



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕ ΤΙΤΛΟ:

**«Πολιτικές και δράσεις για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον κλάδο
των αερομεταφορών»**

Φοιτητής: Μουστάκας Ιωάννης, Ηλεκτρονικός Μηχανικός,

AM 202

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σέμπος Ιωάννης, Χημικός Μηχανικός

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: «Πολιτικές και δράσεις για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον κλάδο των αερομεταφορών»

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ ΣΕΜΠΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Η Τριμελής Επιτροπή

Γεώργιος Βαρελίδης,

Ιωάννης Σέμπος

Ανδρέας Ανδρεόπουλος

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μουστάκας Ιωάννης του Δημητρίου με αριθμό μητρώου 202 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα οικονομικά οφέλη των αερομεταφορών είναι σημαντικά σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς επηρεάζουν μια σειρά από άλλες κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες, όπως το εμπόριο, ο τουρισμός και οι επιχειρήσεις. Παρότι ως κλάδος της οικονομίας αντιμετώπισε μια σημαντική πτώση την περίοδο της πανδημίας, ήδη έχει ξεπεράσει την ύφεση και έφτασε στα επίπεδα που ήταν πριν. Υπάρχει η πεποίθηση ότι οι αεροπορικές μεταφορές θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται τις επόμενες δεκαετίες, πράγμα που σημαίνει ότι το μερίδιό τους στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου θα αυξάνεται με τον χρόνο. Για τον λόγο αυτό ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) και η Ευρωπαϊκή Ένωση ανέπτυξαν τη δική τους στρατηγική για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας. Πρόσφατα, ο Οργανισμός Βορειοατλαντικού Συμφώνου (NATO) και τα κράτη μέλη του έχουν αναπτύξει την δική τους πολιτική μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Σε αυτό το πλαίσιο η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό να διερευνήσει κριτικά τις πολιτικές και τις δράσεις που πρέπει να αναπτύξει ο κλάδος των αερομεταφορών, ώστε να συμβάλλει στη σταθεροποίηση του κλίματος και να πετύχει την λειτουργία του με «κλιματική ουδετερότητα». Μέσα από την ανάλυση των σύγχρονων επιστημονικών αναφορών και ερευνών σχετικά με τους τομείς των αερομεταφορών, την εξέλιξη και τις αλλαγές που συμβαίνουν, αλλά και μέσα από τις εκθέσεις των διεθνών οργανισμών για τις πολιτικές προτεραιότητες που πρέπει να τεθούν και να υλοποιηθούν, η εργασία επιχειρεί να καταγράψει την εκτίμηση της επιστημονικής κοινότητας για την πορεία των αλλαγών που επιχειρούνται. Παράλληλα, έγινε μια προσπάθεια να παρουσιαστούν οι εξελίξεις στην πολεμική αεροπορία και τις πολιτικές και δράσεις που και αυτή αναπτύσσει τα τελευταία χρόνια. Με τον τρόπο αυτό δύναται να συνεισφέρει στον διάλογο που επιχειρείται σε παγκόσμιο, κοινοτικό και εθνικό επίπεδο για τις πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας που επιδρούν στην αλλαγή του κλίματος του πλανήτη.

Λέξεις-κλειδιά: Κλιματική ουδετερότητα, αερομεταφορές, μετριασμός της κλιματικής αλλαγής, πολεμική αεροπορία

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	9
1.2 Αποσαφήνιση του όρου «Κλιματική Ουδετερότητα»	10
1.3 Η έννοια της Κλιματικής Ουδετερότητας στις αερομεταφορές	12
2. ΑΕΡΟΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	15
2.1 Η Παγκόσμια Κλιματική Κρίση	16
2.2 Αερομεταφορές και κλιματική κρίση	20
2.3 Κύριες εκπομπές των αεροσκαφών	23
2.3.1. Πρωτογενή προϊόντα της καύσης.....	23
2.3.2. Δευτερογενή προϊόντα της καύσης	27
2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν έμμεσα την κλιματική αλλαγή	32
3. Η ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑ	36
3.1 Πολιτικές για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στις αερομεταφορές	39
3.1.1. Διεθνείς πολιτικές για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας.....	40
3.1.2. Εθνικές πολιτικές για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας	46
3.2 Δράσεις για την μείωση των επιπτώσεων στο κλίμα	54
3.2.1. Βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα (SAF).....	56
3.2.2. Αντιστάθμιση άνθρακα	61
3.2.3. Ηλεκτρικά, υβριδικά και υδρογονοκίνητα αεροσκάφη.....	65
3.2.4 Αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας των αερομεταφορών	70
4. ΠΟΛΕΜΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑ	77
4.1 Υφιστάμενες Πολιτικές για την Κλιματική Ουδετερότητα στη πολεμική αεροπορία	79
4.2 Στρατιωτικά Σχέδια Δράσης για το κλίμα	84
4.3 Προτεραιότητες της Πολεμικής Αεροπορίας.....	88
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αερομεταφορές, είναι ένας τρόπος μεταφοράς που περιλαμβάνει τη χρήση αεροπλάνων για τη μεταφορά ανθρώπων και αγαθών από μια περιοχή σε μια άλλη. Παρέχουν σημαντικά οικονομικά και κοινωνικά οφέλη όχι μόνο στις χώρες και τους ανθρώπους που συνδέονται μέσω αυτών, αλλά και στην παγκόσμια κοινότητα, καθώς βοηθούν να έρθουν σε επαφή απομακρυσμένοι πολιτισμοί και περιοχές του πλανήτη (Hasan, et al., 2021). Οι αεροπορικές μεταφορές είναι ιδιαίτερα σημαντικές και για τις δραστηριότητες παροχής υπηρεσιών, επειδή έχουν αποτέλεσμα έλξης, με άλλα λόγια προσελκύουν ανθρώπους και επιχειρήσεις σε ορισμένες περιοχές. Έτσι, η σχέση μεταξύ τους με την οικονομική ανάπτυξη μια περιοχής είναι μακροπρόθεσμη, πράγμα που σημαίνει ότι έχει μόνιμο αντίκτυπο στην οικονομία της (IATA, 2023).

Τα οικονομικά οφέλη των αερομεταφορών περιλαμβάνουν την αύξηση του εμπορίου, του τουρισμού και της επιχειρηματικής δραστηριότητας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία θέσεων εργασίας και αυξημένο εισόδημα για ιδιώτες και επιχειρήσεις (Hasan, et al., 2021). Σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Αερομεταφορών (IATA, 2022), περίπου 4 δις. άνθρωποι ταξίδεψαν με αεροπλάνο το 2022, μια αύξηση της τάξης του 53% σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά, ενώ η συνολική αεροπορική κίνηση το 2022 (μετρημένη σε έσοδα ανά χιλιόμετρο επιβάτη ή RPK) αυξήθηκε 64,4% σε σύγκριση με το 2021. Ήδη η κίνηση των αεροσκαφών έφτασε στα επίπεδα και το 2023 αναμένεται να ξεπεράσει την κίνηση της εποχής πριν από την πανδημία, στοιχεία που δηλώνουν ότι οι αερομεταφορές ως τομέας αναπτύσσονται ραγδαία στις περισσότερες περιοχές του κόσμου (IATA, 2023).

Τα επόμενα χρόνια ο αριθμός των πτήσεων σε όλες τις περιοχές του κόσμου αναμένεται να αυξηθεί και τα αεροσκάφη έχουν κατά μέσο όρο να έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα σε θέσεις και να λειτουργούν με υψηλότερο συντελεστή φορτίου. Έτσι, υπάρχει η πεποίθηση ότι οι αεροπορικές μεταφορές θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται τις επόμενες δεκαετίες (Grewe, et al., 2021). Η έντονη αυτή δραστηριότητα εξηγεί γιατί η αεροπορική βιομηχανία συμβάλλει περίπου στο 2% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) (Jing, et al., 2022). Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτό το ποσοστό δεν περιλαμβάνει άλλες εκπομπές από την αεροπορική βιομηχανία, όπως αυτές από οχήματα εδάφους αεροδρομίων, την ενέργεια που χρησιμοποιείται σε τερματικούς σταθμούς αεροδρομίων, την

κατασκευή αεροσκαφών και την κατασκευή αερολιμενικών υποδομών. Η συνολική συνεισφορά των αερομεταφορών στην υπερθέρμανση του πλανήτη εκτιμάται ότι είναι 2-5 φορές υψηλότερη από την επίδραση των εκπομπών CO₂ μόνο, καθώς θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο κλάδος των αερομεταφορών συμβάλει στην κλιματική αλλαγή και με παράγοντες που δεν σχετίζονται με το CO₂ (Okolie, et al., 2023). Οι επιπτώσεις της βιομηχανίας των αερομεταφορών στην κλιματική αλλαγή θα αναλυθούν στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας.

Οι προβλέψεις για το μέλλον δείχνουν ότι οι εκπομπές των αερομεταφορών αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά. Οι προβλέψεις του κλάδου προβλέπουν ετήσιες αυξήσεις 4% έως 5% τα επόμενα 20 χρόνια (Hasan, et al., 2021). Αυτή η ταχεία ανάπτυξη έχει το κόστος των αυξανόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων και από την προηγούμενη δεκαετία υπήρξαν ανησυχίες ότι η αεροπορία μπορεί να γίνει ένας από τους τομείς με τις υψηλότερες εκπομπές έως το 2050. Για να αντιμετωπίσει αυτές τις ανησυχίες, ο τομέας των αερομεταφορών έχει θέσει στόχους για την υλοποίηση μιας αναπτυξιακής πολιτικής με γνώμονα την κλιματική ουδετερότητα και τη μείωση των επιπέδων εκπομπών έως το 2050. Έχουν καταβληθεί προσπάθειες για τον μετριασμό των εκπομπών από τις αερομεταφορές μέσω δράσεων πολιτικής σε εθνικό, περιφερειακό και διεθνές επίπεδο.

Συγκεκριμένα, μετά από τη Συμφωνία του Παρισιού του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (United Nations, 2015), ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) έχει εφαρμόσει το Σχέδιο Αντιστάθμισης και Μείωσης Άνθρακα για τη Διεθνή Αεροπορία (CORSIA) και οι αερομεταφορές έχουν συμπεριληφθεί στο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (ETS) (Dray & Schäfer, 2021). Αναγνωρίζοντας τη σημασία της απεξάρτησης από τον άνθρακα, τα κράτη μέλη του ICAO ανέπτυξαν τη δική τους στρατηγική για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας (US Department of Transportation, 2021). Εκτός από τις κυβερνήσεις, στον σχεδιασμό της διαδρομής αυτής πήραν μέρος όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη του τομέα των αερομεταφορών (Sustainable Aviation (SA), 2022; ICAO, 2021). Οι πολιτικές και οι δράσεις που αφορούν τον τομέα της πολιτικής αεροπορίας, θα αναπτυχθούν στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Ο σχεδιασμός της πολιτικής για την επίτευξη μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα (net zero carbon) περιελάβανε και την πολεμική αεροπορία και γενικότερα τον στρατό. Αυτό οδήγησε τον Οργανισμό Βορειοατλαντικού Συμφώνου (NATO), να αναπτύξει την δική του πολιτική μείωσης των εκπομπών και να χαράξει τη διαδρομή

για την επίτευξη των στόχων της στρατηγικής αυτής (NATO, 2022). Η Ελληνική Κυβέρνηση, όπως και οι κυβερνήσεις των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) και του NATO, εναρμόνισαν την εθνική τους νομοθεσία για την κλιματική αλλαγή (ΦΕΚ 105/Α/27-5-2022, Ν. 4936/2022 «Εθνικός Κλιματικός Νόμος»). Παράλληλα, το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας και ο Ελληνικός Στρατός ανέπτυξαν τον «Οδικό Χάρτη για τον Περιορισμό των Επιπτώσεων και την Προσαρμογή των Ενόπλων Δυνάμεων στην Κλιματική Αλλαγή» (ΥΠΕΘΑ, 2022), στον οποίο ενσωματώνονται δράσεις για την πολεμική αεροπορία. Οι πολιτικές και οι δράσεις που αφορούν τον τομέα της πολεμικής αεροπορίας, σε Εθνικό, Ευρωπαϊκό και Διεθνές επίπεδο, θα αναπτυχθούν στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές της αεροπορικής βιομηχανίας ήταν πρόκληση λόγω της μεγάλης εξάρτησής της από υγρά καύσιμα υψηλής πυκνότητας. Ωστόσο, οι τεχνολογικές βελτιώσεις και οι αλλαγές στις πρακτικές είναι απαραίτητες για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη και τη μείωση της συμβολής της βιομηχανίας στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Rodriguez, et al., 2023). Η μελλοντική αεροπορία πρέπει να στοχεύει στη μείωση των εκπομπών CO₂ ανά επιβάτη το χιλιόμετρο κατά 75% και των εκπομπών NO_x κατά 90% (Dray, et al., 2022). Επομένως, περαιτέρω τεχνολογικές εξελίξεις και αλλαγές στις πρακτικές είναι απαραίτητες για την απαλλαγή του κλάδου από τον άνθρακα και τη μείωση των επιπτώσεών του στην κλιματική αλλαγή.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Δεδομένης της ανησυχίας που εντείνεται τα τελευταία χρόνια για την κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση του πλανήτη και του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας για τις διεξόδους από την πορεία αυτή, η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό να διερευνήσει κριτικά τις πολιτικές και τις δράσεις που πρέπει να αναπτύξει ο κλάδος των αερομεταφορών, ώστε να συμβάλλει στη σταθεροποίηση του κλίματος. Ήδη από το 2015 και μετά οι διεθνείς οργανισμοί που δραστηριοποιούνται στις αερομεταφορές, αλλά και ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν περιγράψει τις παραμέτρους που απαιτείται να βελτιωθούν, έχουν προσδιορίσει τις αναγκαίες παρεμβάσεις και τις εξελίξεις που πρέπει να επιταχυνθούν. Σήμερα, σχεδόν μια δεκαετία μετά τη Συμφωνία του Παρισιού, αξίζει να καταγραφούν τα βήματα που έχουν πραγματοποιηθεί προς αυτή την κατεύθυνση.

Για να γίνει εφικτός ο σκοπός αυτός αναλύεται σε τρεις επιμέρους στόχους, στην επίτευξη των οποίων θα εστιάσουν τα επόμενα κεφάλαια:

- ❖ Η αξιολόγηση των επιπτώσεων που προκαλεί η βιομηχανία των αερομεταφορών και οι δραστηριότητες που αναπτύσσει σε κάθε επίπεδο, στο περιβάλλον και ειδικότερα στο κλίμα του πλανήτη.
- ❖ Η καταγραφή και η κριτική αποτίμηση των πολιτικών και των δράσεων που προτείνονται για τη λειτουργία συνολικά του κλάδου των αερομεταφορών ώστε να συμβάλει στην σταθεροποίηση του κλίματος.
- ❖ Η περιγραφή της συνεισφοράς και της στάσης της πολεμικής αεροπορίας στη στρατηγική προστασίας του κλίματος που έχουν θέσει οι διεθνείς οργανισμοί και οι δράσεις που πρέπει να αναπτύξει.

Μέσα από την ανάλυση των σύγχρονων επιστημονικών αναφορών και ερευνών σχετικά με τους τομείς των αερομεταφορών, την εξέλιξη και τις αλλαγές που συμβαίνουν, αλλά και μέσα από τις εκθέσεις των διεθνών οργανισμών για τις πολιτικές προτεραιότητες που πρέπει να τεθούν και να υλοποιηθούν, η εργασία επιχειρεί να καταγράψει την εκτίμηση της επιστημονικής κοινότητας για την πορεία των αλλαγών που επιχειρούνται. Με τον τρόπο αυτό δύναται να συνεισφέρει στον διάλογο που επιχειρείται σε παγκόσμιο, κοινοτικό και εθνικό επίπεδο για τις πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας που επιδρούν στην αλλαγή του κλίματος του πλανήτη.

1.2 Αποσαφήνιση του όρου «Κλιματική Ουδετερότητα»

Η έννοια της «ουδετερότητας» εισήχθη για πρώτη φορά με την μορφή του όρου «ουδετερότητα άνθρακα» στη Συμφωνία του Παρισιού για το κλίμα του Ο.Η.Ε. (UNFCCC COP21) και έκτοτε αποτελεί μια δημοφιλή έννοια-κλειδί σε όλες τις συμφωνίες (United Nations, 2015). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θέσει ως στόχο την «ουδετερότητα των αερίων του θερμοκηπίου» έως το 2050 (Cifuentes-Faura, 2022), ενώ στις εκθέσεις και συμφωνίες της IATA (IATA, 2023), της ICAO (ICAO, 2022) και του NATO (NATO, 2023) συχνά αναφέρεται και ο όρος «κλιματική ουδετερότητα» εκτός των άλλων. Ο όρος αυτός αναφέρεται στην έννοια της εξισορρόπησης των εκπομπών άνθρακα από κάποια ανθρώπινη δραστηριότητα, με την μείωση των εκπομπών και της απορρόφησης του άνθρακα. Περιλαμβάνει δηλαδή, τον υπολογισμό της μείωσης των εκπομπών άνθρακα όπου είναι δυνατόν και στη συνέχεια την αντιστάθμιση των υπόλοιπων εκπομπών μέσω δραστηριοτήτων, όπως η αγορά αντισταθμίσεων άνθρακα ή η χρηματοδότηση δράσεων απορρόφησης (π.χ.

αναδασώσεις). Ο στόχος είναι να επιτευχθεί μια κατάσταση όπου οι καθαρές εκπομπές άνθρακα είναι μηδενικές (Dębowska, et al., 2022). Η κλιματική ουδετερότητα έχει κερδίσει την προσοχή σε ατομικό, οργανωτικό και πολιτικό επίπεδο ως μέσο αντιμετώπισης των κλιματικών ευθυνών. Ωστόσο, υπάρχουν και ανησυχίες σχετικά με τις πιθανές ανισότητες στην εφαρμογή των πολιτικών αυτών και την εκμετάλλευση των πιο αδύναμων κρατών (Lenzi, 2022).

Η Κίνα, το Ηνωμένο Βασίλειο και η ΕΕ έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την ουδετερότητα. Η κλιματική ουδετερότητα είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη και απαιτεί μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, από τη στιγμή που αναφέρεται στην κατάσταση στην οποία υπάρχει ισορροπία μεταξύ της ποσότητας των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται και της ποσότητας των αερίων του θερμοκηπίου που απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα ένα σενάριο καθαρών μηδενικών εκπομπών (Dębowska et al., 2022). Είναι μια σημαντική έννοια στο πλαίσιο της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και του μετριασμού των επιπτώσεών της. Ο όρος "κλιματική ουδετερότητα" χρησιμοποιείται συχνά εναλλακτικά με "ουδετερότητα άνθρακα", αν και ο πρώτος είναι ένας ευρύτερος όρος που περιλαμβάνει και εκπομπές μη άνθρακα (Filho, et al., 2023).

Ο ορισμός της κλιματικής ουδετερότητας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το πλαίσιο και τους εμπλεκόμενους φορείς. Γενικά, περιλαμβάνει τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου μέσω διαφόρων μέτρων όπως η ενεργειακή απόδοση, η υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα, και αντιστάθμιση τυχόν εναπομεινουσών εκπομπών μέσω δραστηριοτήτων που αφαιρούν ή δεσμεύουν τα αέρια του θερμοκηπίου από την ατμόσφαιρα. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί μια κατάσταση όπου ο συνολικός αντίκτυπος στο κλίμα είναι περιορισμένος (Zhang, et al., 2023).

Διαφορετικοί τομείς και κλάδοι μπορεί να έχουν τους δικούς τους συγκεκριμένους ορισμούς και προσεγγίσεις για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας. Για παράδειγμα, στο δομημένο περιβάλλον, η έννοια των κλιματικά ουδέτερων κτιρίων έχει κερδίσει την προσοχή. Περιλαμβάνει την αξιολόγηση του αποτυπώματος άνθρακα των κτιρίων, την εφαρμογή στρατηγικών μείωσης των εκπομπών και την αντιστάθμιση τυχόν υπολειπόμενων εκπομπών μέσω μέτρων,

όπως η δέσμευση άνθρακα ή η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας (Lützkendorf & Frischknech, 2020).

