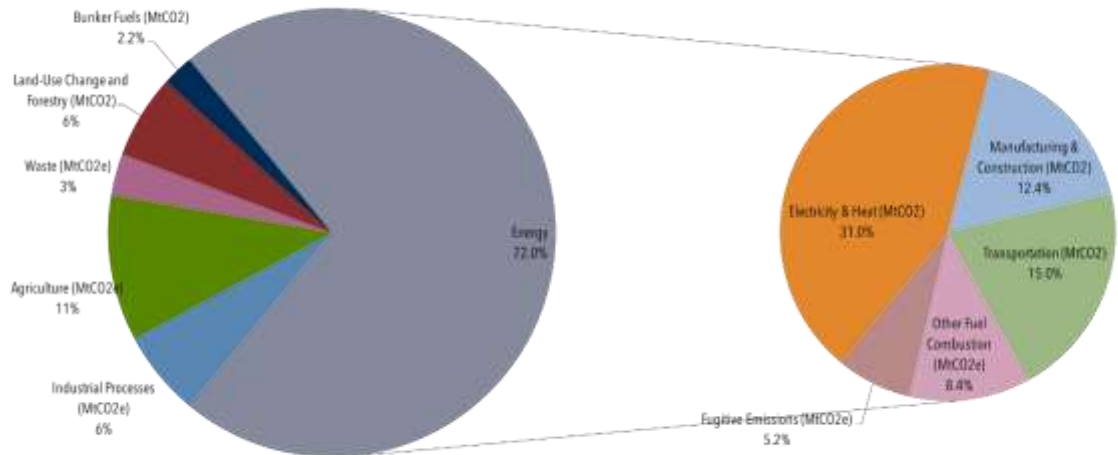


2. Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υδάτινα συστήματα

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει πιο συγκεκριμένη η παρουσίαση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα υδάτινα συστήματα. Η μείωση των βροχοπτώσεων μπορεί να μειώσει την καθαρή επαναφόρτιση και να επηρεάσει τους πόρους γλυκού νερού με καταστροφικές συνέπειες για βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες (Benson, 2008).

Οι επιρροές από τον άνθρωπο αναμένεται να ακολουθήσουν μια σταθερή τάση ανάπτυξης στο μέλλον. Με άλλα λόγια, οι κλιματικές τροποποιήσεις που προκαλούνται από ανθρωπογενείς ακτινοβολίες θεωρούνται πιο μόνιμες από αυτές που προκαλούνται από τους ενδογενείς παράγοντες. Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), από τότε που ξεκίνησε η Βιομηχανική Επανάσταση στα μέσα του 16ου αιώνα, τα επίπεδα CO₂ στην ατμόσφαιρα αυξήθηκαν κατά 35 % και η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CH₄ αυξήθηκε κατά 1060 μέρη ανά δισεκατομμύριο (151 %) και θα συνεχίσει να αυξάνεται. Η παρούσα συγκέντρωση CH₄ δεν έχει ξεπεραστεί τα τελευταία 420.000 χρόνια. Η ενδιάμεση αύξηση στο επίπεδο CH₄ επιβραδύνθηκε και έγινε σημαντικά μεταβλητή στη δεκαετία του 1990, σε σύγκριση με τη δεκαετία του 1980. Έχει προταθεί ότι ένας σημαντικός λόγος των σημερινών εκπομπών CH₄ είναι ανθρωπογενείς και όχι φυσικοί. Οι ανθρωπογενείς πηγές παραγωγής μεθανίου περιλαμβάνουν την καύση ορυκτών καυσίμων, την εκτροφή βοοειδών, τους ορυζώνες και τους χώρους υγειονομικής ταφής. Πρόσφατες μελέτες έχουν καταγγείλει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ως αιτία αύξησης της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CH₄ (Benson, 2008).



Εικόνα 1: Παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, ανά τομέα (World Resources Institute, 2017)

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι κύριες πηγές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου είναι η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα (31%), η γεωργία (11%), οι μεταφορές (15%), η δασοκομία (6%) και η μεταποίηση (12%). Η παραγωγή ενέργειας όλων των τύπων αντιπροσωπεύει το 72 % όλων των εκπομπών όπως βλέπουμε στην εικόνα 1.

Επιπλέον, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου όπως CO₂, N₂O, PFC και SF₆ θα μπορούσαν να συνεχίσουν να έχουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην ατμοσφαιρική σύνθεση, την ακτινοβολία και τα στοιχεία του κλίματος. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι η ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή μπορεί να επιμείνει για πολύ καιρό ακόμα. Οι αυξημένες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου εμπλέκονται ως η κύρια αιτία της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Benson, 2008).

