε μεγάλη αποσταθεροποίηση του κλίματος της Γης και θα επιφέρει απότομες αλλαγές.

Όσον αφορά τις πολικές περιοχές του νοτίου ημισφαιρίου, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι πιο περιορισμένη σε ένταση, παρόλα αυτά η μείωση της επιφάνειας πάγου στην Ανταρκτική είναι σημαντική (150 δισεκατομμύρια τόνοι πάγου χάνονται κάθε έτος). Υπολογίζεται ότι οι θερμοκρασίες στην Ανταρκτική έχουν αυξηθεί κατά 0,5 °C τα τελευταία 50 έτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εντονότερη θέρμανση εντοπίζεται κυρίως στο δυτικό τμήμα της Ανταρκτικής (άνοδος κατά 0,9 °C), το οποίο αποτελεί και το πιο ευπαθές σημείο της ηπείρου. Αυτό συμβαίνει, καθώς το στρώμα πάγου βρίσκεται κάτω από το μέσο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, επομένως σε άμεση επαφή με το νερό του ωκεανού, κάτι που ευνοεί την τήξη. Το λιώσιμο του στρώματος πάγου της δυτικής Ανταρκτικής θα μπορούσε να προκαλέσει άνοδο της στάθμης της θάλασσας κατά 6 μέτρα.

Σε αντίθεση με τα τεράστια σε έκταση στρώματα πάγου της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής, οι παγετώνες αποτελούν τοπικές μάζες πάγου και χιονιού, οι οποίες δημιουργούνται στις ορεινές περιοχές του πλανήτη. Οι παγετώνες σχηματίζονται από τη συσσώρευση πάγου και χιονιού για εκατοντάδες έτη, και ολισθαίνουν εξαιτίας του βάρους τους. Κάτω από την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, η ταχύτητα υποχώρησης των παγετώνων έχει αυξηθεί ραγδαία, ενώ ιδιαίτερα σημαντική είναι και η μείωση της έκτασης τους. Το λιώσιμο των παγετώνων αυξάνει σε σημαντικό βαθμό τα αποθέματα σε υδατικούς πόρους των τοπικών κοινωνιών, όμως σε περίπτωση υπερχειλίσης τους ή υποχώρησης των φραγμάτων που τους περιορίζουν, ο πλημμυρικός κίνδυνος είναι τεράστιος. Επιστήμονες έχουν υπολογίσει ότι περίπου 40% της μάζας των παγετώνων παγκοσμίως θα χαθεί έως το 2100, σύμφωνα μάλιστα με το ευνοϊκό σενάριο συγκράτησης της ανόδου της θερμοκρασίας του πλανήτη στους 1,5 °C.

5. Βιβλιογραφία

Henderson-Sellers, Ann, and Kendal McGuffie, eds. *The future of the world's climate*. Elsevier, 2011.

Ruddiman, William F. *Earth's Climate: past and future*. Macmillan, 2014.