Η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας απαιτεί μια εμπειριστατωμένη και ολοκληρωμένη προσέγγιση, που περιλαμβάνει πολλούς ενδιαφερόμενους φορείς, συμπεριλαμβανομένων των κυβερνήσεων, των διεθνών οργανισμών, των επιχειρήσεων και των ατόμων (Kyriakopoulos & Sebos, 2023). Απαιτεί τον καθορισμό φιλόδοξων στόχων για τη μείωση των εκπομπών, την εφαρμογή αποτελεσματικών πολιτικών και κανονισμών από όλα τα εμπλεκόμενα μέρη και την προώθηση βιώσιμων πρακτικών και τεχνολογιών. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των στρατηγικών ουδετερότητας του κλίματος, για να διασφαλιστεί μια δίκαιη μετάβαση (Chen, et al., 2022)

1.3 Η έννοια της Κλιματικής Ουδετερότητας στις αερομεταφορές

Η κλιματική ουδετερότητα στον τομέα των αερομεταφορών αναφέρεται στην επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που παράγονται από τις αεροπορικές δραστηριότητες και της απομάκρυνσης ή αντιστάθμισης των εν λόγω εκπομπών, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καθαρή συμβολή στην αλλαγή του κλίματος (Brazzola, et al., 2022). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων μέτρων, όπως η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέσω τεχνολογικών εξελίξεων και επιχειρησιακών πρακτικών, η εφαρμογή βιώσιμων καυσίμων αεροσκαφών και η αντιστάθμιση των εναπομενουσών εκπομπών μέσω έργων αντιστάθμισης άνθρακα (Sustainable Aviation (SA), 2022). Η αεροπορική βιομηχανία διαδραματίζει καίριο ρόλο στον μετριασμό των επιπτώσεων της στην κλιματική αλλαγή, εφαρμόζοντας μέτρα για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα και υιοθετώντας βιώσιμες πρακτικές. Ωστόσο, προκλήσεις όπως τα ανεπαρκή ρυθμιστικά πλαίσια, οι περιορισμοί χωρητικότητας και η ανάγκη για συμπράξεις δημόσιου-ιδιωτικού τομέα πρέπει να αντιμετωπιστούν, για να επιτευχθούν ουσιαστικές μειώσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στον τομέα των αερομεταφορών (ICAO, 2022).

Η αεροπορική βιομηχανία συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως μέσω της καύσης καυσίμου αεριωθουμένων, που απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), καθώς και άλλα αέρια του θερμοκηπίου όπως το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), το μεθάνιο (CH₄) και τους υδρατμούς (Nick & Thalmann, 2022). Επίσης, σημαντικές είναι και οι επιπτώσεις στο κλίμα από

δραστηριότητες του τομέα που δεν σχετίζονται με τις εκπομπές CO₂ (Brazzola, et al., 2022). Για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αεροπορίας, τομεακοί οργανισμοί όπως ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) έχουν αναπτύξει πρότυπα και συνιστάμενες πρακτικές για τη χρήση ενέργειας και την ανάπτυξη ενός βιώσιμου περιβάλλοντος (ICAO, 2022). Στο ίδιο μήκος κύματος και η Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών έχει αναπτύξει την πολιτική και τον οδικό χάρτη για την επίτευξη του στόχου αυτού (IATA, 2023). Αυτές οι πρωτοβουλίες στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών και στην προώθηση της χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας στην αεροπορική βιομηχανία. Η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών και τεχνολογιών, όπως η χρήση βιοκαυσίμων, μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον τομέα αυτόν (Dray, et al., 2022). Μπορούν επίσης, να αξιοποιηθούν διάφορες στρατηγικές και τεχνολογίες, όπως η βελτίωση της απόδοσης των καυσίμων, η μετάβαση σε βιώσιμα καύσιμα αεροσκαφών (SAF) ή συνθετικά καύσιμα αεριωθουμένων που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές, η εφαρμογή επιχειρησιακών μέτρων για τη μείωση των εκπομπών και την επιτάχυνση τεχνολογικών προόδων, όπως ηλεκτρικά ή υδρογονοκίνητα αεροσκάφη. Επιπλέον, μηχανισμοί αντιστάθμισης, όπως η άμεση δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα στον αέρα (DACCS) ή η βιολογική παραγωγή ενέργειας με δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα Bio-Energy with Carbon Capture and Storage (BECCS), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντισταθμίσουν τις υπόλοιπες εκπομπές που δεν μπορούν να εξαλειφθούν (Sacchi, et al., 2023; Sebos, 2022).

Ωστόσο, η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον τομέα των αερομεταφορών δεν είναι χωρίς προκλήσεις και ηθικά διλήμματα. Μια ηθική σκέψη είναι η ανάγκη να διασφαλιστεί ότι το βάρος της επίτευξης της κλιματικής ουδετερότητας δεν θα επιβαρύνει δυσανάλογα τις μελλοντικές γενιές. Ο κλάδος των αερομεταφορών πρέπει επίσης να αντιμετωπίσει τις διανεμητικές επιπτώσεις των μέτρων για την κλιματική ουδετερότητα, διασφαλίζοντας ότι οι ευάλωτες κοινότητες και περιοχές δεν επηρεάζονται δυσανάλογα. Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη για διαφάνεια και υπευθυνότητα στους μηχανισμούς αντιστάθμισης, ώστε να διασφαλίζεται ότι συμβάλλουν στην πραγματική μείωση των εκπομπών και δεν μεταφέρουν απλώς το βάρος σε άλλους τομείς ή περιφέρειες (Schmalenbach, 2022).

Η ανθρωπότητα βρίσκεται σε μια εποχή όπου η επείγουσα ανάγκη αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής δεν ήταν ποτέ πιο επιτακτική. Μέσα σε αυτήν την κρίσιμη συγκυρία, είναι απαραίτητο να εξεταστούν προσεκτικά οι πολιτικές και οι

ενέργειες που αναλαμβάνονται από βιομηχανίες που συμβάλλουν σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα, όπως η αεροπορική βιομηχανία. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα αναλυθεί η πορεία προς την κλιματική ουδετερότητα.

2. ΑΕΡΟΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

Ο τομέας των αερομεταφορών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) και η αντιμετώπισή τους είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των κλιματικών στόχων. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι εκπομπές των αερομεταφορών προβλέπεται να αυξηθούν και εάν δεν ληφθεί σημαντική δράση, η αεροπορία θα μπορούσε να γίνει ένας από τους τομείς με τις υψηλότερες εκπομπές GHG έως το 2050 (Dray, et al., 2022). Η αεροπορική βιομηχανία συμβάλλει σημαντικά τόσο στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) οξειδίων του αζώτου (NO_x), υδρατμών και μεθανίου (CH₄), όσο και στην ανάπτυξη δραστηριοτήτων που δεν σχετίζονται με τον άνθρακα, αλλά επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή, όπως για παράδειγμα τα ίχνη συμπυκνωμάτων που δημιουργούνται από τα αεροπλάνα (Brazzola, et al., 2022). Σήμερα για παράδειγμα, η αεροπορία αντιπροσωπεύει το 4,8% της συνεισφοράς των ΗΠΑ στις εκπομπές CO₂ και περίπου το 2% όλων των εκπομπών CO₂ που προκαλούνται από τον άνθρωπο παγκοσμίως (Sacchi, et al., 2023).

Ο αυξανόμενος αριθμός πτήσεων, ειδικά σε ταχέως εξελισσόμενες αγορές όπως η Κίνα, οδηγεί σε ακόμα υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές GHG's (Zhang, et al., 2023). Ο αντίκτυπος των εκπομπών CO₂ των αερομεταφορών στην κλιματική αλλαγή ποσοτικοποιείται, με προβλέψεις που δείχνουν ότι έως το 2050, οι εκπομπές CO₂ των αερομεταφορών θα μπορούσαν να συμβάλουν στο 1,4% έως 2,0% της συνολικής ανθρωπογενούς θέρμανσης που σχετίζεται με τις εκπομπές αερίων από την καύση ορυκτών καυσίμων (ICAO, 2022). Στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν αναφορές που εκτιμούν ότι η αεροπορία έχει συντελέσει περίπου στο 4% στην παρατηρούμενη υπερθέρμανση του πλανήτη που προκαλείται από τον άνθρωπο, παρά το γεγονός ότι αντιπροσωπεύει μόνο το 2,4% των παγκόσμιων ετήσιων εκπομπών CO₂ (Leamon, et al., 2019). Ο μακρύς χρόνος παραμονής των αερίων που συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη και προέρχονται από εκπομπές της αεροπορίας στην ατμόσφαιρα, καθιστά την βιομηχανία των αερομεταφορών βασική εταίρο στην κλιματική αλλαγή σε μεγάλες χρονικές κλίμακες (Sustainable Aviation (SA), 2022). Έτσι, μέχρι το 2050, η αεροπορία προβλέπεται να προκαλέσει συνολικά περίπου 0,1° C θέρμανσης, με το ήμισυ να συμβαίνει ήδη και το άλλο μισό να αναμένεται τις επόμενες τρεις δεκαετίες (Varotsos, et al., 2021).

2.1 Η Παγκόσμια Κλιματική Κρίση

Η κλιματική κρίση σήμερα αναφέρεται στις επείγουσες και σοβαρές προκλήσεις που θέτει η κλιματική αλλαγή. Η κλιματική αλλαγή προκαλεί μια σειρά επιζήμιων επιπτώσεων, όπως αυξημένη επισιτιστική ανασφάλεια, συχνότερες και έντονες ξηρασίες, ακραία κύματα καύσωνα, απώλεια οικοσυστημάτων κοραλλιογενών υφάλων και αύξηση της στάθμης της θάλασσας (ΥΠΕΘΑ, 2022). Αυτές οι επιπτώσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα και επηρεάζουν δυσανάλογα ευάλωτες κοινωνικές ομάδες, κοινότητες και χώρες. Η κλιματική αλλαγή είναι ένα πολύπλευρο ζήτημα που είναι βαθιά διασυνδεδεμένο με όλους τους τομείς της κοινωνίας και έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει μη γραμμικές αλλαγές και κλιμακωτά σοκ (Chen, et al., 2022). Η λήψη αποφάσεων και οι θεσμικές προκλήσεις προκύπτουν λόγω του πολύπλοκου και μακροπρόθεσμου χαρακτήρα της κλιματικής αλλαγής, καθώς και της έλλειψης γνώσεων και συντονισμού. Έτσι, παρά τις προσπάθειες σε παγκόσμιο επίπεδο για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την ανάπτυξη πολιτικών για τον μετριασμό και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, η μέση θερμοκρασία του πλανήτη φαίνεται να βρίσκεται σε συνεχή άνοδο (Dębkowska, et al., 2022).

Η κλιματική κρίση σήμερα αναφέρεται στις σοβαρές και επείγουσες προκλήσεις που θέτει η ανθρωπογενής υπερθέρμανση του πλανήτη, η ρύπανση και η περιβαλλοντική υποβάθμιση (Fanzo & Miachon, 2023). Θεωρείται μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην ιστορία της ανθρωπότητας, με εκτεταμένες επιπτώσεις τόσο στη σωματική όσο και στην ψυχική υγεία (Luyten, et al., 2023). Η κλιματική κρίση χαρακτηρίζεται από τη διαταραχή των παγκόσμιων κλιματικών προτύπων, που οδηγεί σε αυξημένες θερμοκρασίες, ακραία καιρικά φαινόμενα, άνοδο της στάθμης της θάλασσας και καταστροφή των οικοσυστημάτων (Kabir, et al., 2023).

Τέτοιες διαταραχές μπορεί να είναι φυσικές, λόγω αλλαγών στη δραστηριότητα του ήλιου ή μεγάλων ηφαιστειακών εκρήξεων. Αλλά από το 1800, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ήταν ο κύριος μοχλός της κλιματικής αλλαγής, κυρίως λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η καύση ορυκτών καυσίμων δημιουργεί εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που λειτουργούν σαν μια κουβέρτα τυλιγμένη γύρω από τη Γη, παγιδεύοντας τη θερμότητα του ήλιου και αυξάνοντας τις θερμοκρασίες (UN, 2022).

Η Συνθετική Έκθεση (SYR) που ολοκληρώνει την Έκτη Έκθεση Αξιολόγησης (AR6) της Διακυβερνητικής Ομάδας για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), συνθέτει και

ενσωματώνει τα αποτελέσματα που περιέχονται στις τρεις Εκθέσεις Αξιολόγησης Ομάδων Εργασίας και στις Ειδικές Εκθέσεις που συμβάλλουν στην έκθεση αξιολόγησης. Αντιμετωπίζει ένα ευρύ φάσμα σχετικών με την πολιτική αλλά πολιτικά ουδέτερων ζητημάτων που εγκρίθηκαν από την Επιτροπή. Συνοψίζει την κατάσταση των γνώσεων σχετικά με την κλιματική αλλαγή, τις εκτεταμένες επιπτώσεις και τους κινδύνους που προκύπτουν από αυτή, καθώς και τα μέτρα για να αντιμετωπιστούν οι συνέπειές της.

Η έκθεση αυτή, αναγνωρίζει την αλληλεξάρτηση του κλίματος, των οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας και των ανθρώπινων κοινωνιών, την αξία των διαφορετικών μορφών γνώσεων, τους στενούς δεσμούς μεταξύ της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, του μετριασμού των επιπτώσεών της, της υγείας των οικοσυστημάτων, της ανθρώπινης ευημερίας και της βιώσιμης ανάπτυξης. Αντανακλά την αυξανόμενη ποικιλομορφία των παραγόντων που εμπλέκονται στη δράση για το κλίμα. Με βάση την επιστημονική κατανόηση, τα βασικά ευρήματα που διατυπώνονται στη έκθεση αυτή είναι:

- Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως μέσω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, προκάλεσαν αναμφισβήτητα την υπερθέρμανση του πλανήτη, με τη θερμοκρασία της επιφάνειας του πλανήτη να φτάνει τους 1,1°C πάνω από το 1850-1900 το 2011-2020. Οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συνέχισαν να αυξάνονται, με άνισες ιστορικές και συνεχείς συνεισφορές που προκύπτουν από τη μη βιώσιμη χρήση ενέργειας, τον τρόπο που χρησιμοποιείται η γη και τις αλλαγές της, τον τρόπο ζωής και τα πρότυπα κατανάλωσης και παραγωγής σε όλες τις περιοχές, μεταξύ και εντός χωρών και μεταξύ ατόμων.
- Έχουν συμβεί εκτεταμένες και γρήγορες αλλαγές στην ατμόσφαιρα, τον ωκεανό, την κρυόσφαιρα και τη βιόσφαιρα. Η κλιματική αλλαγή που προκαλείται από τον άνθρωπο επηρεάζει ήδη πολλές καιρικές και κλιματικές ακραίες συνθήκες σε κάθε περιοχή σε όλο τον κόσμο. Αυτό έχει οδηγήσει σε εκτεταμένες δυσμενείς επιπτώσεις και σχετικές απώλειες και ζημιές στη φύση και στους ανθρώπους. Οι ευάλωτες κοινότητες που έχουν ιστορικά συνεισφέρει το λιγότερο στην τρέχουσα κλιματική αλλαγή επηρεάζονται δυσανάλογα
- Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή σχεδίων προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή έχει προχωρήσει σε όλους τους τομείς και τις περιφέρειες, με τεκμηριωμένα οφέλη και ποικίλη αποτελεσματικότητα. Παρά την πρόοδο, υπάρχουν κενά προσαρμογής και θα συνεχίσουν να αυξάνονται με τους σημερινούς ρυθμούς υλοποίησης. Σε

ορισμένα οικοσυστήματα και περιοχές έχουν επιτευχθεί σκληρά και μαλακά όρια προσαρμογής. Σε ορισμένους τομείς και περιοχές συμβαίνει κακή προσαρμογή. Οι τρέχουσες παγκόσμιες χρηματοοικονομικές ροές που προορίζονται για να υποστηρίξουν την προσαρμογή είναι ανεπαρκείς και περιορίζουν την εφαρμογή των επιλογών προσαρμογής, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες.

➤ Οι πολιτικές και οι νόμοι που αφορούν την αντιστάθμιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, επεκτείνονται σταθερά από την προηγούμενη συνδιάσκεψη έως σήμερα. Οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2030, όπως εκτιμώνται από τις εθνικά καθορισμένες συνεισφορές (NDC) που ανακοινώθηκαν τον Οκτώβριο του 2021, καθιστούν πιθανό ότι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη θα ξεπεράσει τον 1,5°C κατά τον 21ο αιώνα και θα δυσκολέψει τον περιορισμό της θέρμανσης κάτω από τους 2°C που είναι ο στόχος. Υπάρχουν κενά μεταξύ των προβλεπόμενων εκπομπών από τις εφαρμοσμένες πολιτικές και των εκπομπών που υπολογίζονται από τις εθνικά καθορισμένες συνεισφορές και οι ροές χρηματοδότησης υπολείπονται των επιπέδων που απαιτούνται για την επίτευξη των κλιματικών στόχων σε όλους τους τομείς και τις περιφέρειες.

Σε ό,τι αφορά τις μελλοντικές προβλέψεις, η ίδια έκθεση αναφέρει ότι οι συνεχιζόμενες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, θα οδηγήσουν σε αύξηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, με την καλύτερη εκτίμηση να φθάσει τους 1,5°C στο εγγύς μέλλον σε εξεταζόμενα σενάρια και μοντελοποιημένες διαδρομές. Κάθε αύξηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη θα εντείνει πολλαπλούς και ταυτόχρονους κινδύνους. Οι βαθιές, γρήγορες και συνεχείς μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου θα οδηγούσαν σε αισθητή επιβράδυνση της υπερθέρμανσης του πλανήτη εντός περίπου δύο δεκαετιών, καθώς και σε ορατές αλλαγές στην ατμοσφαιρική σύνθεση μέσα σε λίγα χρόνια.

Όμως εάν δεν συμβούν αυτές οι μειώσεις, οι επιπτώσεις από την κλιματική αλλαγή και οι κίνδυνοι που σχετίζονται με το κλίμα θα ενταθούν. Για οποιοδήποτε δεδομένο μελλοντικό επίπεδο θέρμανσης, πολλοί κίνδυνοι που σχετίζονται με το κλίμα είναι υψηλότεροι από ό,τι εκτιμήθηκε στην προηγούμενη έκθεση του 2021 και οι προβλεπόμενες μακροπρόθεσμες επιπτώσεις είναι έως και πολλαπλάσιες από ό,τι παρατηρείται σήμερα. Οι κίνδυνοι και οι προβλεπόμενες επιπτώσεις και οι σχετικές απώλειες και ζημιές από την κλιματική αλλαγή κλιμακώνονται με κάθε αύξηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Οι κλιματικοί και μη κλιματικοί κίνδυνοι θα αλληλεπιδρούν όλο και περισσότερο, δημιουργώντας σύνθετους και διαδοχικούς

κινδύνους που είναι πιο περίπλοκοι και δύσκολοι στη διαχείρισή τους. Σε μια τέτοια περίπτωση, αυξάνεται η πιθανότητα και ο κίνδυνος αναπόφευκτων, μη αναστρέψιμων ή απότομων αλλαγών. Ορισμένες μελλοντικές αλλαγές είναι αναπόφευκτες και/ή μη αναστρέψιμες, αλλά μπορούν να περιοριστούν από βαθιές, γρήγορες και διαρκείς παγκόσμιες μειώσεις των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Η πιθανότητα απότομων και/ή μη αναστρέψιμων αλλαγών αυξάνεται με υψηλότερα επίπεδα υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Οι επιλογές προσαρμογής που είναι εφικτές και αποτελεσματικές σήμερα θα γίνουν περιορισμένες και λιγότερο αποτελεσματικές με την αύξηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Με την αύξηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, οι απώλειες και οι ζημιές θα αυξηθούν και επιπλέον ανθρώπινα και φυσικά συστήματα θα φτάσουν στα όρια προσαρμογής. Η κακή προσαρμογή μπορεί να αποφευχθεί με ευέλικτο, πολυτομεακό, χωρίς αποκλεισμούς, μακροπρόθεσμο σχεδιασμό και υλοποίηση δράσεων προσαρμογής, με συν-οφέλη σε πολλούς τομείς και συστήματα. Ο περιορισμός της υπερθέρμανσης του πλανήτη που προκαλείται από τον άνθρωπο απαιτεί καθαρές μηδενικές εκπομπές CO₂. Οι σωρευτικές εκπομπές άνθρακα μέχρι τη στιγμή της επίτευξης των καθαρών μηδενικών εκπομπών CO₂ και το επίπεδο των μειώσεων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αυτή τη δεκαετία καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό εάν η θέρμανση του πλανήτη μπορεί να περιοριστεί στους 1,5°C ή στους 2°C. Οι προβλεπόμενες εκπομπές CO₂ από την υπάρχουσα υποδομή ορυκτών καυσίμων χωρίς πρόσθετη μείωση θα υπερβαίνουν τον υπόλοιπο προϋπολογισμό άνθρακα για 1,5°C (IPCC, 2023).