Πρόσφατα ευρήματα του IPCC δείχνουν ότι η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ το 2005 ήταν 375 ppm σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα των 280 ppm. Αυτό συνέβαλε στην αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης κατά 0,6 °C (ένας βαθμός F). Οι παγκόσμιες μετρήσεις της στάθμης της θάλασσας έχουν αποδείξει άνοδο κατά περίπου 0,17 μ. (0,56 ft) κατά τον 20ό αιώνα. Οι παγετώνες παγκοσμίως, με την πάροδο του χρόνου, υποχώρησαν σταθερά και η έκταση του πάγου της Αρκτικής θάλασσας συρρικνώθηκε σταθερά κατά 2,7 % ανά δεκαετία από το 1978 (Benson, 2008).

Οι παγετώνες αποτελούν ένα ενδιαφέρον μέρος του φυσικού περιβάλλοντος της Γης και έχουν αναγνωριστεί ως ένας από τους σημαντικούς και ευαίσθητους δείκτες της κλιματικής αλλαγής. Το μέγεθος, η διάρκεια ζωής και οι χρονολογικές πληροφορίες συσσώρευσης και κατάλυσης ή ανάπτυξης και κατάρρευσης (υποχώρηση παγετώνων) αποδίδονται κυρίως στην αλλαγή των κλιματικών στοιχείων όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η ταχύτητα του ανέμου, η υγρασία και η ηλιακή ακτινοβολία (Benson, 2008).

Οι αυξημένες θερμοκρασίες της επιφάνειας της Γης κάνουν τους παγετώνες να λιώσουν γρηγορότερα από ό, τι τα χιόνια του χειμώνα μπορούν να τους αναπληρώσουν. Το λιώσιμο των θαλάσσιων πάγων μπορεί τελικά να οδηγήσει σε παγκόσμιες αλλαγές στους υδάτινους πόρους και την κυκλοφορία και η τήξη των πάγων θα μπορούσε να επιταχύνει τη θέρμανση της Αρκτικής γιατί το νερό απορροφά πολύ περισσότερη θερμότητα από τον πάγο. Η ακραία και συνεχείς μείωση του πάχους και της έκτασης των πάγων της Αρκτικής θάλασσας θα έχουν τεράστιες συνέπειες για τον πληθυσμό της Αρκτικής, τα οικοσυστήματά τους και την εξέλιξη των ακτών. Καθώς οι παγετώνες συρρικνώνονται, ένας μεγαλύτερος μέρος του νερού της Γης θα εισέλθει στην υγρή φάση και γίνεται διαθέσιμο στους ωκεανούς και την ατμόσφαιρα. Αυτό θα οδηγήσει τελικά σε αυξημένο όγκο νερού στους ωκεανούς, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική άνοδο της στάθμης της θάλασσας (Benson, 2008).

2.1 Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας

Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, η στάθμη της θάλασσας αυξήθηκε κατά 10-20 εκ. Αυτό προκλήθηκε κυρίως ως αποτέλεσμα της τήξης των πάγων των παγετώνων και της θερμικής διαστολής του νερού των ωκεανών. Ειδικότερα, έχει προβλεφθεί ότι θα υπάρξει άνοδος της στάθμης της θάλασσας καθώς οι ωκεανοί θερμαίνονται μαζί με την υπόλοιπη Γη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό διαστέλλεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του. Τα μοντέλα κλιματικής αλλαγής έχουν προβλέψει ότι η παγκόσμια μέση στάθμη της θάλασσας αυξάνεται τόσο πολύ ως 33 ίντσες (85 εκ.) αναμένεται κατά τον 21ο αιώνα.

Επιπροσθέτως, η παγκόσμια άνοδος της στάθμης της θάλασσας αναμένεται να έχει εκτεταμένες και δραματικές επιπτώσεις σε ευάλωτες περιοχές της Γης, όπου ήδη υπάρχουν προβλήματα καθίζησης και διάβρωσης. Ο αυξανόμενος όγκος θαλασσινού νερού έχει ήδη μετατρέψει παράκτιους υγρότοπους και μαγκρόβια βλάστηση στη νότια Φλόριντα, και περίπου ένα εκατομμύριο στρέμματα υγροτόπων της Λουιζιάνα σε ανοιχτά νερά από τα μέσα του 20ού αιώνα (Benson, 2008).

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει αύξηση της διείσδυσης του αλμυρού νερού στα υπόγεια νερά. Τα νησιά που βρίσκονται χαμηλότερα από την στάθμη της θάλασσας και οι παράκτιοι υδροφόροι ορίζοντες που υποστηρίζουν την ανθρώπινη χρήση (όπως αυτά στο Λονγκ Άιλαντ, τη Νέα Υόρκη και την κεντρική Καλιφόρνια) θα μπορούσαν να διατρέχουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο. Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας συνέβαλε επίσης στην αύξηση της θνησιμότητας των δέντρων στις παράκτιες περιοχές της Λουιζιάνα και της νότιας Φλόριντα, όπου το αλμυρό νερό έχει ήδη εισχωρήσει στα υπόγεια ύδατα από τα οποία εξαρτώνται τα δέντρα (Benson, 2008).