Από τις εκτιμήσεις αυτές γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η κλιματική κρίση δεν αποτελεί απειλή μόνο για το περιβάλλον αλλά και για την ανθρώπινη υγεία και ευημερία. Έχει συνδεθεί με διάφορες επιπτώσεις στην υγεία, συμπεριλαμβανομένων των αναπνευστικών ασθενειών, των ασθενειών που σχετίζονται με τη ζέστη, των διαταραχών ψυχικής υγείας και της εξάπλωσης μολυσματικών ασθενειών (Luyten, et al., 2023). Αλλά και για τις ίδιες τις επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται σε τομείς που συμβάλουν στην κλιματική αλλαγή, η κρίση αυτή απειλεί την ύπαρξή τους. Η επείγουσα ανάγκη για τις επιχειρήσεις αυτές να λάβουν μακροπρόθεσμα μέτρα για την τόνωση της βιωσιμότητάς τους μπορεί να διευκρινιστεί σε σχέση με ονομαστικούς, νομοθετικούς παράγοντες που βασίζονται στην αγορά (Kabir, et al., 2023). Η συζήτηση για τον μετριασμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη και την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή δημιουργεί ένα σημαντικό θέμα στην ημερήσια διάταξη, ειδικά για

ορισμένους επιχειρηματικούς τομείς ή βιομηχανίες που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση διαφόρων πρώτων υλών, ιδιαίτερα ορυκτών καυσίμων. Λόγω των κινδύνων που εγκυμονεί η κλιματική αλλαγή, αναμένεται ότι οι επιχειρήσεις θα πρέπει να επωμιστούν αυξημένο λειτουργικό κόστος και μόνο λίγες εταιρείες είναι προετοιμασμένες για τέτοιες προκλήσεις στο πλαίσιο ενός σημαντικού μετασχηματισμού στην προμήθεια πρώτων υλών και των σχετικών νέων διαδικασιών μεταφοράς τους. Δεδομένου ότι τα μέτρα μετριασμού και προσαρμογής της κλιματικής αλλαγής έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τη μελλοντική επιβίωση των επιχειρήσεων, πρέπει να δημιουργηθεί ένας καλά υπολογισμένος, υπό διαπραγμάτευση και αμοιβαία αποδεκτός μηχανισμός εφαρμογής (Filho, et al., 2023).

2.2 Αερομεταφορές και κλιματική κρίση

Η αεροπορία είναι μια μεγάλη διεθνής βιομηχανία, σημαντική για τις επιχειρήσεις, τις κυβερνήσεις, τον τουρισμό και την έρευνα. Το κοινό ταξιδεύει για διάφορους λόγους, τόσο για να καλύψει απαραίτητες ανάγκες, όσο και για ταξίδια αναψυχής. Μια πτήση παρέχει συχνά τη μόνη δυνατότητα, για να φτάσει κάποιος σε απομακρυσμένες τοποθεσίες μέσα σε ένα αποδεκτό χρονικό πλαίσιο. Η ζήτηση για αεροπορικά ταξίδια μεταξύ χωρών και ομάδων πληθυσμού συνδέεται στενά με την ευημερία και τον τρόπο ζωής τους. Ωστόσο, οι αεροπορικές πτήσεις αποτελούν επίσης έναν από τους πιο εξαρτημένους από τον άνθρακα τρόπους ταξιδιού, καθώς εκπέμπουν ανά ώρα έως και 100 φορές περισσότερα αέρια τους θερμοκηπίου, απ' ό,τι τα ταξίδια με τρένο, λεωφορείο ή κοινόχρηστο αυτοκίνητο (Klöwer, et al., 2021).

Οι διεθνείς αερομεταφορές θεωρούνται συνήθως ένας τομέας που είναι δύσκολο να περιοριστεί και συχνά μένει εκτός στόχων μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπως καθορίζονται στη Συμφωνία του Παρισιού (Grewe, et al., 2021). Η αεροπορική βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένων τόσο των εκπομπών CO₂ όσο και των εκπομπών άλλων αερίων, συμβάλλει περίπου στο 5% στην υπερθέρμανση του πλανήτη που προκαλείται από τον άνθρωπο, με σχεδόν το 12% των εκπομπών CO₂ στον τομέα των μεταφορών να προέρχονται από τις δραστηριότητές της, καθιστώντας την σημαντικό συντελεστή στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή (Okolie, et al., 2023).

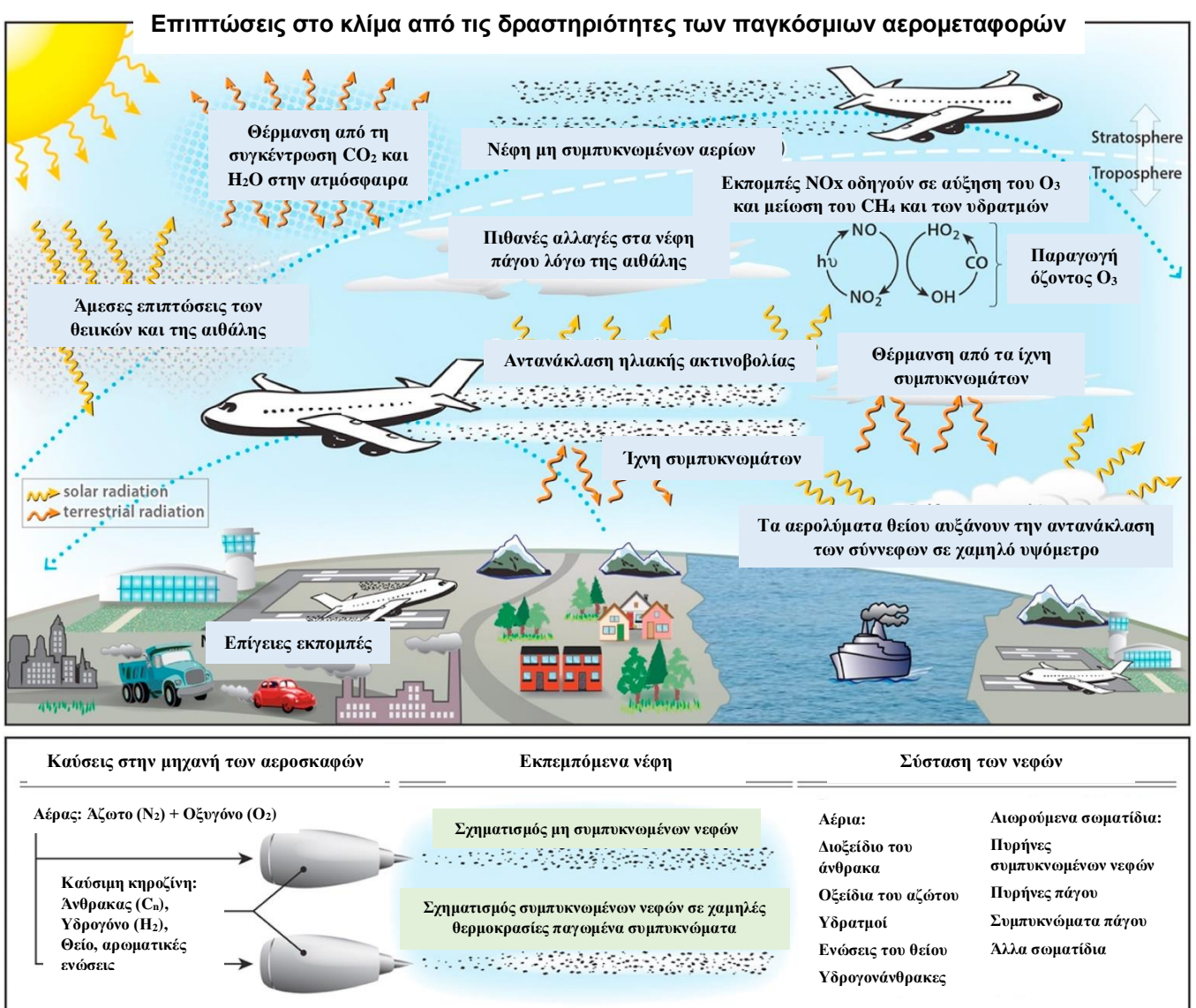
Οι κλιματικές επιπτώσεις της παγκόσμιας αεροπορίας είναι σημαντικές, με το ένα τρίτο των επιπτώσεων αυτών να σχετίζονται με τις εκπομπές CO₂ και τα δύο τρίτα με άλλους αέριους ρύπους. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας,

το 2019, οι αερομεταφορές αντιπροσώπευαν 1,03 GtCO₂, ή 3,1% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών CO₂ από την καύση ορυκτών καυσίμων (ICAO, 2022). Εκτός όμως από το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), κατά την κίνηση των αεροπλάνων παράγονται υδρατμοί (H₂O), οξειδία του αζώτου (NO_x), θειικά αερολύματα, ενώσεις από ατελή καύση του άνθρακα (άκαυστοι υδρογονάνθρακες) και αιρούμενα σωματίδια (αιθάλη). Τα εκπεμπόμενα είδη μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα και μεταβάλλουν ένα ευρύ φάσμα ατμοσφαιρικών διεργασιών, συμπεριλαμβανομένων του σχηματισμού ιχνών συμπυκνωμάτων, του όζοντος και του μεθανίου (CH₄) (Grewe, et al., 2021).

Υπολογίζεται ότι οι κινητήρες αεροσκαφών καταλάωναν περισσότερα από 1 δισεκατομμύριο λίτρα καυσίμου την ημέρα τα έτη 2016–2019 πριν από την πανδημία. Με αυτόν τον τρόπο, εξέπεμπαν, ανά kg καυσίμου, 3,16 kg CO₂, 1,23 kg υδρατμούς (H₂O), έως και 15,14 g NO_x, 1,2 g διοξειδίου του θείου (SO₂) και 0,03 g αιωρούμενων σωματιδίων (αιθάλη) (Lee, et al., 2021). Από αυτά τα αέρια, τα οξειδία του αζώτου σε υψόμετρα 8–12 km προκαλούν περίπλοκες χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα αλλάζοντας την ισορροπία ακτινοβολίας άλλων αερίων, συμπεριλαμβανομένων του μεθανίου (CH₄), του όζοντος (O₃) και των υδρατμών της στρατόσφαιρας (H₂O) και ως εκ τούτου επηρεάζουν έμμεσα το κλίμα, προκαλώντας ένα επιπλέον καθαρό φαινόμενο θέρμανσης (Klöwer, et al., 2021).

Τα ίχνη συμπύκνωσης που δημιουργούν τα αεροσκάφη κατά την πορεία τους μπορεί να είναι επίμονα, σχηματίζοντας σύννεφα που λειτουργούν ως ένας ακόμα παράγοντας που αναγκάζει την ανάκλαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας, θερμαίνοντας τον πλανήτη. Σε μια πρόσφατη αξιολόγηση των επιπτώσεων τους αναφέρεται ότι τα ίχνη συμπύκνωσης προκαλούν τα μεγαλύτερα αποτελέσματα θέρμανσης (57,4 milliWatts ανά τετραγωνικό μέτρο) ακολουθούμενα από τις εκπομπές CO₂ (34,3 milliWatts ανά τετραγωνικό μέτρο) και τις εκπομπές NO_x (17,5 milliWatts ανά τετραγωνικό μέτρο) (Hasan, et al., 2021). Οι επιπτώσεις τους αυξάνονται αναλογικά με τη συνολική απόσταση που διανύει το αεροπλάνο. Αυτό δικαιολογεί την ανησυχία από τον σχηματισμό τους, καθώς τα αεροπλάνα, εξαιρουμένων των ιδιωτικών, στρατιωτικών και εμπορευματικών πτήσεων, κάλυψαν περίπου 50 δισεκατομμύρια χιλιόμετρα το 2018 (Lee et al 2021), που ισοδυναμεί με 350 φορές την απόσταση μεταξύ Γης και Ήλιου.

Αν και οι εκπομπές από τα αεροπορικά ταξίδια μειώθηκαν κατά 40% το 2020 λόγω της πανδημίας COVID-19, η ζήτηση των αερομεταφορών έχει ήδη αρχίσει να ανακάμπτει, επιστρέφοντας στα προ πανδημίας επίπεδα και προβλέπεται να αυξηθεί στο μέλλον, με τις εκπομπές να αναμένεται να φτάσουν έως και 1,9 GtCO₂ το 2050 (~2,6 φορές τις τιμές του 2021) ή 3,4 GtCO₂eq (ισοδύναμο θέρμανσης του πλανήτη στα επόμενα 100 χρόνια: GWP100) (Sun, et al., 2023). Σχηματικά οι κύριοι παράγοντες που σχετίζονται με την αεροπορία και επηρεάζουν το κλίμα του πλανήτη παρουσιάζονται στην εικόνα 1. Οι παράγοντες αυτοί θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 1. Επιδράσεις των κυριότερων εκπομπών από τις αερομεταφορές στην θέρμανση του πλανήτη (Lee, et al., 2021)

2.3 Κύριες εκπομπές των αεροσκαφών

Η ευρεία χρήση καυσίμων αεριωθουμένων με βάση την κηροζίνη πηγάζει από την ανάγκη να ικανοποιούνται αυστηρές απαιτήσεις στην ισχύ ανά κιλό βάρους και στην ασφάλεια που απαιτούνται για την λειτουργία των αεροσκαφών. Αυτό οφείλεται στο ότι η κηροζίνη έχει εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και ευρύ φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας με χαμηλό οικονομικό κόστος, σε σύγκριση με τους εναλλακτικούς τύπους καυσίμων (Piripone, et al., 2023). Η στοιχειομετρική καύση της κηροζίνης με τον αέρα, που απαιτείται για τη δημιουργία ώθησης, δημιουργεί ωστόσο έναν αριθμό χημικά ενεργών και υψηλής ακτινοβολίας ειδών εκπομπής που εκπέμπονται από το αεροσκάφος στο πέρασμά του. Αυτές οι εκπομπές αεροσκαφών αλληλεπιδρούν με τη γύρω ατμόσφαιρα, διαταράσσοντας τη φυσική ισορροπία της και συμβάλλοντας σε ζητήματα ποιότητας του αέρα και ανθρωπογενείς κλιματικές αλλαγές (Tait, et al., 2022). Η σύνθεση και οι ιδιότητες των καυσίμων κηροζίνης που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική πρόωση, περιλαμβάνουν τα στρατιωτικά καύσιμα JP-5,7,8 και T-6, τα καύσιμα των εμπορικών αεριωθούμενων Jet A, Jet A-1 και TS-1 και τα καύσιμα των προωθητικών πυραύλων κηροζίνης RP-1 και RG-1.

Τα προϊόντα της καύσης των καυσίμων αυτών μπορούν να διακριθούν σε πρωτογενή και δευτερογενή. Τα πρωτογενή περιλαμβάνουν μια ποικιλία αέριων ενώσεων που σχηματίζονται άμεσα στον χώρο της καύσης, ενώ τα δευτερογενή παράγονται από χημικές αντιδράσεις των πρωτογενών ή άλλων στοιχείων των καυσίμων και μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες της καύσης και την ποιότητα του καυσίμου (Klöwer, et al., 2021). Η ειδική σύνθεση των προϊόντων καύσης μπορεί να ποικίλει ανάλογα με παράγοντες όπως ο τύπος του κινητήρα, το φορτίο του κινητήρα και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Έτσι, η καύση των καυσίμων αυτού του τύπου έχει ως αποτέλεσμα ένα πολύπλοκο μείγμα αερίων και σωματιδίων, με πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και την ανθρώπινη υγεία (Okolie, et al., 2023).

2.3.1. Πρωτογενή προϊόντα της καύσης

Τα πρωτογενή προϊόντα καύσης των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τη συγκεκριμένη σύνθεση καυσίμου και τις συνθήκες καύσης. Ωστόσο, ορισμένα κοινά προϊόντα καύσης περιλαμβάνουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τους υδρατμούς (H_2O) και λόγω των ακαθαρσιών των καυσίμων τα οξειδία του θείου (SO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και άκαυστους υδρογονάνθρακες (UHCs). Αυτά τα προϊόντα παράγονται ως άμεσο αποτέλεσμα της

αντίδρασης καύσης που λαμβάνει χώρα στην μηχανή του αεροσκάφους και ως εκ τούτου εξαρτώνται από τη σύνθεση υδρογονάνθρακα-προσμίξεων θείου του καυσίμου. Η μάζα των εκπομπών που παράγονται ανά μονάδα μάζας καυσίμου που καίγεται συχνά αναφέρεται ως δείκτης εκπομπής (EI), μετρούμενος σε γραμμάρια εκπομπής ανά κιλό καυσίμου [g/kg]. Η άμεση σύζευξη της παραγωγής αυτών των ειδών με την κατανάλωση καυσίμου σημαίνει ότι έχουν σταθερό EI σε όλες τις φάσεις της πτήσης (Tait, et al., 2022).

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης, τα άτομα άνθρακα και υδρογόνου του καυσίμου αντιδρούν με το οξυγόνο από τον αέρα για να παράγουν διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς. Τα οξείδια του θείου (SO_x) παράγονται όταν καίγονται καύσιμα που περιέχουν ενώσεις θείου. Το θείο στο καύσιμο οξειδώνεται για να σχηματίσει διάφορες ενώσεις, μεταξύ των οποίων το SO_2 , το οποίο συμβάλλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση και την όξινη βροχή. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα υποπροϊόν της ατελούς καύσης. Σχηματίζεται όταν υπάρχει ανεπαρκές διαθέσιμο οξυγόνο για την πλήρη οξείδωση του άνθρακα στο καύσιμο. Το CO είναι ένα τοξικό αέριο και συμβάλλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (UHCs) είναι ενώσεις που δεν καίγονται πλήρως κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης. Μπορούν να περιλαμβάνουν διάφορα είδη υδρογονανθράκων, όπως μεθάνιο, αιθάνιο και άλλες πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), που σχηματίζονται και στα δευτερογενή προϊόντα (Jing, et al., 2022). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ειδική σύνθεση και οι συγκεντρώσεις αυτών των προϊόντων καύσης μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με παράγοντες όπως ο τύπος καυσίμου αεριωθουμένων, οι συνθήκες καύσης (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, αναλογία αέρα προς καύσιμο) και η παρουσία προσθέτων ή ακαθαρσιών στο καύσιμο (Varotsos, et al., 2021).

Η συντριπτική πλειονότητα (~60%) της καύσης των καυσίμων των αεροπορικών μεταφορών και συνεπώς οι εκπομπές από τις αερομεταφορές συμβαίνουν σε ύψη πτήσης, μεταξύ 9 και 13 km κατακόρυφα. Η περιοχή της ατμόσφαιρας που περιλαμβάνει αυτόν τον όγκο εναέριου χώρου είναι γνωστή ως Άνω Τροπόσφαιρα και Κάτω Στρατόσφαιρα (UTLS), με όρια ± 5 km πάνω και κάτω από τη συμβατική τροπόπαυση. Περίπου το 20–40% των συνολικών εκπομπών αεροσκαφών απελευθερώνεται στη Κάτω Στρατόσφαιρα και το υπόλοιπο απελευθερώνεται στην τροπόσφαιρα, εκτεινόμενο από την επιφάνεια κατά την απογείωση έως το μέγιστο ύψος πτήσης. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω της απελευθέρωσης χημικά ενεργών ουσιών στη ζώνη αυτή είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό των εκπομπών

στην επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κλίμα σε αυτή τη ζώνη είναι πιο ευαίσθητο λόγω των αυξημένων χρόνων παραμονής των ρύπων, των χαμηλότερων συγκεντρώσεων στο υπόβαθρο (που σημαίνει ότι οι εκπομπές έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην χημική σύσταση της ατμόσφαιρας), των χαμηλότερων θερμοκρασιών που οδηγούν αναστρέψιμες αντιδράσεις σε δυσμενή κατεύθυνση και τέλος, υψηλότερη απόδοση ακτινοβολίας που οδηγεί σε πιο αποτελεσματικές φωτοχημικές αντιδράσεις προς τον σχηματισμό προϊόντων που διαταράσσουν την ισορροπία (Jing, et al., 2022).

Η πιο κοινή κλιματική μέτρηση που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των μεγεθών των κλιματικών επιπτώσεων από μια σειρά ειδών εκπομπών είναι ο εξαναγκασμός (θερμικής) ακτινοβολίας (RF). Το RF ορίζεται ως η διαταραχή στο καθαρό ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Γης-ατμόσφαιρας λόγω φυσικών ή ανθρωπογενών παραγόντων της κλιματικής αλλαγής, μετρούμενη σε watt ανά τετραγωνικό μέτρο [Wm^{-2}]. Μια θετική τιμή του δείκτη σημαίνει ότι ο μηχανισμός επιβολής του κλίματος προκαλεί ένα φαινόμενο θέρμανσης και αντίστροφα (Brazzola, et al., 2022). Οι Lee *et al.* (2021) παρουσιάζουν για την ανάλυση της παγκόσμιας συνεισφοράς των αέριων ρύπων, τον δείκτη του αποτελεσματικού εξαναγκασμού (θερμικής) ακτινοβολίας (ERF) για την κλιματική αλλαγή που προκαλείται από τις αερομεταφορές.

Το ERF είναι ένα πρόσφατα προτεινόμενο πλαίσιο μοντελοποίησης του κλίματος που βασίζεται στην ιδέα του εξαναγκασμού της (θερμικής) ακτινοβολίας RF, αφαιρώντας τις γρήγορες ατμοσφαιρικές προσαρμογές που δεν έχουν καμία σχέση με τη μακροπρόθεσμη απόκριση της θερμοκρασίας της επιφάνειας που εμφανίζεται σε δεκαετίες. Έτσι, η τιμή του ενσωματώνει στην τιμή ακτινοβολίας εξαναγκασμού όλες τις ανατροφοδοτούμενες προσαρμογές ακτινοβολίας που πραγματοποιούνται σε σύντομες χρονικές κλίμακες (Bickel, et al., 2020). Το ERF αξιολογείται σήμερα, για να διασφαλιστεί μια πολύ μικρότερη διακύμανση των διαφορετικών αποτελεσμάτων εξαναγκασμού γύρω από την περίπτωση αναφοράς της αύξησης του CO₂. Χρησιμεύει ως μια πιο κατάλληλη μέτρηση ισοδυναμίας για τη σύγκριση της απόκρισης της υπερθέρμανσης του πλανήτη των ετερογενώς κατανεμημένων βραχύβιων κλιματικών δυνάμεων και ομοιόμορφα κατανεμημένων παραγόντων μακράς διάρκειας ζωής (Tait, et al., 2022).

Οι κλιματικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τα πρωτογενή προϊόντα της καύσης που εκπέμπονται από τα αεροσκάφη είναι άμεσες και καλά κατανοητές. Ο ρόλος του CO₂ στην υπερθέρμανση του πλανήτη έχει μελετηθεί διεξοδικά, καθώς με

τη θερμική απορρόφηση της εξερχόμενης ακτινοβολίας, οδηγεί σε θέρμανση μέσω του πλανητικού φαινομένου του θερμοκηπίου (Klöwer, et al., 2021). Το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από τα αεροσκάφη εμφανίζει υψηλή τιμή αποτελεσματικής ακτινοβολίας (ERF), ενώ η θερμοδυναμική και φωτοχημική σταθερότητά του σημαίνει ότι έχει σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα, της τάξης των 100 έως 1000 ετών (Lee, et al., 2021). Ως εκ τούτου, οι εκπομπές άνθρακα από τα αεροσκάφη τείνουν να κατανέμονται σε παγκόσμιες χωρικές κλίμακες και να συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα, οδηγώντας σε αυξημένες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις με την πάροδο του χρόνου. Η πανταχού παρούσα και διαισθητική φύση της θέρμανσης που σχετίζεται με το CO₂ το θεωρεί κατάλληλο σημείο αναφοράς για τη σύγκριση της θέρμανσης του πλανήτη από κλιματικούς παράγοντες που δεν περιέχουν CO₂ (Kabir, et al., 2023).

Οι άμεσες ακτινοβολίες που προκαλούνται από τις εκπομπές υδρατμών των αερομεταφορών στην τροπόσφαιρα είναι ασήμαντες, επειδή η επίδραση στις συγκεντρώσεις του υποβάθρου είναι αμελητέα σε σύγκριση με τις φυσικές ροές του υδρολογικού κύκλου της Γης (Hasan, et al., 2021). Τυχόν εκπομπές υδρατμών από την τροπόσφαιρα τείνουν να χάνονται μέσω της εναπόθεσης, λόγω της υψηλής υγρασίας και των βροχοπτώσεων σε αυτήν την περιοχή, οδηγώντας σε διάρκεια ζωής περίπου 9 ημερών. Αντίθετα, οι υδρατμοί που εκπέμπονται στη στρατόσφαιρα (χωρίς να μεταφέρονται προς τα κατώτερα στρώματα) μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα, λόγω της υπερβολικής ξηρότητας σε αυτά τα υψόμετρα (Lee, et al., 2021). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αυξήσεις στις συγκεντρώσεις των υδρατμών της στρατόσφαιρας επηρεάζουν το κλίμα άμεσα μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς και μέσω επιρροών στην αέρια φάση και τη χημική σύνθεση του αερολύματος. Αυτό στη συνέχεια οδηγεί σε εξάντληση του όζοντος και μεταβάλλει τον σχηματισμό και την ανάπτυξη των πολικών στρατοσφαιρικών νεφών. Τόσο το άμεσο φαινόμενο του θερμοκηπίου όσο και ο έμμεσος αντίκτυπος στο όζον και τα πολικά στρατοσφαιρικά σύννεφα, που προκαλούνται από την αυξημένη συγκέντρωση των υδρατμών της στρατόσφαιρας, αυξάνουν την τιμή αποτελεσματικής ακτινοβολίας (ERF) που προκαλούν οι υδρατμοί (Lee, et al., 2021).

Η αιθάλη αντίθετα, παρουσιάζει άμεση ακτινοβολία καθώς έχει την ισχυρότερη απορρόφηση φωτός σε ορατά μήκη κύματος ανά μονάδα μάζας, περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη άφθονη ουσία στην ατμόσφαιρα. Ως αποτέλεσμα, συμβάλλει στην παγκόσμια θέρμανση μέσω της απορρόφησης τόσο της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας όσο και του φωτός που έχει αναπηδήσει από ανακλαστικές επιφάνειες

όπως το χιόνι και ο πάγος (Okolie, et al., 2023). Η θέρμανση της ατμόσφαιρας που προκύπτει από αυτό το φαινόμενο και η μείωση του ηλιακού φωτός μπορεί να επηρεάσει τον υδρολογικό κύκλο και τα μοτίβα κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας, έχοντας δυνητικά μεγαλύτερες επιπτώσεις στο κλίμα από ό,τι είχε υπολογιστεί. Παρά την ικανότητά της να απορροφά έντονα το ηλιακό φως, η αιθάλη των αεροσκαφών είναι υπεύθυνη μόνο για ένα μικρό ποσοστό του συνολικού ατμοσφαιρικού στερεού άνθρακα, πράγμα που σημαίνει ότι η αλληλεπίδραση αερολύματος-ακτινοβολίας που προκαλείται από την αιθάλη των αερομεταφορών αποτελεί μόνο ένα μικρό μέρος της αποτελεσματικής ακτινοβολίας του άνθρακα (Tait, et al., 2022).

Ένας άλλος πρωτογενής ρύπος, το διοξείδιο του θείου (SO_2), σχηματίζεται όταν το θείο, το οποίο υπάρχει ως πρόσμιξη σε κάποια καύσιμα που χρησιμοποιούν τα αεροσκάφη, οξειδώνεται κατά τη διαδικασία της καύσης. Το SO_2 που εκπέμπεται από τα καυσαέρια του αεροσκάφους μπορεί να οξειδωθεί για να σχηματίσει αέριο θειικό οξύ (H_2SO_4), το οποίο μπορεί να συμπυκνωθεί σε υπάρχοντα σωματίδια ή να συμβάλει στο σχηματισμό νέων σωματιδίων σε περιβάλλοντα χαμηλής συμπύκνωσης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό θειικού αερολύματος. Το θειικό αερόλυμα αποτελείται κυρίως από θειικό οξύ και αντίστοιχα άλατα, όπως το θειικό αμμώνιο. Οι οπτικές ιδιότητες του θειικού αερολύματος σημαίνουν ότι τείνει να διασκορπίζει το εισερχόμενο ηλιακό φως, οδηγώντας έτσι σε μια καθαρά αρνητική αποτελεσματική ακτινοβολία, η οποία επηρεάζει τον καθαρό άμεσο κλιματικό αντίκτυπο των αερολυμάτων της αεροπορίας προς την ψύξη (Lee, et al., 2021). Είναι σχετικά καλά τεκμηριωμένο ότι τα αερολύματα που προκαλούνται από τις αερομεταφορές έχουν άμεσο αντίκτυπο μέσω αλληλεπιδράσεων της ακτινοβολίας, καθώς και έμμεσα μέσω της ενεργοποίησης υδρατμών στις εκπομπές των αιωρούμενων σωματιδίων κατά τον σχηματισμό ιχνών. Υπάρχουν, ωστόσο, δυνητικά μεγάλες έμμεσες συνέπειες της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων αερολύματος με σταγονίδια σύννεφων και πυρήνων σωματιδίων πάγου περιβάλλοντος στην επιφάνεια του αερολύματος. Αυτά τα φαινόμενα παραμένουν ακόμα ασαφή, καθώς υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με την ακρίβεια της μοντελοποίησης της διαδικασίας νέφους και την ικανότητα να διακρίνονται τα νέφη που προκαλούνται από αεροσκάφη και τα φυσικά σύννεφα (Tait, et al., 2022).

2.3.2. Δευτερογενή προϊόντα της καύσης

Εκτός από τους πρωτογενείς αέριους ρύπους που παράγονται άμεσα κατά την καύση του καυσίμου στη μηχανή ενός αεροσκάφους, ένας αριθμός δευτερογενών προϊόντων καύσης μπορούν να βρεθούν στα καυσαέρια. Ανάμεσα στις ενώσεις αυτές

περιλαμβάνονται συγκεκριμένα οξειδία του αζώτου (NO_x , NO και NO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC), αιωρούμενα σωματίδια (PM) και ιχνοστοιχεία, καθώς και άλλες πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Αυτά τα προϊόντα ονομάζονται δευτερογενή, επειδή τα επίπεδα παραγωγής τους διαφέρουν, ανάλογα με τη φύση της διαδικασίας καύσης και την κατάσταση του φορτίου του κινητήρα (Tait, et al., 2022). Αυτό σημαίνει ότι ο δείκτης εκπομπής (EI) τους είναι μεταβλητός καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα του αεροσκάφους, τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του περιβάλλοντος (Bickel, et al., 2020).

Οι εκπομπές NO_x προέρχονται από την είσοδο ατμοσφαιρικού αζώτου (N_2) στον θάλαμο καύσης υψηλής θερμοκρασίας. Το επίπεδο του NO_x αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης, καθώς συνδέεται με τις διεργασίες θερμικής αντίδρασης που συμβαίνουν στη ζώνη πρωτογενούς καύσης. Ο σχηματισμός NO_x επηρεάζεται από παράγοντες, όπως η θερμοκρασία καύσης, ο χρόνος παραμονής και η σύνθεση του καυσίμου. Επομένως, με την παραδοχή σταθερών πολυτροπικών αποδόσεων της καύσης, ο δείκτης εκπομπής NO_x (EINO_x) μπορεί να συσχετιστεί με τη ροή του καυσίμου των αεροσκαφών (Sadkin, et al., 2022).

Ως συνέπεια της αναποτελεσματικότητας στη διαδικασία καύσης, σχηματίζονται προϊόντα όπως CO και HC . Σε αντίθεση με τα NO_x , αυτές οι εκπομπές είναι άμεσα προϊόντα ατελούς καύσης, που σημαίνει ότι οι συγκεντρώσεις τους είναι αντιστρόφως ανάλογες με την απόδοση της καύσης. Εφόσον η απόδοση καύσης συσχετίζεται με την ώθηση για στατικές συνθήκες στο επίπεδο της θάλασσας (SLS) και η ώθηση συσχετίζεται με τη ροή καυσίμου, αυτό σημαίνει ότι το EICO και το EIHC μειώνονται με την αύξηση της ροής καυσίμου (Tait, et al., 2022).

Οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων (PM) από τα αεροσκάφη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη μεταβλητότητά τους: μη πτητικά PM (nvPM) και πτητικά PM (vPM). Η κύρια πηγή nvPM που υπάρχει στα καυσαέρια των αεροσκαφών είναι η αιθάλη, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη επίδραση θέρμανσης από όλα τα σωματίδια που απελευθερώνονται από τα αεροσκάφη. Η αιθάλη παράγεται στις πλούσιες σε καύσιμα περιοχές του καυστήρα, όπου λαμβάνει χώρα η συμπύκνωση άκαυτων αρωματικών υδρογονανθράκων, μετατρέποντας μόρια καυσίμου HC χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, σε ανθρακούχα συσσωματώματα που περιέχουν εκατομμύρια άτομα άνθρακα. Επομένως, η έκταση του σχηματισμού αιθάλης εξαρτάται από την αναλογία καυσίμου-αέρα και τις διεργασίες ανάμιξης που

λαμβάνουν χώρα στον καυστήρα, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με το σχεδιασμό του καυστήρα και επηρεάζονται από τα μη ομοιογενή πεδία ροής και θερμοκρασίας (Sadkin, et al., 2022). Οι ακριβείς μετρήσεις αυτών των παραμέτρων είναι σπάνιες, γεγονός που καθιστά πολύ δύσκολη την άμεση απόκτηση ποσοτικών δεδομένων για τις εκπομπές αιθάλης. Αντίθετα, ο δείκτης εκπομπής (EI) αιθάλης μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τη συσχέτιση με τον λεγόμενο αριθμό καπνού που μετράται στις διαδικασίες πιστοποίησης κινητήρα.

Ο σχηματισμός νPM από αεροσκάφη προέρχεται σε μεγάλο βαθμό από την εκπομπή παραγώγων θείου, λιπαντικού λαδιού και VOCs. Κατά την καύση, η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο οξειδώνεται κυρίως σε διοξείδιο του θείου (SO_2), μέρος του οποίου στη συνέχεια οξειδώνεται περαιτέρω σε θειικό οξύ (H_2SO_4) όταν εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Παρουσία επαρκούς υδρατμού, μπορούν να δημιουργηθούν θειικά αερολύματα (SO_4^{2-}), τα οποία παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ψυκτική επίδραση από τις εκπομπές καυσαερίων των αεροσκαφών. Ο δείκτης εκπομπής (EI) του θειικού αεροζόλ είναι ένας παράγοντας της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο, ο οποίος ποικίλλει ανάλογα με τη σύνθεση του καυσίμου και τα ειδικά χαρακτηριστικά εκπομπών του κινητήρα (Lee, et al., 2021).

Λόγω της χαμηλής πτητικότητας του λιπαντικού, οι εκπεμπόμενοι ατμοί λαδιού από τα αεροσκάφη θα προστεθούν στη συμπυκνωμένη μάζα των πτητικών οργανικών ενώσεων και θα συμβάλουν στις συγκεντρώσεις νPM. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις που παράγονται είτε από τα οξειδωμένα θραύσματα καυσίμου είτε λόγω της πυρόλυσης στον θάλαμο καύσης μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως νPM, το οποίο μπορεί να έχει αρκετά χαμηλή τάση ατμών ώστε να επιτρέπει τη συμπύκνωση στην ατμόσφαιρα, σχηματίζοντας μια επίστρωση στην επιφάνεια του νPM και σχηματισμό νέφους, βροχόπτωση και αλλαγή στο κλίμα. Τα σωματίδια που εκπέμπονται κοντά στο επίπεδο ακροφυσίου εξόδου του καυστήρα αποτελούνται μόνο από νPM, αλλά τα νPM παράγονται μέσω συμπύκνωσης κατά την πορεία της εξόδου (Bickel, et al., 2020). Επομένως, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η συνολική ποσότητα νPM που παράγεται εντός του νέφους των καυσαερίων, καθώς ο σχηματισμός νPM εξαρτάται από τη συγκέντρωση των θειικών αλάτων και των πτητικών οργανικών ενώσεων που υπάρχουν στα καυσαέρια και την απόσταση από τον καυστήρα (Tait, et al., 2022).

Τα οξειδία του αζώτου (NO και NO_2) που απελευθερώνονται από τα αεροσκάφη δεν είναι ακτινοβολικά ενεργά και επομένως δεν προκαλούν άμεσο αντίκτυπο στο κλίμα στο σημείο εκπομπής. Η χημική τους αστάθεια σημαίνει ωστόσο ότι

παρουσιάζουν έναν αριθμό έμμεσων επιδράσεων, λόγω των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν μετά την αραίωση στην ατμόσφαιρα του περιβάλλοντος. Οι χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ NO_x και άλλων αερίων στην ατμόσφαιρα στα υψόμετρα πλεύσης των αεροσκαφών είναι εξαιρετικά μη γραμμικές και επομένως, η συνεισφορά καθαρού NO_x στον υπολογισμό του RF εξαρτάται από τη στιγμιαία ατμοσφαιρική κατάσταση (ώρα της ημέρας και του έτους, γεωγραφικό πλάτος, χημική σύνθεση υποβάθρου, μετεωρολογική κατάσταση) (Bickel, et al., 2020).

Οι εκπομπές NO_x στην τροπόσφαιρα οδηγούν αρχικά σε βραχυπρόθεσμη τοπική αύξηση της απόδοσης παραγωγής όζοντος (O₃) σε χρονική κλίμακα από εβδομάδες έως μήνες. Επιπλέον, τα αυξημένα επίπεδα NO_x και O₃ οδηγούν σε αυξημένη παραγωγή ριζών υδροξυλίου (OH[•]), η οποία με τη σειρά της οδηγεί στη μακροπρόθεσμη αποδιάταξη του μεθανίου του περιβάλλοντος (CH₄) στη χρονική κλίμακα των δεκαετιών. Η βραχυπρόθεσμη αύξηση του O₃ δημιουργεί ένα ισχυρό θετικό (θερμικό) ERF, ενώ η μακροπρόθεσμη εξάντληση του CH₄ προκαλεί ένα μικρότερο αρνητικό (ψυχρό) ERF (Lee, et al., 2021). Συγκριτικά ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα δευτερεύοντα αρνητικά (ψυχρά) ERF, λόγω συνεισφοράς δυνάμεων ακτινοβολίας που προκύπτουν από την εξάντληση του μεθανίου που πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη: η μείωση των υδρατμών της στρατόσφαιρας (15% της τιμής RF του CH₄) και η μείωση του μακροπρόθεσμου όζοντος στην τροπόσφαιρα (45% της τιμής RF του CH₄), που προκύπτει από μειωμένες συγκεντρώσεις του αερίου. Παρά τις μακροπρόθεσμες αρνητικές επιπτώσεις της ψύξης, η βραχυπρόθεσμη θέρμανση από το O₃ κυριαρχεί, οδηγώντας σε ένα θετικό καθαρό ERF (Tait, et al., 2022).