Άλλες επιπτώσεις που σχετίζονται με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας περιλαμβάνουν αλλαγές στην κατανομή της αλατότητας στις εκβολές των ποταμών, τροποποιημένη παράκτια κυκλοφορία υδάτων, καταστροφή της υποδομής μεταφορών σε χαμηλές περιοχές και αυξημένη πίεση στα παράκτια συστήματα λιμνών. Οι ακτές του Ατλαντικού και των ακτών του Κόλπου θα είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στη μακροπρόθεσμη άνοδο της στάθμης της θάλασσας, καθώς και σε οποιαδήποτε αύξηση της συχνότητας των καταιγίδων ή των τυφώνων. Τα περισσότερα γεγονότα διάβρωσης σε αυτές τις ακτές είναι τα αποτελέσματα καταιγίδες, και η κλίση αυτών των περιοχών είναι τόσο ευάλωτη και ήπια που μια μικρή άνοδος της στάθμης της θάλασσας μπορεί να προκαλέσει μια μεγάλη εσωτερική μετατόπιση της ακτογραμμής. Αυτό αυξάνει τις απειλές για την ανάπτυξη των ακτών, τις μεταφορές, τα υπόγεια γλυκά νερά, τις υποδομές και την αλιεία. Αυτές οι επιπτώσεις μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα των υδάτινων πόρων. Επιπλέον, οι δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής για την ποιότητα του νερού περιλαμβάνουν τη μείωση των ροών των ρευμάτων, την αύξηση

των καταιγίδων και τις υψηλότερες θερμοκρασίες του νερού. Η αύξηση του αριθμού των ημερών έντονης βροχόπτωσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση του ρυπογόνου φορτίου που προέρχεται από αγροτικές περιοχές-επιχειρήσεις ή ημιαστικές-αστικές περιοχές που ξεπλένεται σε ποτάμια, εκβολές ποταμών και λίμνες και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας θα συμβάλει στην εισβολή αλμυρού νερού σε ποτάμια, εκβολές και παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες (Benson, 2008).

2.1.1 Ζητήματα παροχής γλυκού νερού

Η παγκόσμια κλιματική αλλαγή θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα γλυκού νερού. Αυτό θα επηρεάσει τη διαθεσιμότητα, καθώς και την ποιότητα, τη διανομή και τη μορφή. Σε ορισμένες περιοχές, όπου αυξάνεται η ροή και η βροχόπτωση, οι πλημμύρες θα μπορούσαν να απειλήσουν τη δομή και λειτουργίες των υδάτινων συστημάτων, που οδηγούν σε αυξημένη ρύπανση των οικοσυστημάτων γλυκού νερού, ειδικά σε περιοχές όπου οι δραστηριότητες που μεσολαβούν από τον άνθρωπο μπορεί να έχουν αλλάξει το τοπίο. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους πόρους γλυκού νερού της Γης έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τις διεθνείς σχέσεις, ειδικά στα ηπειρωτικά ή χωρικά σύνορα, όπου οι κοινόχρηστοι υγρότοποι μπορούν να δημιουργήσουν τοπικές και διεθνείς πολιτικές και γεωγραφικές διαμάχες (Benson, 2008).

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδάτινους πόρους θα έχουν ευρύ φάσμα επιπτώσεων στα παράκτια οικοσυστήματα. Η εύρυθμη λειτουργία των οικοσυστημάτων θα επηρεαστεί από τις αλλαγές στην ποιότητα και την ποσότητα της απορροής γλυκών υδάτων στους παράκτιους υγροτόπους, τις υψηλότερες θερμοκρασίες του νερού, τα ακραία ποσοστά απορροής ή τον μεταβαλλόμενο χρόνο και την ικανότητα των λεκανών απορρόφησης ρύπων και αποβλήτων (Benson, 2008).

Οι παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές θα μπορούσαν να δημιουργήσουν σοβαρή ζήτηση στην παροχή νερού. Στις περισσότερες περιοχές του κόσμου όπου παρατηρούνται και προβλέπονται μειώσεις στο κατ' άτομο μέσο όρο της ετήσιας διαθεσιμότητας γλυκού νερού, σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού, η πιθανότητα αυξημένης ζήτησης νερού θα οδηγήσει πιθανώς σε αυξημένη υπαναχώρηση νερού, η οποία θα μειώσει τον χρόνο επαναφόρτισης των υδάτινων

αποθεμάτων. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να επηρεάσουν ένα ευρύ φάσμα εξαρτημάτων του συστήματος νερού, συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών των ταμειυτήρων, της ποιότητας του νερού, της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας και της πλοήγησης. Σε ορισμένες περιοχές, όπου μεγάλος όγκος νερού διοχετεύεται για μη καταναλωτικούς σκοπούς, όπως η γεωργική ζήτηση, ιδιαίτερα για την άρδευση, η παροχή νερού θα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις κλιματικές συνθήκες όπου η ζήτηση για νερό άρδευσης τείνει να αυξάνεται καθώς οι κλιματολογικές συνθήκες γίνονται όλο και πιο ξηρές. Μια πιθανή αλλαγή στο κλίμα σε επίπεδο πεδίου μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή του χρόνου και της ανάγκης άρδευσης (Benson, 2008).

Οι χρήσεις νερού όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια, η ναυσιπλοΐα, η αναψυχή και η συντήρηση του οικοσυστήματος είναι επίσης ευαίσθητες στις αλλαγές στην ποσότητα, την ποιότητα και τον χρόνο της απορροής που προκύπτουν από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνουν τη μείωση των ροών αραίωσης, αυξημένες καταιγίδες και υψηλότερες θερμοκρασίες νερού. Οι χαμηλές ροές σε πολλά ποτάμια θα οδηγήσουν σε αύξηση των επιπέδων αλατότητας στους μεταγενέστερους χρήστες νερού (Benson, 2008).

Από την άλλη πλευρά, οι υψηλότερες ροές θα μπορούσαν να βοηθήσουν στη μείωση ορισμένων ανησυχιών για την ποιότητα του νερού. Η πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας του νερού θα μπορούσε να απειλήσει την υδρόβια ζωή άμεσα, καθώς θα μπορούσε να εξαφανίσει τα ενδιαίτηματα ψυχρού νερού και έμμεσα, καθώς τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου μειώνονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η αύξηση των ημερών με πιο έντονες βροχοπτώσεις θα μπορούσε να αυξήσει τους αγροτικούς και αστικούς ρύπους που έχουν απορροφηθεί σε ρέματα και λίμνες, μειώνοντας περαιτέρω τα επίπεδα οξυγόνου. Οι έντονες βροχοπτώσεις είναι κυρίως υπεύθυνες για τη διάβρωση του εδάφους, την έκπλυση γεωργικών χημικών και την απορροή αστικών και κτηνοτροφικών απόβλητα και θρεπτικά συστατικά σε υδάτινα σώματα (Benson, 2008).

2.1.2 Αλλαγή οικοσυστημάτων και καιρού

Μια άλλη πιθανή επίδραση που σχετίζεται με την κλιματική αλλαγή είναι ο δυνητικός κίνδυνος που εγκυμονεί για τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Καθώς η στάθμη της θάλασσας ανεβαίνει, σε συνδυασμό με την αύξηση της θέρμανσης των ωκεάνιων υδάτων, η θαλάσσια βιοποικιλότητα θα απειληθεί περαιτέρω από τις μυριάδες επιπτώσεις σε όλα τα θαλάσσια οικοσυστήματα, από τους τροπικούς κοραλλιογενείς υφάλους (ειδικά στις Μαλδίβες) έως τα πολικά οικοσυστήματα. Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι υφίστανται ήδη αυξημένη πίεση από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, έχουν βιώσει άνευ προηγουμένου αυξήσεις στην έκταση της λεύκανσης των κοραλλιών, των αναδυόμενων ασθενειών των κοραλλιών και των εκτεταμένο αφανισμό. Οι ζημιές στους κοραλλιογενείς υφάλους οδηγούν σε εξάντληση του σημαντικού βιότοπου για την τροφή των ψαριών (Benson, 2008).

Οι αλλαγές στη θερμοκρασία των ωκεανών, τα ρεύματα και την καθαρή παραγωγικότητα θα επηρεάσουν την κατανομή, την αφθονία, τις συγκεντρώσεις και την παραγωγικότητα των θαλάσσιων πληθυσμών, με απρόβλεπτες συνέπειες για τη θάλασσα τα οικοσυστήματα και την αλιεία. Καθώς η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης αυξάνει, τα είδη μπορεί είτε να μεταναστεύσουν σε ένα ψυχρότερο, πιο κατάλληλο βιότοπο, είτε να πεθάνουν. Είδη που είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνουν πολικά ζώα, όπως φώκιες, πιγκουίνους και πολικές αρκούδες, κοραλλιογενείς υφάλους και πολλά άλλα απειλούμενα είδη ζώων και φυτών (Benson, 2008).

Οι αλλαγές στο κλίμα που ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1980 οδήγησαν σε μια ενισχυμένη εκροή υδάτων χαμηλής αλατότητας από την Αρκτική και σε γενικό φρεσκάρισμα των υδάτινων μαζών από τη Θάλασσα του Λαμπραντόρ έως τον κόλπο του Μεσο – Ατλαντικού (Greene *et al.*, 2007).