Μετά την αποβολή τους στην ελεύθερη ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της πτήσης, τα καυσαέρια του αεροσκάφους περιορίζονται σε ένα νέφος που υφίσταται μια σειρά δυναμικών καθεστώτων (πίδακας, δίνη, διασπορά και διάχυση), πριν αραιωθούν πλήρως στον περιβάλλοντα αέρα. Ο εγκλωβισμός των εκπομπών μέσα στο νέφος καυσαερίων σε αυτά τα δυναμικά καθεστώτα οδηγεί σε αρχικές συγκεντρώσεις ενώσεων που είναι αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλότερες από τα βασικά τους επίπεδα, προκαλώντας έναν αριθμό μη γραμμικών χημικών και μικροφυσικών επιδράσεων. Αυτές οι επιδράσεις έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ενδεχόμενη χημική σύνθεση της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας και οδηγούν στο σχηματισμό αερολυμάτων και κρυστάλλων πάγου στις εκροές του αεροσκάφους (Bickel, et al., 2020).

Όταν οι εκπομπές υδρατμών και PM απελευθερώνονται στο νέφος των καυσαερίων του αεροσκάφους στις ψυχρές και υγρές συνθήκες που επικρατούν στο

υπόμετρο πτήσης, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται γύρω από τα σωματίδια λόγω της υψηλής σχετικής υγρασίας και στη συνέχεια παγώνουν λόγω των χαμηλών εξωτερικών θερμοκρασιών, επιτρέποντας το σχηματισμό κρυστάλλων πάγου. Αυτή η συσσώρευση κρυστάλλων πάγου προκαλεί τη δημιουργία μιας διαδρομής συμπύκνωσης, γνωστής και ως ίχνος συμπύκνωσης (contrail). Η εξέλιξη των ιχνών συμπύκνωσης, δηλαδή το πώς μεγαλώνουν, διασκορπίζονται και επιμένουν με το χρόνο, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας, με χαμηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερες υγρασίες που γενικά οδηγούν σε πιο επίμονα και επιβλαβή ίχνη (Sadkin, et al., 2022).

Ο σχηματισμός και η διατήρηση των ιχνών αυτών μπορεί να εξηγηθεί καθαρά από τη θερμοδυναμική παραδοχή ότι, καθώς τα καυτά και υγρά καυσαέρια αναμιγνύονται με τον ψυχρότερο και ξηρότερο αέρα του περιβάλλοντος, θα σχηματιστεί ένα ίχνος εάν ο θύσανος καυσαερίων υπερβεί τον κορεσμό του νερού σε οποιοδήποτε σημείο και η θερμοκρασία είναι χαμηλή αρκετά για να σχηματίσει έναν πυρήνα πάγου. Ένα τέτοιο ίχνος θα παραμείνει στην ατμόσφαιρα εάν αναμιχθεί με αέρα που είναι υπερκορεσμένος σε σχέση με τον πάγο, που αναπτύσσεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της εναπόθεσης των γύρω υδρατμών σε υπάρχοντες κρυστάλλους πάγου. Τα μόνιμα ίχνη μπορεί μερικές φορές να μεταβούν σε ίχνη θυσάνων, είτε χτίζοντας πάνω σε υπάρχοντες θυσάνους είτε σχηματίζοντας νέους. Τα ίχνη συμπύκνωσης μπορούν να εξαπλωθούν σε τεράστιες περιοχές της ατμόσφαιρας, προκαλώντας σημαντικές ακτινοβολίες που επιδεινώνουν τον αντίκτυπό τους στο κλίμα (Tait, et al., 2022).

Η εξέλιξη των ιχνών, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται, διασκορπίζονται και επιμένουν με το χρόνο, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιβάλλουσας ατμόσφαιρας, με χαμηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερες υγρασίες που γενικά οδηγούν σε πιο επίμονα και επιβλαβή ίχνη. Η επιφανειακή κάλυψη και το οπτικό τους βάθος (αδιαφάνεια) είναι οι βασικοί λόγοι του αντίκτυπου που έχουν στο κλίμα. Η ικανότητα που έχουν να απορροφούν και να εκπέμπουν ξανά την υπέρυθη ακτινοβολία πίσω προς τη Γη, καθώς και η ικανότητά τους να ανακλούν την εισερχόμενη ακτινοβολία πίσω στο διάστημα λόγω της σκέδασης σε ορατά μήκη κύματος, είναι συνάρτηση του οπτικού βάθους και των σωματιδίων πάγου που περιέχουν. Τα ψηλά σύννεφα πάγου που σχηματίζονται συχνά θερμαίνουν το κλίμα, καθώς το λεπτό οπτικό τους βάθος σημαίνει μερική διαφάνεια στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η υψηλή πυκνότητα πάγου παγιδεύει

αποτελεσματικά την υπέρυθη ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα. Το RF των ιχνών συμπύκνωσης, εμφανίζει επίσης μια ξεχωριστή ημερήσια τάση: τη νύχτα, τα ίχνη προκαλούν πάντα ένα φαινόμενο θέρμανσης, καθώς δεν υπάρχει σκέδαση για να εξουδετερώσει την απορρόφηση της ακτινοβολίας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας αντίθετα, εμφανίζουν μειωμένο καθαρό φαινόμενο θέρμανσης και ίσως ακόμη και καθαρό φαινόμενο ψύξης, ανάλογα με την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακατευθύνεται πίσω στο διάστημα (Bickel, et al., 2020).

2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν έμμεσα την κλιματική αλλαγή

Οι παράγοντες που αναφέρθηκαν ως τώρα εστιάζουν στις δυνάμεις πτήσης και τη δημιουργία και τη διασπορά των εκπομπών των αεροσκαφών, από την οπτική γωνία ενός μεμονωμένου αεροσκάφους. Ωστόσο, η κατάσταση της ατμόσφαιρας είναι ανομοιογενής ως προς το χώρο και το χρόνο, πράγμα που σημαίνει ότι η ευαισθησία του κλίματος στις εκπομπές των αεροσκαφών διαφέρει σημαντικά, ανάλογα με τον χρόνο και τον τόπο έκλυσης τους. Επιπλέον, σε περιοχές του εναέριου χώρου όπου η πυκνότητα κυκλοφορίας είναι υψηλή, τα αεροσκάφη πετούν σε κοντινή απόσταση, πράγμα που σημαίνει ότι οι θύσανοι των καυσαερίων τους μπορεί να τέμνονται και να συγχωνεύονται. Αυτή η υπέρθεση των θυσάνων επιτρέπει τη συσσώρευση των συγκεντρώσεων των εκπομπών που περιέχονται σε αυτά, τονίζοντας μη γραμμικά φαινόμενα κλίμακας θυσάνου που πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση του κλίματος των αερομεταφορών (Gossling & Humpe, 2020).

Η δημιουργία τέτοιων φαινομένων ευνοείται από παράγοντες που δεν έχουν σχέση με την καύση των καυσίμων και τις χημικές συνέπειές της. Ένας τέτοιος παράγοντας είναι η ρύθμιση της κίνησης των αεροσκαφών στον χώρο και στον χρόνο. Η διαχείριση εναέριας κυκλοφορίας (ATM) είναι το σύστημα υπηρεσιών που είναι υπεύθυνες για την επίβλεψη της εφαρμογής ασφαλών, εύρυθμων και αποτελεσματικών ροών εναέριας κυκλοφορίας σε όλο το δίκτυο, παρέχοντας βοήθεια σε αεροσκάφη που διέρχονται από το αεροδρόμιο αναχώρησης προς το αεροδρόμιο προορισμού. Είναι ο ρόλος της ομάδας ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (ATC) να διαχειρίζεται και να παρακολουθεί την εναέρια κυκλοφορία στον αντίστοιχο εναέριο χώρο της σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι διατηρείται ανά πάσα στιγμή η βέλτιστη ασφάλεια, τάξη και αποτελεσματικότητα των πτητικών λειτουργιών του αεροσκάφους (IATA, 2023). Το σύστημα αυτό καλείται να ρυθμίσει όλες τις

παραμέτρους που αφορούν την ασφάλεια, την ακρίβεια και την πορεία των πτήσεων των αεροσκαφών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ο εγγενής κίνδυνος που ενέχει η μεταφορά τεράστιου αριθμού επιβατών με σχεδόν υπερηχητικές ταχύτητες μέσω της ανώτερης ατμόσφαιρας σημαίνει ότι η ασφάλεια των αερομεταφορών είναι υψίστης σημασίας. Μια ασφαλής λειτουργία αεροσκάφους ακολουθεί την οδό του λιγότερου κινδύνου, κυρίως επηρεασμένη από την ανάγκη αποφυγής δυσμενών ατμοσφαιρικών συνθηκών και αποφυγής συγκρούσεων με άλλα αεροσκάφη. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά την πτήση που είναι επιρρεπείς σε πάγο, αναταράξεις ή παρουσία επικίνδυνων καιρικών συνθηκών μπορούν όλες να ταξινομηθούν ως δυσμενείς για τα αεροσκάφη. Ο αυξημένος κίνδυνος που προκύπτει από την πτήση μέσω περιοχών που επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες σημαίνει ότι το αεροσκάφος πρέπει να επαναδρομολογήσει, οδηγώντας σε περιορισμούς στον διαθέσιμο εναέριο χώρο και σε αποκλίσεις από το βέλτιστο προφίλ πτήσης. Κατά συνέπεια, αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους πτήσης, καύση καυσίμου και καθυστερήσεις για αεροσκάφη που υπόκεινται σε τέτοιες συνθήκες (Dray, et al., 2022).

Για να διατηρούνται οργανωμένες οι ροές εναέριας κυκλοφορίας εντός ελεγχόμενου εναέριου χώρου, τα αεροσκάφη καθοδηγούνται να ακολουθούν το παραδοσιακό δίκτυο εναέριας κυκλοφορίας σταθερής διαδρομής, κατασκευασμένο από τέσσερα βασικά στοιχεία εναέριου χώρου που διευκολύνουν τη διαδικασία διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας (Tait, et al., 2022):

- Τα αεροδρόμια: μια περιοχή ξηράς ή νερού που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για την άφιξη, την αναχώρηση και την επιφανειακή κίνηση αεροσκαφών.
- Τα σημεία της διαδρομής: μια καθορισμένη γεωγραφική τοποθεσία που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της διαδρομής πτήσης ενός αεροσκάφους, αντιπροσωπεύοντας είτε ένα βοήθημα πλοήγησης είτε μια συντεταγμένη αναφοράς από την οποία το αεροσκάφος πρέπει να πετάξει πάνω της.
- Οι αεροδιάδρομοι: ένα ελεγχόμενο τμήμα του εναέριου χώρου που δημιουργείται με τη μορφή ενός διαδρόμου (συνήθως πλάτους 8–10 NM) μεταξύ δύο σημείων της διαδρομής.
- Ο Τομέας: μια περιοχή του εναέριου χώρου που διαχειρίζεται μια ενιαία ομάδα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (ATC), η οποία είναι διαστρωματωμένη σε διάφορα επίπεδα για να ρυθμίζει μια μεγάλη ποικιλία κίνησης.

Στο δίκτυο αυτό, τα αεροδρόμια αντιπροσωπεύουν τις πηγές και τις καταλήξεις της ροής, οι αεροδιάδρομοι είναι τα τόξα κατά μήκος των οποίων ταξιδεύει η ροή, τα σημεία διαδρομής είναι οι κόμβοι δικτύου στους οποίους οι αεραγωγοί τέμνονται, συγχωνεύονται ή αποκλίνουν και οι τομείς είναι μια συλλογή από σημεία και συνεχόμενα τμήματα αεραγωγών. Το δίκτυο σταθερής διαδρομής περιορίζει ακόμη περισσότερο τη διαθεσιμότητα του εναέριου χώρου, λόγω της διακριτικής ικανότητας των επιπέδων πτήσης και της απαίτησης διέλευσης συγκεκριμένων σημείων διαδρομής (Leamon, et al., 2019). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ιδιαίτερα υψηλές συχνότητες αεροσκαφών που διέρχονται από εναέριο χώρο υψηλής πυκνότητας, οδηγώντας ενδεχομένως σε συμφόρηση κατά μήκος πολυσύχναστων αεραγωγών και σημείων διαδρομής όπου τέμνονται οι αεραγωγοί, με αποτέλεσμα ανομοιογένειες στην κατανομή της εναέριας κυκλοφορίας και πιθανή συμφόρηση κατά μήκος αεραγωγών υψηλής πυκνότητας.

Ένα άλλο στοιχείο της αποτελεσματικής διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας είναι η βελτιστοποίηση των τροχιών πτήσης, με την επιφύλαξη της ιεράρχησης της ασφάλειας και της συμμόρφωσης με τη δομή του εναέριου χώρου σταθερής διαδρομής. Η βελτιστοποίηση της τροχιάς πτήσης είναι ένα ουσιαστικό βήμα για τη διασφάλιση της μέγιστης χρήσης και αποτελεσματικότητας του εναέριου χώρου, έτσι ώστε τα έσοδα να μεγιστοποιούνται και τα επίπεδα ζήτησης να καλύπτονται επαρκώς (Sacchi, et al., 2023). Η βελτιστοποίηση τροχιάς είναι ένα πολύπλευρο πρόβλημα, που απαιτεί σωστό υπολογισμό του φορτίου καυσίμου αναχώρησης, του εφεδρικού φορτίου καυσίμου και αλλαγές στη διαχείριση εναέριας κυκλοφορίας (ATM) που περιορίζουν τις λειτουργίες και τη δρομολόγηση του αεροσκάφους. Αυτό απαιτεί τη διεξαγωγή εξαντλητικής αξιολόγησης στο στάδιο του σχεδιασμού πτήσης, για τη δοκιμή όλων των πιθανών συνδυασμών διαδρομής, ωφέλιμου φορτίου, φορτίου καυσίμου και επιχειρησιακής προσέγγισης, που περιλαμβάνει δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιάδες υπολογισμούς ανά πτήση (Tait, et al., 2022).

Στη συνέχεια, τα βέλτιστα σενάρια ταξινομούνται κατά σειρά, με την τελική διαδρομή να επιλέγεται με βάση τις προτιμήσεις του χειριστή ή/και την εμφάνιση απροσδόκητων συνθηκών, όπως ξαφνικές δυσμενείς καιρικές συνθήκες ή συγκρούσεις αεροσκαφών. Σε μια ιδανική κατάσταση εναέριου χώρου όπου η ατμόσφαιρα είναι ήρεμη και σταθερή τα αεροσκάφη δεν περιορίζονται σε μια σταθερή διαδρομή και δεν υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης με άλλα αεροσκάφη, η λειτουργία αεροσκάφους με ελάχιστο χρόνο και ενέργεια θα ήταν να πετάξει πάνω στο τόξο του

μεγάλου κύκλου μεταξύ αναχώρησης και προορισμού. Το κατακόρυφο προφίλ του αεροσκάφους θα συνίστατο σε μια συνεχή ανάβαση στο πιο αποτελεσματικό ύψος πορείας, στη συνέχεια σε πλεύση με σταθερή ταχύτητα, με δυνατότητα συνεχούς αναρρίχησης καθώς το αεροσκάφος καίει καύσιμο και χάνει μάζα. Σε πραγματικές όμως συνθήκες, η βέλτιστη διαδρομή μπορεί να αποκλίνει σημαντικά από το τόξο του μεγάλου κύκλου. Συνήθως, τηρεί τη δομή του εναέριου χώρου σταθερής διαδρομής, την οποία βελτιστοποιεί σε σχέση με τον άνεμο και τη θερμοκρασία. Το μέγεθος και η κατεύθυνση του ανέμου και η τοπική διακύμανση της θερμοκρασίας που βιώνει το αεροσκάφος κατά τη διάρκεια της πτήσης, μπορεί να έχει δραστικό αντίκτυπο στη βέλτιστη διαδρομή, με τους οπίσθιους ανέμους και τις ψυχρότερες θερμοκρασιακές περιοχές να είναι ευνοϊκές (Bergero, et al., 2023). Επιπλέον, το κατακόρυφο προφίλ πτήσης του αεροσκάφους πρέπει να συμμορφώνεται με τις κατανομές επιπέδου πτήσης, πράγμα που σημαίνει ότι οι αναβάσεις πρέπει να εκτελούνται καθώς καίγεται καύσιμο, συμπυκνώνοντας περαιτέρω την εναέρια κυκλοφορία και τις αντίστοιχες εκπομπές της σε στενές ζώνες υψομέτρου (Tait, et al., 2022).

Η αποτελεσματική διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας βασίζεται στην ανθρώπινη γνώση των ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας για τη λήψη δύσκολων αποφάσεων και την εκτέλεση σύνθετων εργασιών σε ένα δυναμικό περιβάλλον κρίσιμο για τον χρόνο. Αυτό περιλαμβάνει τη διατήρηση της τάξης πετώντας κατά μήκος του δικτύου εναέριου χώρου σταθερής διαδρομής και τη βελτιστοποίηση των ροών εναέριας κυκλοφορίας σε σχέση με τον άνεμο και τον καιρό. Καθώς τα επίπεδα πυκνότητας και πολυπλοκότητας της εναέριας κυκλοφορίας αυξάνονται, αυξάνεται και ο νοητικός φόρτος εργασίας του ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας, έως ότου επιτευχθεί ένα όριο όπου ο ελεγκτής δεν μπορεί πλέον να χειριστεί με ασφάλεια την κατάσταση. Ο μέγιστος αριθμός αεροσκαφών που επιτρέπεται από την ομάδα ATC που είναι υπεύθυνη για έναν συγκεκριμένο όγκο εναέριου χώρου είναι γνωστός ως χωρητικότητα εναέριου χώρου και καθορίζεται από την κατάσταση του εναέριου χώρου, την κατάσταση του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται και την ψυχική κατάσταση του ελεγκτή. Η χωρητικότητα του εναέριου χώρου περιορίζεται περισσότερο από τον φόρτο εργασίας του ελεγκτή παρά από τους νόμους διαχωρισμού, που σημαίνει ότι η ανθρώπινη γνώση είναι ο πραγματικός περιοριστικός παράγοντας στον αριθμό των αεροσκαφών που μπορούν να καταλάβουν έναν συγκεκριμένο όγκο εναέριου χώρου σε μια συγκεκριμένη στιγμή (Gossling & Humpe, 2020).

3. Η ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑ

Η αύξηση του αριθμού των καταστροφών που προκαλούνται από την υπερθέρμανση του πλανήτη ώθησε τη Σύμβαση Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) να θεσπίσει το Πρωτόκολλο του Κιότο, την πρώτη διεθνή συνθήκη για τη μείωση των υπερβολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, για τον μετριασμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Το Πρωτόκολλο του Κιότο είναι μια διεθνής συνθήκη για την κλιματική αλλαγή που στοχεύει στην καταπολέμηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Για την αποτροπή επιβλαβών αλλαγών από την υπερθέρμανση του πλανήτη που καταλύεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, το Πρωτόκολλο του Κιότο υπογράφηκε το 1997 και τέθηκε σε ισχύ το 2005. Επικεντρώνεται στη μείωση έξι αερίων θερμοκηπίου: διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, οξείδιο του αζώτου, υπερφθοράνθρακες, υδροφθοράνθρακες και εξαχλωριούχο θείο (Wang, et al., 2019).

Το πρωτόκολλο είχε περιορισμένη επιτυχία, λόγω μειωμένης συμμετοχής των χωρών που παρήγαγαν μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου. Έτσι, μόνο λίγες χώρες κατόρθωσαν να πετύχουν μειώσεις των εκπομπών σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, ενώ σε παγκόσμιο επίπεδο, οι εκπομπές CO₂ συνέχισαν να αυξάνονται. Από το 2005 που εφαρμόστηκε έως το 2009, οι διαπραγματεύσεις επικεντρώθηκαν στην επέκταση της δομής του. Μεταξύ 2009 και 2012, η έμφαση μετατοπίστηκε στην αποκατάσταση της εμπιστοσύνης στις διαπραγματεύσεις για το κλίμα υπό την ηγεσία του ΟΗΕ μετά την αποτυχία επίτευξης μακροπρόθεσμης συμφωνίας για το κλίμα στην Κοπεγχάγη (Falkner, 2019).