Αυτή η αναζωογόνηση τροποποίησε το μοτίβο κυκλοφορίας και διαστρωμάτωσης στον ωκεανό και έχει συνδεθεί με αλλαγές στις αφθονίες και τους εποχικούς κύκλους φυτοπλαγκτού, ζωοπλαγκτού και πληθυσμών ψαριών. Τις τελευταίες δεκαετίες, η Αρκτική γνώρισε μια περίοδο ιστορικά άνευ προηγουμένου αλλαγών. Το 1987, η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας άρχισε να

μειώνεται στην κεντρική Αρκτική. Δύο χρόνια αργότερα, αυτή η πίεση της στάθμης της θάλασσας έπεσε κατακόρυφα και εμφανίστηκε ένα έντονα κυκλωνικό ατμοσφαιρικό καθεστώς. Αυτό το κυκλωνικό καθεστώς αυξάνει την παροχή θερμότερου, υψηλότερης αλατότητας νερού του Ατλαντικού στον Αρκτικό Ωκεανό, κυρίως μέσω της θάλασσας του Μπάρεντς (Greene *et al.*, 2007).

Η κρυόσφαιρα έχει επίσης ανταποκριθεί στις αλλαγές του κλίματος. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, η ηπειρωτική τήξη του μόνιμου πάγου, του χιονιού και του πάγου έχει αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που, σε συνδυασμό με την αυξημένη βροχόπτωση, έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερη εκροή ποταμών στον Αρκτικό Ωκεανό. Ο πάγος της Αρκτικής θάλασσας έχει μειωθεί τόσο σε έκταση όσο και σε πάχος, με εκτεταμένες καλοκαιρινές συνθήκες χωρίς πάγο που παρατηρούνται στο βορρά του Καναδά και της Ρωσίας από το 1978. Οι Lindsay και Zhang (2005) είχαν υποθέσει ότι το ατμοσφαιρικό καθεστώς άλλαξε το 1989 και οι επιδράσεις του στα πρότυπα κυκλοφορίας του Αρκτικού Ωκεανού ώθησαν την κρυόσφαιρα σε μια νέα, εσωτερικά διαιωσιζόμενη κατάσταση επιταχυνόμενης τήξης πάγου στη θάλασσα. Ένας μηχανισμός ανατροφοδότησης πάγου-άλμπεδο, ο πάγος είναι πιο αντανακλαστικός (δηλαδή έχει υψηλότερο άλμπεδο) από τις επιφάνειες της γης ή του νερού, μπορεί να διατήρησε αυτό το επιταχυνόμενο τήγμα ακόμη και μετά τη μετατόπιση της ατμόσφαιρας από την έντονα κυκλωνική της κατάσταση στα μέσα της δεκαετίας του 1990. Αυτή η αναζωογονητική ενίσχυση της διαστρωμάτωσης, είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή φυτοπλαγκτού και αφθονία κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, μια περίοδος κατά την οποία η πρωτογενής παραγωγή αλλιώς αναμένεται να μειωθεί καθώς η θερμική διαστρωμάτωση διασπάται και τα φύκια αναμειγνύονται βαθύτερα στη στήλη του νερού και γίνονται όλο και πιο περιορισμένα (Greene *et al.*, 2007).

Η κλιματική αλλαγή έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τον κύκλο του νερού. Σε πολλές περιοχές του κόσμου, η παγκόσμια κλιματική αλλαγή θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στις βροχοπτώσεις και την εξάτμιση. Πιο έντονες βροχοπτώσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πλημμύρες σε πολλές περιοχές καθώς οι αυξημένες θερμοκρασίες επιταχύνουν τον υδρολογικό κύκλο. Οι συχνότητες πλημμύρας σε

ορισμένες περιοχές είναι πιθανό να αλλάξουν. Στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη και τις λεκάνες με τήξη χιονιού, οι πλημμύρες ενδέχεται να γίνουν πιο συχνές, αν και η αύξηση των πλημμυρών για οποιοδήποτε σενάριο κλίματος είναι αβέβαιη και οι επιπτώσεις θα ποικίλλουν μεταξύ των λεκανών (Benson, 2008).

Τον περασμένο αιώνα, εκτιμάται ότι έχει σημειωθεί αύξηση 5-10 % των βροχοπτώσεων. Οι κλιματικές αλλαγές στην υδρολογία θα επηρεάσουν το μέγεθος, τη συχνότητα και το κόστος ακραίων γεγονότων, τα οποία έχουν τον μεγαλύτερο οικονομικό και κοινωνικό αντίκτυπο στους ανθρώπους. Η πλημμύρα, η πιο δαπανηρή και καταστροφική φυσική καταστροφή, γίνεται ένα συνηθισμένο και ακραίο γεγονός ως αποτέλεσμα των κλιματικών παραλλαγών. Τα έντονα καιρικά φαινόμενα γίνονται επίσης συχνότερα και ακραία (Benson, 2008).

Οι ερευνητές για την κλιματική αλλαγή έχουν δείξει ότι ο αριθμός και η δύναμη των ανθρωπογενών κλιματικών ακραίων γεγονότων όπως οι καταιγίδες, οι τυφώνες, οι πλημμύρες και οι ανεμοστρόβιλοι έχουν αυξηθεί τα τελευταία 10-20 χρόνια. Όλα αυτά τα φαινόμενα είναι ανιχνεύσιμα σε διακυμάνσεις της ακτινοβολίας που προκαλούνται από ανθρωπογενή GHG (Greenhouse Gas - Αέρια του θερμοκηπίου) στην ατμόσφαιρα. Οι αυξήσεις της βροχόπτωσης και της απορροής είναι πιθανό να εντείνουν τις καταπονήσεις σε ρέματα, λίμνες, όρμους, εκβολές και ποτάμια σε ορισμένες περιοχές του κόσμου, ενισχύοντας τη μεταφορά θρεπτικών ουσιών και ρύπων που φορτώνονται στα παράκτια οικοσυστήματα. Τα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη είναι πιο πιθανό να λάβουν αυξημένη βροχόπτωση και απορροή, ενώ τα χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη είναι πιο πιθανό να παρουσιάσουν μειωμένη απορροή (Benson, 2008).

Έχουν παρατηρηθεί αλλαγές στη θερμοκρασία της επιφάνειας, τις βροχοπτώσεις, την εξάτμιση και τα ακραία γεγονότα από τις αρχές του 20ού αιώνα. Η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ έχει αυξηθεί από περίπου 280 μέρη ανά εκατομμύριο κατ' όγκο (ppmv) σε περίπου 369 ppmv και η παγκόσμια θερμοκρασία της Γης έχει αυξηθεί κατά περίπου 0,6 °C. Η τρέχουσα συγκέντρωση CO₂ δεν έχει ξεπεραστεί τα τελευταία 420.000 χρόνια και πιθανώς όχι κατά τα τελευταία 20 εκατομμύρια χρόνια. Ο τρέχων ρυθμός αύξησης του επιπέδου CO₂ στην ατμόσφαιρα

είναι άνευ προηγουμένου τουλάχιστον κατά τα τελευταία 20.000 χρόνια. Περίπου το 75% των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 20 χρόνια αποδίδεται στην καύση ορυκτών καυσίμων. Τα υπόλοιπα οφείλονται κυρίως στην αλλαγή της χρήσης γης, ιδίως στην αποψίλωση των δασών (Benson, 2008).

Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία επιφάνειας αναμένεται να αυξηθεί κατά 1,4 έως 5,8 °C 1990 – 2100. Η παγκόσμια μέση στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί κατά 4 - 8 ίντσες (10 - 20 εκ.). Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία της επιφάνειας αναμένεται να αυξηθεί κατά 1,4 – 3,0 βαθμούς °C 1990 – 2100 για σενάρια χαμηλών εκπομπών και 2,5 – 5,8 βαθμούς °C για σενάρια υψηλότερων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Κατά την ίδια περίοδο, σχετική αύξηση της μέσης παγκόσμιας στάθμης της θάλασσας προβλέπεται μεταξύ 1,3 - 13,6 τετραγωνικών ιντσών (9 - 88 τετραγωνικά εκατοστά) (Benson, 2008).

2.1.3 Οξίνιση Ωκεανών

Το ανθρακικό σύστημα (pCO₂, pH, αλκαλικότητα και κατάσταση κορεσμού ανθρακικού ασβεστίου) των παγκόσμιων ωκεανών αλλάζει γρήγορα λόγω εισροής ανθρωπογενούς CO₂. Η οξίνιση των ωκεανών μπορεί να οριστεί ως η αλλαγή στη χημεία των ωκεανών που οφείλεται στην ωκεάνια πρόσληψη χημικών εισροών από την ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένων των ενώσεων άνθρακα, αζώτου και θείου. Σήμερα, η συντριπτική αιτία της οξίνισης των ωκεανών είναι το ανθρωπογενές ατμοσφαιρικό CO₂, αν και σε ορισμένες παράκτιες περιοχές, το άζωτο και το θείο είναι επίσης σημαντικά. Τα τελευταία 200 χρόνια, η ταχεία αύξηση του ανθρωπογενούς ατμοσφαιρικού CO₂, που οδηγεί άμεσα σε μείωση του pH των ωκεανών μέσω ανταλλαγής αερίου - θάλασσας, προκαλείται και συνεχίζει να προκαλείται από την καύση ορυκτών καυσίμων, την αποψίλωση των δασών, την εκβιομηχάνιση, την παραγωγή τσιμέντου και άλλες αλλαγές στη χρήση γης. Ο τρέχων ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει η οξίνιση των ωκεανών θα έχει πιθανότατα βαθείς βιολογικές συνέπειες για τα οικοσυστήματα των ωκεανών μέσα στις επόμενες δεκαετίες και αιώνες (Guinotte *et al.*, 2008).