Αυτή η πορεία οδήγησε στη Συμφωνία του Παρισιού, την πιο σημαντική διεθνή συμφωνία για το κλίμα, που εγκρίθηκε το 2015 βάσει της Σύμβασης Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC), με στόχο την ενσωμάτωση δράσεων για το κλίμα στα εθνικά κοινωνικοοικονομικά σχέδια των χωρών. Η Συμφωνία του Παρισιού στοχεύει να περιορίσει την υπερθέρμανση του πλανήτη πολύ κάτω από τους 2 βαθμούς Κελσίου σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα και να συνεχίσει τις προσπάθειες για περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στους 1,5 βαθμούς Κελσίου. Απαιτούσε επίσης από τις χώρες να μεταβούν σε οικονομίες πλήρως απαλλαγμένες από τον άνθρακα μέχρι τα μέσα του αιώνα, δηλαδή το 2050 (Schmalenbach, 2022). Έτσι, για πρώτη φορά γίνεται αποδεκτή η αναγκαιότητα της

μηδενικής εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου και εισάγεται ο όρος κλιματική ουδετερότητα. Η βιομηχανία των αερομεταφορών αναγνωρίστηκε ως μια από τις πιο ενεργοβόρες μορφές κατανάλωσης που χαρακτηρίζεται από έντονη ανάπτυξη και κατά συνέπεια συμμετέχει στην κλιματική κρίση σε μεγάλο βαθμό. Ο αντίκτυπος των αεροπορικών εκπομπών στην κλιματική αλλαγή είναι ιδιαίτερα ανησυχητικός, επειδή οι αέριοι ρύποι, απελευθερώνονται σε μεγάλα υψόμετρα, όπου έχουν μεγαλύτερη επίδραση θέρμανσης από τις εκπομπές που απελευθερώνονται στο επίπεδο του εδάφους. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε ότι οι αερομεταφορές θα πρέπει να ισοσταθμίσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ώστε ως το 2050 να λειτουργούν χωρίς επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή (Larsson, et al., 2019).

Τόσο το Πρωτόκολλο του Κιότο, όσο και η Συμφωνία του Παρισιού, βασίστηκαν στην αρχή των «κοινών αλλά διαφοροποιημένων ευθυνών», που σήμαινε ότι οι ανεπτυγμένες χώρες, οι οποίες ήταν υπεύθυνες για τις περισσότερες από τις ιστορικές εκπομπές, είχαν μεγαλύτερη ευθύνη να μειώσουν τις εκπομπές τους. Η βάση για τον καθορισμό των δεσμεύσεων αυτών των χωρών ήταν οι κατά κεφαλήν εκπομπές, οι οποίες υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο για μια χρονική περίοδο. Οι κατά κεφαλήν εκπομπές χρησιμοποιήθηκαν ως βάση επειδή πιστεύεται ότι οι χώρες με υψηλότερες κατά κεφαλήν εκπομπές είχαν μεγαλύτερη ευθύνη να μειώσουν τις εκπομπές τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είχαν υψηλότερο βιοτικό επίπεδο και ως εκ τούτου κατανάλωναν περισσότερη ενέργεια και πόρους (Gossling & Humpre, 2020).

Στη συμφωνία του Παρισιού επιπλέον, για να ικανοποιηθεί ο στόχος του περιορισμού της υπερθέρμανσης του πλανήτη κάτω από τους 2 βαθμούς Κελσίου πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα, διατυπώθηκε η ανάγκη για «δίκαιες και φιλόδοξες» συνεισφορές από όλες τις χώρες, με τις ανεπτυγμένες χώρες να ηγούνται στη μείωση των εκπομπών και στην παροχή οικονομικής και τεχνολογικής υποστήριξης στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η χρήση των κατά κεφαλήν εκπομπών ως βάση για τον προσδιορισμό της συμβολής των χωρών στη μείωση των εκπομπών θεωρήθηκε ως μια δίκαιη και δίκαιη προσέγγιση, καθώς έλαβε υπόψη την ιστορική ευθύνη των ανεπτυγμένων χωρών για τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και την ανάγκη των αναπτυσσόμενων χωρών να επιδιώξουν οικονομική ανάπτυξη μειώνοντας παράλληλα τις εκπομπές τους (Falkner, 2019).

Ωστόσο, η διεθνής αεροπορία και η ναυτιλία εξαιρέθηκαν από τις εθνικές συνεισφορές βάσει του πρωτοκόλλου του Κιότο. Η εξαίρεση αυτή οφειλόταν στον διασυνοριακό και υπερθαλάσσιο χαρακτήρα αυτών των τομέων, γεγονός που

δυσχεραίνει την ανάθεση της ευθύνης για τις εκπομπές σε μεμονωμένες χώρες. Αντ' αυτού, η ευθύνη για τον περιορισμό ή τη μείωση των εκπομπών από τη διεθνή αεροπορία και τη ναυτιλία ανατέθηκε στον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) και στον Παγκόσμιο Ναυτιλιακό Οργανισμό (WMO) αντίστοιχα. Αυτή η κατανομή αρμοδιοτήτων διατηρήθηκε βάσει της Συμφωνίας του Παρισιού, σύμφωνα με την οποία, η εγχώρια αεροπορία εμπίπτει στους εθνικούς στόχους μετριασμού, ενώ η διεθνής αεροπορία αντιμετωπίζεται από τον ICAO. Αυτό σημαίνει ότι οι χώρες είναι υπεύθυνες για τη μείωση των εκπομπών από την εγχώρια αεροπορία, αλλά ο ICAO είναι υπεύθυνος για τη μείωση των εκπομπών από τη διεθνή αεροπορία (ICAO, 2022).

Οι συμφωνίες αυτές όμως έχουν μια σημαντική παράλειψη, καθώς εστιάζουν μόνο σε μακρόβια αέρια θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα και αγνοούν τις βραχύβιες εκπομπές από παράγοντες διαφορετικούς από το CO₂, όπως τα οξειδία του αζώτου, τους υδρατμούς και τα ίχνη συμπύκνωσης (Grewe, et al., 2021). Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι εκπομπές NO_x από την αεροπορία μπορούν να οδηγήσουν στο σχηματισμό όζοντος, το οποίο είναι ένα ισχυρό αέριο θερμοκηπίου και μπορεί να συμβάλει στην ακτινοβολία. Τα ίχνη συμπύκνωσης, τα οποία είναι τα ορατά μονοπάτια που αφήνονται πίσω από τα αεροσκάφη, μπορούν επίσης να συμβάλουν στην ακτινοβολία παγιδεύοντας θερμότητα στην ατμόσφαιρα. Τα σύννεφα που σχηματίζονται από τις εκπομπές υδρατμών της αεροπορίας μπορούν επίσης να συμβάλουν στην ακτινοβολία αντανάκλωντας το ηλιακό φως πίσω στο διάστημα ή παγιδεύοντας θερμότητα στην ατμόσφαιρα.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι οι εκπομπές αυτές (εκτός του CO₂) διαφέρουν από τα μακρόβια αέρια θερμοκηπίου (GHG) όπως το διοξείδιο του άνθρακα, αλλά εξακολουθούν να έχουν αντίκτυπο στο περιβάλλον (Bickel, et al., 2020; Larsson, et al., 2019; Lee, et al., 2021; Tait, et al., 2022). Οι Lee *et al.* (2021) αναφέρουν επίσης ότι η αύξηση της θερμοκρασίας από αυτούς τους παράγοντες θα εξακολουθήσει να είναι σημαντική στο βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο μέλλον, υποδεικνύοντας ότι πρόκειται για ένα συνεχιζόμενο ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Σύμφωνα με τους ερευνητές είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, ενώ η μείωση των εκπομπών CO₂ είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, η αντιμετώπιση των εκπομπών εκτός CO₂ είναι επίσης απαραίτητη για την αποτελεσματική καταπολέμηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Ίσως λόγω αυτών των παραλείψεων, η επίτευξη των στόχων που τέθηκαν στην Συμφωνία του Παρισιού φάνηκε γρήγορα ότι δεν ήταν μια εύκολη υπόθεση, όπως και

η επίτευξη μηδενικών καθαρών εκπομπών στον τομέα των αερομεταφορών, που είναι δύσκολο να επιτευχθεί παρότι έχει μεγάλη σημασία για μια σειρά από λόγους: Αφ' ενός η αεροπορική βιομηχανία συμβάλλει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 2,5% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, αφ' ετέρου, ο κλάδος των αερομεταφορών αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται τα επόμενα χρόνια, πράγμα που σημαίνει ότι οι εκπομπές του θα συνεχίσουν να αυξάνονται εκτός εάν ληφθούν πιο ουσιαστικά μέτρα. Επιπλέον, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, όπως η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και τα συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα, αναμένεται να έχουν σημαντικό οικονομικό και κοινωνικό κόστος (Hasan, et al., 2021). Αυτό οδήγησε τη διεθνή κοινότητα, την Ευρωπαϊκή Κοινότητα και κάθε κράτος ξεχωριστά στην λήψη επιπρόσθετων πολιτικών αποφάσεων για να μετριάσουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

3.1 Πολιτικές για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στις αερομεταφορές

Ο τομέας των αερομεταφορών αντιμετωπίζει προκλήσεις όσον αφορά την επίτευξη μετριασμού της κλιματικής αλλαγής λόγω τεχνολογικών και νομικών εμποδίων, με αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου τη τελευταία δεκαετία. Μετά από τη Συμφωνία του Παρισιού, μπορούν να διακριθούν δύο άξονες πολιτικής για τον μετριασμό του κλίματος στον τομέα των αερομεταφορών (Mayer & Ding, 2023):

- Διεθνείς πρωτοβουλίες του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO ο οποίος εξελίχθηκε σε εξειδικευμένη υπηρεσία του ΟΗΕ) για τον περιορισμό των εκπομπών από τη διεθνή πολιτική αεροπορία μέσω τεχνικών προτύπων και μηχανισμού βασισμένου στην αγορά.
- Εθνικές πρωτοβουλίες που υιοθετούνται από τα κράτη για τη ρύθμιση των εκπομπών τόσο από την εγχώρια όσο και από τη διεθνή αεροπορία, που κυμαίνονται από φορολογικά και τεχνικά πρότυπα έως τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την ανάπτυξη υποδομών.

Οι δύο αυτοί άξονες φαίνονται να λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, επειδή ο ICAO απευθύνεται στη διεθνή πολιτική αεροπορία, ενώ κάθε κράτος θα επιδιώξει να αντιμετωπίσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου εντός της επικράτειάς του, δηλαδή τις εκπομπές από την εγχώρια αεροπορία. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, οι συνθήκες και οι συμφωνίες για το κλίμα έχουν ενθαρρύνει τα κράτη να αναλάβουν δράση για τη

μείωση των εκπομπών από όλες τις πηγές, συμπεριλαμβανομένης της αεροπορίας, ανεξάρτητα από το αν είναι εγχώριες ή διεθνείς. Τα μέτρα αυτά μπορεί να κυμαίνονται από φόρους και τεχνικά πρότυπα έως διαχείριση της κυκλοφορίας και ανάπτυξη υποδομών. Οι εντάσεις και η συμπληρωματικότητα μεταξύ των δύο αυτών αξόνων πρωτοβουλιών, μπορούν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα των προσπαθειών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής στον τομέα των αερομεταφορών. Για παράδειγμα, εάν τα μέτρα που λαμβάνουν τα κράτη για τη ρύθμιση της εσωτερικής αεροπορίας δεν ευθυγραμμίζονται με τα πρότυπα του ICAO για τη διεθνή αεροπορία, τότε θα μπορούσαν να παρατηρηθούν ασυνέπειες και αναποτελεσματικότητα στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Mayer & Ding, 2023).

3.1.1. Διεθνείς πολιτικές για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας

Οι διεθνείς κλιματικές πολιτικές των αερομεταφορών αναπτύχθηκαν ως απάντηση στην αυξανόμενη ανησυχία για τη συμβολή του κλάδου στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στην κλιματική αλλαγή. Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) διαδραμάτισε κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση αυτών των πολιτικών. Μία από τις βασικές πρωτοβουλίες είναι το Σχέδιο Αντιστάθμισης και Μείωσης Άνθρακα για τη Διεθνή Αεροπορία (CORSIA), το οποίο ιδρύθηκε από τον ICAO το 2016. Το CORSIA στοχεύει στην αντιστάθμιση των εκπομπών άνθρακα από τις αεροπορικές εταιρίες, επενδύοντας σε έργα που μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα σε άλλο κλάδο, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή η αναδάσωση. Ωστόσο, τέτοιες πιστώσεις αντιμετωπίζουν ολοένα και περισσότερο ζητήματα μονιμότητας και προσθετικότητας, που καθιστούν ζωτικής σημασίας τον αξιόπιστο μετριασμό μέσω της αλλαγής καυσίμου και των λειτουργικών αλλαγών (Bergero, et al., 2023).

Σύμφωνα με το σύστημα, οι αεροπορικές εταιρείες υποχρεούνται να αντισταθμίσουν την αύξηση των εκπομπών τους μετά το 2020 αγοράζοντας πιστώσεις από έργα μετριασμού εκπομπών εκτός του τομέα των αερομεταφορών. Αυτό σημαίνει ότι εάν οι εκπομπές μιας αεροπορικής εταιρείας αυξηθούν μετά το 2020, πρέπει να επενδύσουν σε έργα που μειώνουν τις εκπομπές σε άλλους τομείς, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή η αναδάσωση, για να αντισταθμίσουν τις δικές τους εκπομπές. Το πρόγραμμα είναι εθελοντικό μεταξύ 2020 και 2027, αλλά μετά από αυτό, καθίσταται υποχρεωτικό για όλες τις χώρες. Στόχος της CORSIA είναι να σταθεροποιήσει τις εκπομπές άνθρακα της αεροπορικής βιομηχανίας στα επίπεδα του 2020, παρά την αναμενόμενη αύξηση των αεροπορικών ταξιδιών (Mayer & Ding, 2023). Το σύστημα αναμένεται να καλύψει περίπου το 80% των διεθνών αεροπορικών

εκπομπών, αλλά δεν αντιμετωπίζει εκπομπές εκτός CO₂, όπως οξείδια του αζώτου και υδρατμούς, που συμβάλλουν επίσης στην κλιματική αλλαγή. Οι επικριτές υποστηρίζουν ότι το σχέδιο δεν είναι αρκετά φιλόδοξο για να επιτύχει τους στόχους της Συμφωνίας του Παρισιού, καθώς στοχεύει μόνο στη σταθεροποίηση των εκπομπών και όχι στη μείωσή τους. Ωστόσο, οι υποστηρικτές υποστηρίζουν ότι το CORSIA είναι ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός για την αεροπορική βιομηχανία, η οποία έχει εξαιρεθεί σε μεγάλο βαθμό από τους κλιματικούς κανονισμούς μέχρι τώρα. (Larsson, et al., 2019).

Οι αδυναμίες του CORSIA έχουν αναγνωριστεί από διάφορους ερευνητές στη βιβλιογραφία (Bergero, et al., 2023; Cui, et al., 2022; Gössling & Lyled, 2021; Qiu, et al., 2021). Η εστίαση της CORSIA στην «ανάπτυξη ουδέτερη για τον άνθρακα» σημαίνει ότι μόνο η ποσότητα των εκπομπών που υπερβαίνει τη μέση ετήσια βασική τιμή CO₂ θα αντιμετωπιστεί από το σύστημα (ICAO, 2016). Ετησίως, αυτό θα αφήσει εκτός ρύθμισης πάνω από τη μισή ποσότητα CO₂ που παράγονται από τις διεθνείς εμπορικές αεροπορικές μεταφορές (Gössling & Lyled, 2021). Οι επιπτώσεις στη θέρμανση του πλανήτη από αέριους ρύπους διαφορετικούς από το CO₂ είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής της CORSIA (Cui, et al., 2022). Το πρόγραμμα έχει σχεδιαστεί για να ξεκινήσει μια πιλοτική (εθελοντική, μη υποχρεωτική) φάση το 2021 και στη συνέχεια να προχωρήσει σε μια πρώτη φάση υλοποίησης (και πάλι εθελοντική) μεταξύ 2024 και 2027 που περιλαμβάνει ένα «μερίδιο» αεροπορικών εταιρειών, που θα τεθεί σε πλήρη λειτουργία από το 2027 (Qiu, et al., 2021).

Σύμφωνα με τους Gössling & Lyled (2021), αναφέρουν ότι τον Ιούνιο του 2020, το Συμβούλιο του ICAO, στο πλαίσιο της κρίσης του COVID-19 και βάσει της πλειοψηφίας και όχι της προηγούμενης σκληρής συναίνεσης για όλες τις δράσεις του Σχεδίου, αποδυνάμωσε περαιτέρω το CORSIA συμφωνώντας να τροποποιήσει τη όριο του βασικού υπολογισμού στις εκπομπές του 2019 (αλλάζοντας τον αρχικά προβλεπόμενο μέσο όρο του 2019/2020). Οι ερευνητές εκτιμούν ότι το σύστημα δεν θα έχει κανένα σημαντικό αποτέλεσμα για πολλά χρόνια ακόμη και δεν μειώνει αξιόπιστα τις εκπομπές. Δεδομένου ότι η μελλοντική ικανότητα του CORSIA να αντιμετωπίσει τις εκπομπές είναι αβέβαιη, είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι παρότι το σύστημα βασίζεται σε Ψηφίσματα της Συνέλευσης του ICAO και εφαρμόζεται μέσω των προτύπων και των συνιστομένων πρακτικών του, το σύστημα δεν είναι δεσμευτικό σύμφωνα με το διεθνές δίκαιο. Έτσι, δημιουργείται η ανησυχία ότι η εστίαση του CORSIA στην αντιστάθμιση των εκπομπών μπορεί να μην είναι αρκετή για τον

αποτελεσματικό μετριασμό των επιπτώσεων των εκπομπών των αεροπορικών μεταφορών στο περιβάλλον. Στο σχέδιο υπάρχει η φιλοδοξία να προσδιοριστούν έργα ανταποδοτικά ως προς τις τιμές για την ελαχιστοποίηση του πρόσθετου κόστους που επιβάλλεται στις αεροπορικές εταιρείες. Αυτό σημαίνει ότι η εστίαση είναι στην εξεύρεση αντισταθμιστικών έργων που είναι οικονομικά αποδοτικά για τις αεροπορικές εταιρείες. Οι συστάσεις του ICAO δείχνουν ότι δίνεται έμφαση στη δάσωση και την αναδάσωση, τα οποία είναι σχετικά χαμηλού κόστους σε σύγκριση με άλλες επιλογές. Η ανησυχία είναι ότι αυτή η εστίαση στη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας μπορεί να μην είναι αρκετή για την αποτελεσματική μείωση των εκπομπών των αεροπορικών μεταφορών μακροπρόθεσμα. Αντ' αυτού, ενδέχεται να χρειαστούν πιο ολοκληρωμένες πολιτικές για την αντιμετώπιση των βαθύτερων αιτίων των αεροπορικών εκπομπών, όπως για παράδειγμα η μετάβαση σε βιώσιμα καύσιμα (Gössling & Lyled, 2021).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει επίσης αναπτύξει πολιτικές για την κλιματική ουδετερότητα, τόσο συμπεριλαμβάνοντας τις αερομεταφορές στο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της (EU ETS), το οποίο επιβάλλει μια τιμή άνθρακα στις εκπομπές πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο βάσης, όσο και τη διαμόρφωση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (EGD), που αποτελεί το περίγραμμα της πολιτικής που πρέπει να εφαρμοστεί για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας στην Ευρώπη (Dray & Schäfer, 2021). Το EU ETS ξεκίνησε το 2005 ως μηχανισμός βασισμένος στην αγορά για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης και της αεροπορίας. Ο κύριος στόχος του είναι η επίτευξη συνολικών μειώσεων εκπομπών με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, χρησιμοποιώντας εμπορεύσιμα δικαιώματα εκπομπών ως μηχανισμό για τον προσανατολισμό των μειώσεων εκπομπών σε τομείς και επιχειρήσεις όπου μπορούν να εφαρμοστούν με το χαμηλότερο κόστος (Cifuentes-Faura, 2022).