Επί του παρόντος, η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ είναι περίπου 383 μέρη ανά εκατομμύριο κατ' όγκο (ppmv), επίπεδο που δεν έχει παρατηρηθεί σε

τουλάχιστον 650.000 χρόνια, και προβλέπεται να αυξηθεί κατά 0,5% ετησίως σε όλο τον 21ο αιώνα. Ο ρυθμός τρέχουσας και προβλεπόμενης αύξησης του ατμοσφαιρικού CO₂ είναι περίπου 100 φορές ταχύτερος από ό,τι έχει συμβεί σε τουλάχιστον 650.000 χρόνια. Τις τελευταίες δεκαετίες, μόνο το μισό ανθρωπογενές CO₂ έχει παραμείνει στην ατμόσφαιρα, το άλλο μισό έχει καταληφθεί από τη χερσαία βιόσφαιρα (περ. 20%) και τους ωκεανούς (περ. 30%). Από τη Βιομηχανική Επανάσταση, χρονικό διάστημα μικρότερο των 250 ετών, το pH της επιφάνειας των ωκεανών έχει μειωθεί κατά 0,1 μονάδα pH (αντιπροσωπεύοντας αύξηση κατά περίπου 30% στη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου σε σχέση με την προ-βιομηχανική τιμή) και αναμένεται να μειωθεί άλλες 0,3 - 0,4 μονάδες pH έως το τέλος αυτού του αιώνα. [Σημείωση: Η κλίμακα του pH είναι λογαριθμική, και ως αποτέλεσμα, κάθε μονάδα μείωσης του pH ισούται με 10 φορές αύξηση της οξύτητας.] Μια αλλαγή pH του μεγέθους που προβλεπόταν μέχρι το τέλος αυτού του αιώνα πιθανότατα δεν έχει συμβεί για περισσότερα από 20 εκατομμύρια χρόνια της ιστορίας της Γης. Ο ρυθμός αυτής της αλλαγής προκαλεί σοβαρή ανησυχία, καθώς πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί, ιδιαίτερα αυτοί που ασβεστοποιούνται, μπορεί να μην είναι σε θέση να προσαρμοστούν αρκετά γρήγορα για να επιβιώσουν από αυτές τις αλλαγές (Guinotte *et al.*, 2008).

Η μείωση του αριθμού των διαθέσιμων ανθρακικών ιόντων θα καταστήσει πιο δύσκολη και/ή θα απαιτήσει από τους θαλάσσιους ασβεστοποιητικούς οργανισμούς να χρησιμοποιήσουν περισσότερη ενέργεια για να σχηματίσουν βιογενές ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃). Πολλοί θαλάσσιοι οργανισμοί σχηματίζουν βιογενές ανθρακικό ασβέστιο, συμπεριλαμβανομένων: φύκια κοραλόζης, μακροφύκος του γένους *Halimeda*, τρηματοφόρα του γένους *Foraminifera*, κοκκολιθοφόρα, κοράλλια τροπικών υφάλων, κοράλλια κρύου νερού, βρυόζωα, μαλάκια και εχινόδερμα. Η πλειοψηφία των θαλάσσιων ασβεστοποιητών που έχουν δοκιμαστεί μέχρι σήμερα είναι ευαίσθητες στις αλλαγές στην κατάσταση κορεσμού ανθρακικών και έχουν δείξει πτώση των ποσοστών ασβεστοποίησης σε εργαστηριακές και μεσοκοσμικές μελέτες. Οι παραπάνω οργανισμοί επηρεάζονται και θα συνεχίσουν να επηρεάζονται από την οξίνιση των ωκεανών, αλλά λιγότερο γνωστές είναι οι επιπτώσεις σε οργανισμούς υψηλότερου τροφικού επιπέδου που βασίζονται σε αυτούς τους

ασβεστοποιητές για καταφύγιο, τροφή και άλλες βασικές λειτουργίες (Guinotte *et al.*, 2008).

Η μείωση του pH δεν είναι η μόνη επίδραση στο ανόργανο σύστημα άνθρακα στο θαλασσινό νερό που προκύπτει από την πρόσληψη ανθρωπογενούς CO₂ από τον ωκεανό. Ο ασβεστίτης και ο αραγωνίτης είναι τα κυριότερα βιογενώς σχηματισμένα ανθρακικά ορυκτά που παράγονται από θαλάσσιους ασβεστοποιητικούς οργανισμούς και η σταθερότητα και των δύο ορυκτών επηρεάζεται από την ποσότητα CO₂ στο θαλασσινό νερό, η οποία προσδιορίζεται εν μέρει από τη θερμοκρασία. Τα ψυχρότερα νερά διατηρούν φυσικά περισσότερο CO₂ και είναι πιο όξινα από τα θερμότερα νερά (Guinotte *et al.*, 2008).