Στο πλαίσιο του συστήματος αυτού, ορίζεται ανώτατο όριο στη συνολική ποσότητα εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που μπορούν να εκπέμπονται από καλυπτόμενους τομείς, και αυτό το ανώτατο όριο μειώνεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου για την επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών της ΕΕ. Σε κάθε καλυπτόμενη οντότητα εκχωρείται ορισμένος αριθμός δικαιωμάτων εκπομπών, τα οποία αντιπροσωπεύουν το τη μέγιστη ποσότητα αερίων θερμοκηπίου που έχει δικαίωμα να εκπέμψει. Τα δικαιώματα αυτά μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο διαπραγμάτευσης μεταξύ φορέων, επιτρέποντας σε όσους μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές με χαμηλότερο κόστος να πωλούν τα πλεονάζοντα δικαιώματά τους σε

εκείνους που αντιμετωπίζουν υψηλότερο κόστος μείωσης των εκπομπών (Larsson, et al., 2019). Το EU ETS καλύπτει διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της βιομηχανίας και της αεροπορίας. Στον τομέα των αερομεταφορών, το σύστημα ισχύει για πτήσεις εντός του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (ΕΟΧ) και της Ελβετίας και καλύπτει τις εκπομπές από όλες τις πτήσεις που αναχωρούν και φθάνουν σε αεροδρόμια των χωρών αυτών. Κατά την εφαρμογή του, αντιμετώπισε ορισμένες επικρίσεις για την αποτελεσματικότητά του όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών, καθώς το αρχικό ανώτατο όριο καθορίστηκε υπερβολικά υψηλό και η τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών ήταν σχετικά χαμηλή, γεγονός που δεν παρείχε επαρκή κίνητρα στις καλυπτόμενες οντότητες για τη μείωση των εκπομπών. Ωστόσο, η ΕΕ έχει λάβει μέτρα για τη μεταρρύθμιση του συστήματος και την ενίσχυση του ανώτατου ορίου, το οποίο αναμένεται να οδηγήσει σε μεγαλύτερες μειώσεις εκπομπών στο μέλλον (Larsson, et al., 2019).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το Σχέδιο Αντιστάθμισης και Μείωσης Άνθρακα για τη Διεθνή Αεροπορία (CORSIA) που εφαρμόζεται από τον ICAO και το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της (EU ETS) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, φαίνεται να παρουσιάζουν επικαλύψεις. Η εφαρμογή του CORSIA για πτήσεις εντός της ΕΕ είναι αβέβαιη, καθώς οι αεροπορικές εταιρείες υποστηρίζουν ότι δεν θα πρέπει να πληρώνουν για πιστώσεις άνθρακα στο πλαίσιο του CORSIA, εάν έχουν ήδη παραδώσει δικαιώματα στο πλαίσιο του ΣΕΔΕ της ΕΕ. Το CORSIA απαιτεί από τις αεροπορικές εταιρείες να αντισταθμίζουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αγοράζοντας πιστώσεις άνθρακα, ενώ το EU ETS απαιτεί από τις αεροπορικές εταιρείες να παραδώσουν δικαιώματα για τις εκπομπές τους. Η πρώτη πληρωμή στο πλαίσιο του CORSIA αναμένεται το 2025, αλλά δεν είναι ακόμη σαφές πώς θα αντιμετωπιστούν οι πτήσεις εντός της ΕΕ όσον αφορά τις πιστώσεις άνθρακα και τα δικαιώματα (Mayer & Ding, 2023).

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (EGD) είναι ένα γενικό πλαίσιο πολιτικής που εισήχθη από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Δεκέμβριο του 2019 με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στην Ευρώπη έως το 2050. Η Συμφωνία αυτή, θέτει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα, συμπεριλαμβανομένου ενός στόχου μείωσης των εκπομπών κατά τουλάχιστον 50% έως το 2030 και επίτευξης ουδετερότητας άνθρακα έως το 2050 (Dupont & Torney, 2021). Ο τομέας των αερομεταφορών, ο οποίος έχει δει διπλασιασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από το 1990, είναι ένας από τους τομείς έντασης άνθρακα που επιδιώκει

να αντιμετωπίσει η EGD (Schmidt, et al., 2022). Στοχεύει επίσης, στη βελτίωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιδόσεων του τομέα των αερομεταφορών. Αυτό περιλαμβάνει μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των αεροσκαφών, τη μείωση της ηχορύπανσης και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αεροδρομίων. Η Συμφωνία αυτή αναγνωρίζει τη σημασία της αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών προκλήσεων που σχετίζονται με τις αερομεταφορές και επιδιώκει την εφαρμογή πολιτικών και κανονισμών που προάγουν τη βιωσιμότητα και μειώνουν το αποτύπωμα άνθρακα του κλάδου (Cifuentes-Faura, 2022).

Επιπλέον, η EGD τονίζει την ανάγκη για μια προσέγγιση κυκλικής οικονομίας στον τομέα των αερομεταφορών. Αυτό περιλαμβάνει την προώθηση της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης υλικών, συμπεριλαμβανομένων των σύνθετων εξαρτημάτων της αεροπορίας στο τέλος του κύκλου ζωής τους (Johst, et al., 2023). Με την υιοθέτηση ενός μοντέλου κυκλικής οικονομίας, ο κλάδος των αερομεταφορών μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα απόβλητα και την κατανάλωση πόρων, οδηγώντας σε μια βιομηχανία πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον. Συνολικά, ο στόχος της ευρωπαϊκής πράσινης συμφωνίας για την ουδετερότητα των αερομεταφορών είναι να μετατρέψει τον τομέα των αερομεταφορών σε μια πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον βιομηχανία. Μέσω της προώθησης βιώσιμων καυσίμων, βελτιώσεων ενεργειακής απόδοσης και πρακτικών κυκλικής οικονομίας, η EGD στοχεύει να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα του κλάδου και να συμβάλει στον ευρύτερο στόχο επίτευξης κλιματικής ουδετερότητας στην Ευρώπη έως το 2050 (Dupont & Torney, 2021).

Ο Ο.Η.Ε. εκτός από τις πολιτικές πρωτοβουλίες που αναλαμβάνει μέσω του ICAO που αποτελεί τμήμα του, πραγματοποιεί ετήσιες Διασκέψεις σχετικά με τη διαμόρφωση των προτεραιοτήτων για τις πολιτικές σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι Διασκέψεις των Μερών (Conference of Parties – COPs), ανώτατο όργανο λήψης αποφάσεων της Σύμβασης-πλαίσιο του ΟΗΕ για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC - United Nations Framework Convention for Climate Change) πραγματοποιούνται σε ετήσια βάση και χαράζουν τις προτεραιότητες των δράσεων που θα πρέπει να υλοποιηθούν για την επίτευξη του στόχου που έχει τεθεί. Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιήθηκαν πολύ σημαντικές διασκέψεις, κατά τις οποίες αποσαφηνίστηκε τόσο ο σχεδιασμός για την επίτευξη του στόχου της συγκράτησης της θερμοκρασίας του πλανήτη στον 1,5°C, όσο και ο τρόπος με τον οποίο μπορεί αυτός να επιτευχθεί. Συγκεκριμένα το 2019, πραγματοποιήθηκε η μεγαλύτερη διάσκεψη κορυφής για το κλίμα στην ιστορία (COP25, Μαδρίτη), θέτοντας τις βάσεις για τη μείωση των

επιβλαβών εκπομπών και την αντιμετώπιση της κλιματικής έκτακτης ανάγκης, παρότι δεν κατέστη δυνατή η επίτευξη συμφωνίας σχετικά με τους κανόνες που διέπουν τις διεθνείς αγορές άνθρακα και, ως εκ τούτου, οι διαπραγματεύσεις για το θέμα αυτό αναβλήθηκαν (UNFCCC, 2019). Το 2021 στη διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το κλίμα στη Γλασκώβη (COP26), σχεδόν 200 χώρες ενέκριναν μια παγκόσμια συμφωνία για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, συμφωνώντας να αναλάβουν περαιτέρω δράση για την καταπολέμηση της και να βοηθήσουν τα ευάλωτα έθνη. Δεσμεύτηκαν να αρχίσουν τη σταδιακή κατάργηση του άνθρακα σε όλο τον κόσμο, ώστε να περιοριστεί η υπερθέρμανση του πλανήτη στους 1,5 °C (Chen, et al., 2022). Αποφασίστηκαν διάφορες πρωτοβουλίες, μεταξύ των οποίων (Cifuentes-Faura, 2022):

- ✓ Η σταδιακή μείωση της χρήσης άνθρακα παγκοσμίως. Ζητείται από τις χώρες να επικαιροποιήσουν τους στόχους μείωσης του άνθρακα για το 2030.
- ✓ Οι ανεπτυγμένες χώρες καλούνται να διπλασιάσουν τη χρηματοδότηση των αναπτυσσόμενων χωρών για να τις βοηθήσουν να προσαρμοστούν στην κλιματική αλλαγή.
- ✓ Επιδιώκει δεσμεύσεις από τις ανεπτυγμένες χώρες να αυξήσουν τις οικονομικές συνεισφορές ώστε να επιτευχθεί ο στόχος των 100 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως σε χρηματοδότηση για να βοηθήσει τις αναπτυσσόμενες χώρες να αντιμετωπίσουν την κλιματική αλλαγή.

Στην πιο πρόσφατη Διάσκεψη των Μερών (COP27), που πραγματοποιήθηκε στο Σαρμ ελ Σείχ της Αιγύπτου, λήφθηκε η απόφαση όλες οι χώρες να καταβάλουν επιπλέον προσπάθεια για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης, ξεκινώντας άμεσα. Τα αποτελέσματα της Διάσκεψης μπορούν να συνοψισθούν σε πέντε βασικά στοιχεία, τα οποία θα διαμορφώσουν επίσης τις προτεραιότητες για τη δράση για το κλίμα το 2023 και μετά (UNFCCC, 2022). Συγκεκριμένα, αποφασίστηκε η δημιουργία ειδικού ταμείου για απώλειες και ζημιές, η επιβεβαίωση της πρόθεσης για τη διατήρηση της αύξησης της θερμοκρασίας στους 1,5°C σε σύντομο διάστημα, ότι η διαφάνεια των δεσμεύσεων από τις επιχειρήσεις και τους θεσμούς θα είναι προτεραιότητα του ΟΗΕ για την Κλιματική Αλλαγή το 2023, η κινητοποίηση μεγαλύτερης οικονομικής στήριξης για τις αναπτυσσόμενες χώρες και να πραγματοποιηθεί μια στροφή στον άξονα της υλοποίησης.

Η δέσμη αποφάσεων που εγκρίθηκε στο COP27 έχει μεγάλη εστίαση στην εφαρμογή των πολιτικών, στοχεύει στην ενίσχυση της δράσης των χωρών για τη

μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την προσαρμογή στις αναπόφευκτες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, καθώς και την ενίσχυση της υποστήριξης της χρηματοδότησης, της τεχνολογίας και ανάπτυξη ικανοτήτων που χρειάζονται οι αναπτυσσόμενες χώρες.

Συγκεκριμένα, τα έθνη αποφάσισαν να κάνουν τη μετάβαση σε ανάπτυξη με χαμηλές εκπομπές και ανθεκτική στο κλίμα φιλόδοξη και δίκαιη. Αποφάσισαν να δημιουργήσουν ένα πρόγραμμα εργασίας για τη «δίκαιη μετάβαση», το οποίο αναμένεται να στηριχθεί και να συμπληρώσει το έργο για την επείγουσα κλιμάκωση της φιλοδοξίας και της εφαρμογής του μετριασμού. Η Συμφωνία του Παρισιού καλεί τους υπογράφοντες να λάβουν υπόψη «τις επιταγές μιας δίκαιης μετάβασης του εργατικού δυναμικού και της δημιουργίας αξιοπρεπούς εργασίας και ποιοτικών θέσεων εργασίας σύμφωνα με εθνικά καθορισμένες αναπτυξιακές προτεραιότητες». Αυτό σημαίνει ότι μια δίκαιη μετάβαση δεν είναι ένα σταθερό σύνολο κανόνων, «αλλά ένα όραμα και μια διαδικασία που βασίζεται στο διάλογο και μια ατζέντα που μοιράζονται οι εργαζόμενοι, η βιομηχανία και οι κυβερνήσεις που πρέπει να διαπραγματευθούν και να εφαρμοστούν στα γεωγραφικά, πολιτικά, πολιτιστικά και πολιτιστικά τους στοιχεία και κοινωνικά πλαίσια», σύμφωνα με το Διεθνές Ινστιτούτο για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (UNFCCC, 2022).

3.1.2. Εθνικές πολιτικές για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας

Οι διεθνείς πολιτικές μπορούν να επιτύχουν μειώσεις εκπομπών με χαμηλότερο κόστος, καθώς καλύπτουν πολλές χώρες και τομείς, επιτρέποντας έτσι το διαμοιρασμό του κόστους για τα μέτρα που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε περισσότερους εταίρους. Ένα άλλο πλεονέκτημα των διεθνών πολιτικών είναι ότι ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο στρατηγικών αποφυγής από αεροπορικές εταιρείες ή καταναλωτές με βάση τις διαφορές πολιτικής μεταξύ των χωρών. Αυτές όμως οι προσπάθειες δεν είναι από μόνες τους αρκετές για το προσδοκώμενο αποτέλεσμα. Είναι απαραίτητο να συμπληρώνονται από εθνικές και περιφερειακές πολιτικές και μέτρα που εφαρμόζονται από μεμονωμένα κράτη. Αυτά περιλαμβάνουν φορολογικά κίνητρα, τεχνικά πρότυπα, διαχείριση κυκλοφορίας και ανάπτυξη υποδομών (Mayer & Ding, 2022).

Οι εθνικές πολιτικές για τις αερομεταφορές, θα μπορούσαν να θεωρηθούν ότι αυξάνουν τις πιθανότητες επίτευξης του στόχου των 1.5°C που έχει τεθεί από τους διεθνείς οργανισμούς, μπορούν να εφαρμοστούν ευκολότερα από τις διεθνείς πολιτικές, καθώς απαιτούν δράση μόνο από μία χώρα και όχι από πολλές χώρες, έτσι δεν απαιτούν

συντονισμό με άλλες χώρες. Επιπλέον, οι εθνικές πολιτικές μπορούν να εμπνεύσουν ισχυρότερες διεθνείς πολιτικές στο μέλλον, αποδεικνύοντας τη σκοπιμότητα και την αποτελεσματικότητα ορισμένων μέτρων και δράσεων πολιτικής, που αξίζει να επεκταθούν σε παγκόσμιο επίπεδο. Επομένως, φαίνεται ότι ένας συνδυασμός διεθνών και εθνικών πολιτικών είναι απαραίτητος για τη σημαντική μείωση των εκπομπών από τον τομέα των αερομεταφορών και την επίτευξη των κλιματικών στόχων (Larsson, et al., 2019).

Οι συνθήκες για το κλίμα, όπως η Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC), δεν έχουν καθορίσει σαφώς το γεωγραφικό πεδίο των υποχρεώσεων των κρατών για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Αυτή η έλλειψη ορισμού μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση, ιδίως όταν προσπαθεί να γίνει διάκριση μεταξύ δύο διαφορετικών τύπων υποχρεώσεων βάσει της UNFCCC. Ο πρώτος τύπος υποχρέωσης είναι διαδικαστικός και απαιτεί από τα κράτη να κοινοποιούν τις απογραφές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) χρησιμοποιώντας συμφωνημένες μεθοδολογίες που συμφωνήθηκαν από τη Διάσκεψη των Μερών (COP). Η υποχρέωση αυτή επικεντρώνεται στη διαδικασία υποβολής στοιχείων σχετικά με τις εκπομπές και όχι στην πραγματική μείωση των εκπομπών. Ο δεύτερος τύπος υποχρέωσης είναι ουσιαστικός και απαιτεί από τα κράτη να εφαρμόσουν προγράμματα που περιέχουν μέτρα για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Η υποχρέωση αυτή επικεντρώνεται στη λήψη μέτρων για τη μείωση των εκπομπών και την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Είναι σημαντικό να γίνει ξεκάθαρη η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τύπων υποχρεώσεων, καθώς απαιτούν διαφορετικούς τύπους δράσης από τα κράτη. Η έλλειψη σαφούς ορισμού γύρω από το γεωγραφικό πεδίο εφαρμογής αυτών των υποχρεώσεων μπορεί να δυσχεράνει τον προσδιορισμό των κρατών που είναι υπεύθυνα για τη λήψη μέτρων για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής σε ορισμένες περιοχές ή τομείς. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολο στον τομέα των αερομεταφορών, όπου ενδέχεται να προκύψουν εκπομπές σε πολλές δικαιοδοσίες και απαιτείται διεθνής συνεργασία για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του ζητήματος. Επομένως υπάρχει μεγάλη ανάγκη για μεγαλύτερη σαφήνεια και εξειδίκευση στον καθορισμό των υποχρεώσεων των κρατών για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, ιδίως στο πλαίσιο διεθνών συνθηκών και συμφωνιών (IPCC, 2023).

Στον πρώτο τύπο υποχρεώσεων ανήκουν οι Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές (NDCs). Οι Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές (NDCs) είναι εθελοντικές δεσμεύσεις

που έχουν αναλάβει οι χώρες στο πλαίσιο της Συμφωνίας του Παρισιού για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αυτές οι δεσμεύσεις υποβάλλονται από τις χώρες και περιγράφουν τους στόχους τους για μείωση των εκπομπών και τις στρατηγικές τους για την επίτευξή τους. Τα NDCs είναι σημαντικά έγγραφα που αμφισβητούνται και διαπραγματεύονται, αντανακλώντας συζητήσεις για τη δικαιοσύνη και την ισότητα μεταξύ των εθνών στο πλαίσιο των διαπραγματεύσεων της UNFCCC (Mills-Novoa & Liverman, 2019). Αν και η Συμφωνία του Παρισιού καλύπτει καταρχήν τις εκπομπές από όλους τους τομείς, τα περισσότερα μέρη της Συμφωνίας του Παρισιού δεν έχουν συμπεριλάβει τις εκπομπές από τη διεθνή ναυτιλία και τις πτήσεις στα NDCs τους. Αυτές οι εκπομπές αντιμετωπίζονται ρητά από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) και τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO), αντίστοιχα. Ωστόσο, ο παγκόσμιος χαρακτήρας αυτών των τομέων και η περιορισμένη προσοχή τους στις εγχώριες στρατηγικές για το κλίμα και στα NDCs που υποβάλουν, δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις για την εφαρμογή της πολιτικής για το κλίμα (Fragkos, 2022).

Αυτές οι δεσμεύσεις καθορίζονται από κάθε χώρα με βάση τις δικές της εθνικές συνθήκες, δυνατότητες και προτεραιότητες, ενώ μπορούν επίσης να υπογραμμίσουν, τα πιθανά οφέλη των διεθνών αγορών άνθρακα όσον αφορά την επίτευξη μειώσεων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι αναπτυσσόμενες χώρες, όπως η Κίνα και η Ινδία, έχουν σχετικά χαμηλό κόστος μείωσης των εκπομπών και μπορούν να δημιουργήσουν πιστώσεις άνθρακα για πωλήσεις σε άλλες περιοχές (Zhang, et al., 2023). Τα NDC είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση της προόδου προς τους στόχους της Συμφωνίας του Παρισιού και για τη λογοδοσία των χωρών για τις δεσμεύσεις τους. Αναθεωρούνται και επικαιροποιούνται κάθε πέντε χρόνια για να διασφαλιστεί ότι παραμένουν φιλόδοξα και αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Αποτελούν κρίσιμο μέρος της παγκόσμιας προσπάθειας για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη σε πολύ κάτω από τους 2 βαθμούς Κελσίου πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα και για τη συνέχιση των προσπαθειών για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στους 1,5 βαθμούς Κελσίου (Mills-Novoa & Liverman, 2019).