Είναι σαφές ότι οι αλλαγές που προκαλούνται από τον άνθρωπο στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO₂ αλλάζουν θεμελιωδώς τη χημεία των ωκεανών από την τα πιο ρηχά νερά στα πιο σκοτεινά βάθη της υδάτινης στήλης. Η χημεία των ωκεανών πλησιάζει σε συνθήκες που δεν έχουν παρατηρηθεί εδώ και πολλά εκατομμύρια χρόνια και ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι άνευ προηγουμένου (Caldeira *et al.*, 2003). Οι Caldeira και Wickett (2003) αναφέρουν ότι «οι αμείωτες εκπομπές CO₂ στους επόμενους αιώνες μπορεί να προκαλέσουν μεταβολές στο pH του ωκεανού που είναι μεγαλύτερες από κάθε άλλη εμπειρία τα τελευταία 300 εκατομμύρια χρόνια, με πιθανή εξαίρεση εκείνες που προκύπτουν από σπάνια, καταστροφικά γεγονότα στην ιστορία της Γης (Caldeira *et al.*, 1993, Beerling *et al.*, 2002). Πρόσφατα στοιχεία υποδηλώνουν ότι η οξίνιση των ωκεανών ήταν ο κύριος μοχλός των προηγούμενων μαζικών εξαφανίσεων και των κενών υφάλων, που είναι χρονικές περίοδοι της τάξης των εκατομμυρίων ετών που χρειάστηκαν οι ύφαλοι για να ανακάμψουν από τον μαζικό αφανισμό. Οι Zachos *et al.* (2005) υπολόγισαν ότι εάν καεί ολόκληρη η δεξαμενή ορυκτών καυσίμων (περίπου 4500 GtC), οι επιπτώσεις στην μεταβολή του pH και τη βιολογία θα ήταν πιθανώς παρόμοιες με εκείνες του Παλαιόκαινου-Ηωκενικού θερμικού μέγιστου (Paleocene – Eocene Thermal Maximum - PETM), 55 εκατομμύρια χρόνια πριν. Το PETM πιθανώς προκάλεσε μαζική εξαφάνιση των βενθικών τρηματοφόρων (Zachos *et al.*, 2005). Οι προβλεπόμενες ανθρωπογενείς εισροές άνθρακα θα συμβούν μέσα σε μόλις 300

χρόνια, κάτι που πιστεύεται ότι είναι πολύ γρηγορότερο από την απελευθέρωση του CO₂ κατά τη διάρκεια του PETM και πολύ γρήγορο για διάλυση των ασβεστολιθικών ιζημάτων για την εξουδετέρωση του ανθρωπογενούς CO₂. Κατά συνέπεια, οι επιπτώσεις που προκαλούνται από την οξίνιση των ωκεανών στο επιφανειακό pH του ωκεανού και τη βιολογία θα είναι πιθανώς πιο σοβαρές από ό, τι κατά τη διάρκεια της PETM (Zachos *et al.*, 2005).

Ενώ είναι προφανές ότι η αλλαγή της χημείας του θαλασσινού νερού θα έχει σοβαρές συνέπειες για πολλούς θαλάσσιους ασβεστοποιητές, οι επιδράσεις της οξίνισης των ωκεανών σε μη ασβεστοποιητές και οι αντιδράσεις του οικοσυστήματος σε αυτές τις αλλαγές θα είναι πολύπλοκες και δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν. Η εκτίμηση αν η οξίνιση των ωκεανών είναι ο πρωταρχικός παράγοντας μείωσης του πληθυσμού ενός είδους θα είναι δύσκολη λόγω του πλήθους των συνεχιζόμενων φυσικών και χημικών αλλαγών που συμβαίνουν αυτή τη στιγμή στον ωκεανό. Η οξίνιση των ωκεανών συμβαίνει σε συνέργεια με σημαντικές συνεχείς περιβαλλοντικές αλλαγές (π.χ. αύξηση της θερμοκρασίας των ωκεανών) και αυτές οι αθροιστικές επιπτώσεις ή αλληλεπιδραστικές επιδράσεις πολλαπλών στρεσογόνων παραγόντων μπορεί να έχουν πιο σημαντικές συνέπειες για τη βιολογία από οποιοδήποτε στρεσογόνο παράγοντα. Έτσι, η έρευνα σχετικά με τις συνεργιστικές επιδράσεις αυτών των αλλαγών στους θαλάσσιους οργανισμούς και τις επακόλουθες αποκρίσεις του οικοσυστήματος είναι κρίσιμη, αλλά ακόμα σε αρχικό στάδιο (Guinotte *et al.*, 2008).