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο η Συμφωνία του Παρισιού επιδιώκει να κινητοποιήσει τα κράτη για να κοινοποιούν τις απογραφές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG), είναι να καλέσει τα μέρη να κοινοποιήσουν τις μακροπρόθεσμες στρατηγικές ανάπτυξης για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (LTS). Αυτές οι στρατηγικές αποσκοπούν στο να σκιαγραφήσουν το σχέδιο μιας χώρας για

τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μακροπρόθεσμα, συνήθως για μια περίοδο αρκετών δεκαετιών. Το LTS είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τις χώρες να αποδείξουν τη δέσμευσή τους για μείωση των εκπομπών και να παράσχουν έναν οδικό χάρτη για την επίτευξη των κλιματικών τους στόχων. Καθώς ορισμένα μέρη της Συμφωνίας του Παρισιού δεν έχουν συμπεριλάβει τη διεθνή πολιτική αεροπορία στις εθνικά καθορισμένες συνεισφορές τους (NDCs), εξετάζουν ορισμένες φορές το ενδεχόμενο να υιοθετήσουν διαφορετική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των εκπομπών από τις αεροπορικές μεταφορές, όπως με την ανάπτυξη ξεχωριστού LTS για τον τομέα των αερομεταφορών. Αυτό υπογραμμίζει τις προκλήσεις της αντιμετώπισης των εκπομπών από την αεροπορία, η οποία είναι μια πολύπλοκη και παγκόσμια βιομηχανία που δεν υπόκειται εύκολα σε εθνικούς κανονισμούς. Η ανάπτυξη χωριστών LTS για τις αερομεταφορές θα μπορούσε να συμβάλει στο να διασφαλιστεί ότι ο τομέας αυτός δεν θα παραλειφθεί στην ευρύτερη προσπάθεια καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής και θα μπορούσε να παράσχει ένα πλαίσιο διεθνούς συνεργασίας για τη μείωση των εκπομπών από τις αερομεταφορές (Mayer & Ding, 2023).

Ο δεύτερος τύπος υποχρεώσεων των κρατών αφορά τα μέτρα που λαμβάνονται σε εθνικό επίπεδο για τον μετριασμό της αύξησης της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τους Larsson *et al.* (2019), τα εθνικά μέσα πολιτικής που υπάγονται σε αυτόν τον τύπο υποχρεώσεων πρέπει να θεωρούνται προσωρινά. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να εφαρμοστούν ως βραχυπρόθεσμη λύση έως ότου τεθούν σε εφαρμογή αποτελεσματικότερα και ισχυρότερα μέσα διεθνούς πολιτικής. Η διακοπή των εθνικών μέσων πολιτικής είναι απαραίτητη εάν εφαρμοστούν πιο αποτελεσματικά και ισχυρά διεθνή μέσα πολιτικής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εθνικές πολιτικές μπορεί να καταστούν περιπτώσεις ή ακόμη και αντιπαραγωγικές εάν δεν ευθυγραμμίζονται με τις διεθνείς πολιτικές. Ο απώτερος στόχος είναι η μακροπρόθεσμη εφαρμογή σκληρότερων μέσων διεθνούς πολιτικής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι υφιστάμενες διεθνείς πολιτικές για τις αερομεταφορές δεν επαρκούν για την επίτευξη του στόχου των 2°C και απαιτούνται ισχυρότερες πολιτικές για τη σημαντική μείωση των εκπομπών από τον τομέα των αερομεταφορών (Mayer & Ding, 2023).

Για τον λόγο αυτό κατά τη διάρκεια των διεθνών διασκέψεων για το κλίμα και των πρωτοβουλιών που αναπτύχθηκαν, τα κράτη ανέλαβαν συγκεκριμένες δεσμεύσεις βάσει των συνθηκών που υπέγραψαν, για το κλίμα για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Αυτές οι δεσμεύσεις είναι ποσοτικοποιημένες και περιγράφουν

συγκεκριμένους στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Οι ανεπτυγμένες χώρες αναμένεται να αναλάβουν ηγετικό ρόλο σε αυτές τις δεσμεύσεις και να κοινοποιήσουν τους στόχους τους στη διεθνή κοινότητα. Οι στόχοι αναμένεται να είναι «σε ολόκληρη την οικονομία», που σημαίνει ότι θα πρέπει να καλύπτουν όλους τους τομείς της οικονομίας και όχι μόνο συγκεκριμένους κλάδους ή δραστηριότητες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου προέρχονται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της γεωργίας και της παραγωγής ενέργειας, και η μείωση των εκπομπών σε έναν τομέα μπορεί να μην είναι αρκετή για την επίτευξη των συνολικών στόχων (Chen, et al., 2022).

Με την υιοθέτηση στόχων σε ολόκληρη την οικονομία, τα κράτη μπορούν να διασφαλίσουν ότι υιοθετούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη μείωση των εκπομπών και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, η υλοποίηση αυτών των στόχων μπορεί να είναι δύσκολη, καθώς μπορεί να απαιτήσει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο δομής και λειτουργίας των οικονομιών. Επιπλέον, ενδέχεται να υπάρχουν πολιτικά και οικονομικά εμπόδια στην υλοποίηση αυτών των στόχων, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες που μπορεί να δώσουν προτεραιότητα στην οικονομική ανάπτυξη έναντι των περιβαλλοντικών ανησυχιών (Mayer & Ding, 2023).

Τα πιο διευρυμένα μέτρα εθνικής πολιτικής που εφαρμόζονται σήμερα, περιλαμβάνουν φόρους επί των καυσίμων αεροσκαφών, φόρους επιβατών αεροπορικών μεταφορών βάσει απόστασης και υποχρέωση ποσόστωσης για τα βιοκαύσιμα που χρησιμοποιούν οι αεροπορικές εταιρίες (Larsson, et al., 2019). Αυτές οι πολιτικές έχουν βρεθεί ότι είναι αποτελεσματικές στη μείωση των εκπομπών, ωστόσο, υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι οι αλλαγές στο επίπεδο των τιμών θα πρέπει να είναι σημαντικές για να οδηγήσουν σε αρνητική αύξηση των εκπομπών. Αυτό σημαίνει ότι οι πολιτικές θα πρέπει να εφαρμοστούν σε σημαντικό βαθμό για να έχουν αξιοσημείωτο αντίκτυπο στις εκπομπές (Gössling & Lyled, 2021).

Πιο συγκεκριμένα, μία από τις διαθέσιμες επιλογές εθνικής πολιτικής είναι ένας φόρος επί των καυσίμων αεροσκαφών, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί για την εγχώρια αεροπορία και για τη διεθνή αεροπορία εάν συναφθούν διμερείς συμφωνίες. Αυτή η πολιτική μπορεί να δώσει κίνητρα στις αεροπορικές εταιρείες να χρησιμοποιούν πιο αποδοτικά αεροσκάφη και να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακα (Larsson, et al., 2019). Η επιβολή του φόρου αυτού, μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στις εσωτερικές όσο και στις διεθνείς πτήσεις, έτσι ώστε να αυξηθεί το κόστος των αεροπορικών ταξιδιών και να μειωθεί η ζήτηση για αυτά, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές. Τον ίδιο σκοπό έχουν

και οι φόροι επιβατών αεροπορικών μεταφορών με βάση την απόσταση. Αυτή η πολιτική είναι ήδη κοινή μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ και μπορεί να μειώσει τη ζήτηση αεροπορικών ταξιδιών αυξάνοντας τις τιμές των εισιτηρίων, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί τόσο στις εσωτερικές όσο και στις διεθνείς πτήσεις (Leamon, et al., 2019).

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διαφορετικές στάσεις των ανθρώπων απέναντι σε πολιτικές που αποσκοπούν στη μείωση των αεροπορικών ταξιδιών, μέσω της αύξησης του σχετικού κόστους. Ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι οι άνθρωποι δεν ενδιαφέρονται να πετούν λιγότερο και είναι ανθεκτικοί σε πολιτικές που αυξάνουν το κόστος των αεροπορικών ταξιδιών. Ωστόσο, πιο πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η σχέση μεταξύ της στάσης των ανθρώπων απέναντι στα αεροπορικά ταξίδια και των πολιτικών που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών είναι πιο περίπλοκη. Για παράδειγμα, αμφισβητούνται ορισμένα αποτελεσματικά μέτρα για τη μείωση των εκπομπών, πράγμα που σημαίνει ότι οι άνθρωποι μπορεί να μην είναι πρόθυμοι να τα υποστηρίξουν. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως ανησυχίες σχετικά με τον αντίκτυπο στην οικονομία ή προσωπική ταλαιπωρία (Gössling & Lyled, 2021).

Η υποχρέωση ποσόστωσης για τα βιοκαύσιμα είναι μια τρίτη επιλογή. Αυτή η πολιτική μπορεί να απαιτεί από τις αεροπορικές εταιρείες να χρησιμοποιούν ένα ορισμένο ποσοστό βιοκαυσίμων στο μείγμα καυσίμων τους, το οποίο μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα. Τα βιοκαύσιμα είναι ανανεώσιμα καύσιμα που παράγονται από οργανική ύλη, όπως καλλιέργειες ή απόβλητα. Στόχος αυτού του μέσου πολιτικής είναι η μείωση της έντασης άνθρακα των αεροπορικών καυσίμων και, ως εκ τούτου, η μείωση των εκπομπών (Leamon, et al., 2019).

Αυτά τα μέσα πολιτικής έχουν επιλεγεί επειδή είναι νομικά εφικτές επιλογές που μπορούν να εφαρμοστούν από τις εθνικές κυβερνήσεις. Μπορούν επίσης να αυξηθούν σταδιακά και να εναρμονιστούν με άλλες χώρες για να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτά τα μέσα πολιτικής από μόνα τους ενδέχεται να μην επαρκούν για την επίτευξη του στόχου των 2°C. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής πρέπει να εργαστούν για τη θέσπιση σκληρότερων μέσων διεθνούς πολιτικής μακροπρόθεσμα και ταυτόχρονα να εφαρμόσουν προσωρινά εθνικά μέσα πολιτικής βραχυπρόθεσμα (Larsson, et al., 2019). Είναι σίγουρο, ότι ένας συνδυασμός πολιτικών, συμπεριλαμβανομένων των εισφορών, των φόρων και των ποσοστώσεων για βιώσιμα καύσιμα αεροσκαφών, που θα εφαρμοστούν σε εθνικό επίπεδο ή σε

επίπεδο περιφερειακών δικαιοδοσιών όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση, κατανοώντας τη στάση των ανθρώπων απέναντι στις πολιτικές αυτές, θα ήταν απαραίτητος για την αποτελεσματική μείωση των εκπομπών από τις αεροπορικές μεταφορές επιβατών (Gössling & Lyled, 2021).

Η Ελλάδα προσπαθεί να εναρμονιστεί με τις Ευρωπαϊκές και διεθνείς πολιτικές για το κλίμα, με θετικά αποτελέσματα. Παρότι όμως, από τις εκθέσεις φαίνεται ότι συνολικά έχει πετύχει μείωση στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, στον κλάδο των αερομεταφορών θα αποτελέσματα δεν είναι αισιόδοξα (Paschalidou, et al., 2022). Οι ελληνικές πολιτικές για την κλιματική ουδετερότητα στον τομέα των αερομεταφορών θα πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στην κατάργηση των ορυκτών καυσίμων και των σχετικών επιδοτήσεων, υποστηριζόμενες από μείγματα πολιτικής που περιλαμβάνουν εισφορές και ποσόστωση τροφοδοσίας για βιώσιμα καύσιμα αεροσκαφών (Zervas, et al., 2021). Η αποτελεσματικότητα του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU ETS) στις αερομεταφορές μπορεί να βελτιωθεί με την απλούστευση των διαδικασιών παρακολούθησης, υποβολής εκθέσεων και επαλήθευσης, την αύξηση της διαφάνειας των πλειστηριασμών και την επιβολή κυρώσεων στην πολιτική εσόδων και την επίτευξη ισορροπίας στην αγορά δικαιωμάτων (Efthymiou & Paratheodorou, 2019).

Πρόσφατα ψηφίστηκε ο Εθνικός Κλιματικός Νόμος 4936/2022 με τίτλο «Εθνικός Κλιματικός Νόμος – Μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, επείγουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και την προστασία του περιβάλλοντος» (ΦΕΚ 105/Α/27-05-2022). Ο νόμος αυτός αποτελεί ένα νομοθετικό μέτρο που αφορά τα κλιματικά ζητήματα σε εθνικό επίπεδο. Περιλαμβάνει διατάξεις και κανονισμούς που στοχεύουν στην αντιμετώπιση και τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη χώρα.

Ο νόμος προσπαθεί να θέσει συγκεκριμένες στρατηγικές και στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη διατήρηση των οικοσυστημάτων και την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης. Ο πρωταρχικός του στόχος είναι να συμβάλει στις παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, διασφαλίζοντας παράλληλα ένα πιο φιλικό προς το περιβάλλον και ανθεκτικό μέλλον για τη χώρα. Παρόλο που ο κλάδος των μεταφορών στο σύνολό του συμπεριλαμβάνεται στις ρυθμίσεις του, δεν έχουν ακόμα εφαρμοστεί συγκεκριμένα μέτρα τα οποία θα διευκρινιστούν ανάλογα με τις ειδικές ρυθμίσεις που περιγράφονται στον νόμο.

Οι εθνικές αερομεταφορές στην Ελλάδα δεν αποτελούν δραστηριότητα υψηλής έντασης για το κλίμα καθώς ο κύριος όγκος των πτήσεων προέρχεται από διεθνείς εταιρίες. Σε ένα έγγραφο εργασίας που δημοσίευσε ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD) σχετικά με τις αλλαγές που πρέπει να συμβούν, ώστε η οικονομία της Ελλάδας να γίνει πιο φιλική στο περιβάλλον στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής, αναφέρεται ότι οι εθνικές αερομεταφορές συμβάλλουν το μικρότερο ποσοστό στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (Leidecker, et al., 2023). Για τον λόγο αυτό στο έγγραφο δεν προτείνονται συγκεκριμένα μέτρα για τις αερομεταφορές. Είναι φανερό ότι για χώρες όπως η Ελλάδα, που αποτελεί έναν ελκυστικό τουριστικό προορισμό, οι εθνικές πολιτικές περνούν σε δεύτερο πλάνο, καθώς οι περιφερειακές και διεθνείς πολιτικές επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις επιπτώσεις στο κλίμα. Αυτό αποτυπώνεται και στο Σχέδιο Δράσης που έχει διαμορφώσει ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) σε συνεργασία με το Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών (ICAO, 2021).

Η καταγραφή και η αναφορά των μειώσεων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχει πολλά οφέλη για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, συμπεριλαμβανομένων των διεθνών οργανισμών, των εθνικών και τοπικών αρχών, των δημόσιων και ιδιωτικών εταιριών, στην ανάπτυξη δράσεων για την μείωση των εκπομπών άνθρακα. Βοηθά στην αιτιολόγηση της κατανομής του προϋπολογισμού σε δράσεις μετριασμού και στη χρηματοδότηση για το κλίμα για τις αναπτυσσόμενες χώρες, διευκολύνει την ευαισθητοποίηση του κοινού και την ευρύτερη αποδοχή και υποστήριξη από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη, αυξάνει την αξιοπιστία των πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, αποτελεί τον μηχανισμό ανατροφοδότησης του κύκλου αξιολόγησης της πολιτικής που επιτρέπει την περιοδική παρακολούθηση της απόδοσης και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας αυτών των πολιτικών και ενεργειών (Sebos, et al., 2021).

Οι Sebos *et al.* (2021), ανέπτυξαν ένα μεθοδολογικό πλαίσιο, που εφαρμόζεται επί του παρόντος από την Ελλάδα για την αξιολόγηση της επίδρασης των μέτρων μετριασμού των επιπτώσεων στο κλίμα. Η μεθοδολογία βασίζεται σε ολοκληρωμένα και διαφανή μοντέλα και τύπους που θα μπορούσαν εύκολα να παρακολουθηθούν και να αναπαραχθούν. Με την εφαρμογή του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου, κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της συνολικής επίδρασης των πολιτικών μετριασμού της Ελλάδας για το έτος 2015 (εκ των υστέρων ανάλυση), αλλά και για τα έτη 2020, 2025 και 2030 (εκ των προτέρων ανάλυση), χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη επίσημη ενημέρωση και αναφορά της Ελλάδας στην ΕΕ και στον ΟΗΕ. Το συνολικό

αποτέλεσμα των δράσεων μετριασμού που εφαρμόστηκαν το 2015 υπολογίστηκε σε 25% του έτους 1990, που είναι το έτος βάσης της Σύμβασης για το Κλίμα (UNFCCC), ενώ το συνολικό αποτέλεσμα των δράσεων μετριασμού, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμοζόμενων, εγκεκριμένων και προγραμματισμένων πολιτικών και μέτρων που περιλαμβάνονται στο Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος της Ελλάδας εκτιμάται ότι αποτελούν το 32%, 47% και 55% των εκπομπών του έτους βάσης της Ελλάδας για τα έτη 2020, 2025 και 2030, αντίστοιχα.

3.2 Δράσεις για την μείωση των επιπτώσεων στο κλίμα

Η επίτευξη μηδενικών καθαρών εκπομπών στον τομέα των αερομεταφορών απαιτεί συνδυασμό πολιτικής και δράσης. Η Συμφωνία του Παρισιού και η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία παρέχουν πλαίσια για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και τη μετάβαση σε μια οικονομία με αποδοτική χρήση των πόρων. Ο τομέας των αερομεταφορών πρέπει να υιοθετήσει στρατηγικές, όπως η ανανέωση του στόλου, η βελτιωμένη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας και η χρήση βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων για τη μείωση των εκπομπών. Τα μέτρα πολιτικής, συμπεριλαμβανομένου του CORSIA και του συστήματος εμπορίας εκπομπών της ΕΕ, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μείωση των εκπομπών. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω πολιτικές εξελίξεις και καινοτομίες για την επίτευξη του στόχου των μηδενικών καθαρών εκπομπών στις αερομεταφορές (IATA, 2023).

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) έχει εφαρμόσει ένα πρόγραμμα αντιστάθμισης και μείωσης του άνθρακα για τη Διεθνή Αεροπορία, αλλά θεωρείται ανεπαρκές για τον μετριασμό των εκπομπών (Gössling & Lyled, 2021). Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκαν εθνικές πολιτικές με σκοπό να μειωθούν οι εκπομπές των πτήσεων, μέσα από την κατάργηση των ορυκτών καυσίμων και των σχετικών επιδοτήσεων, μαζί με μείγματα πολιτικής που περιλαμβάνουν εισφορές (CO₂, συχνών επιβατών κ.α.) και ποσόστωση τροφοδοσίας για βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα (Mayer & Ding, 2023). Παράλληλα, έχουν σχεδιαστεί μια σειρά από δράσεις που η υλοποίησή τους κρίνεται απαραίτητη για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Για παράδειγμα προτείνεται η υιοθέτηση των βιοκαυσίμων στις αερομεταφορές στο πλαίσιο μιας μελλοντικής πολιτικής εμπορίας εκπομπών, αλλά διαπιστώνεται ότι η ευρεία χρήση βιοκαυσίμων μπορεί να οδηγήσει σε αυξανόμενες συνολικές κλιματικές επιπτώσεις (Kabir, et al., 2023; Sebos, 2022). Η επίτευξη ουδετερότητας άνθρακα ή «καθαρών μηδενικών»

εκπομπών απαιτεί προσπάθειες συνεργασίας, ανάπτυξη πολιτικής και τεχνολογικές καινοτομίες. Οι αλληλεπιδράσεις των διαφορετικών επιπέδων διακυβέρνησης συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1.

Συνολικά, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν, εκτός από τις πρωτοβουλίες πολιτικής σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο για τη μείωση των εκπομπών από τις αεροπορικές μεταφορές που έχουν ήδη αναπτυχθεί, και νέες πρωτοβουλίες εφαρμογής, όπως η μετάβαση σε βιώσιμα καύσιμα και άλλες τεχνολογίες πρόωσης. Οι τεχνολογικές καινοτομίες, όπως η χρήση βιοκαυσίμων, έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αερομεταφορών, αλλά το μέλλον τους είναι αβέβαιο λόγω του υψηλού κόστους και των επιχειρησιακών προκλήσεων (Efthymiou & Paratheodorou, 2019). Υπάρχει λοιπόν ανάγκη να προωθηθούν οι δράσεις αυτές σε παγκόσμιο επίπεδο, παρότι υπάρχουν εντάσεις και αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών χωρών και περιοχών στις προσεγγίσεις τους για τη μείωση των διεθνών εκπομπών της αεροπορίας (Mai & Yan, 2023).

Πολλά κράτη σε συνεργασία με τους διεθνείς οργανισμούς έχουν αναπτύξει Εθνικά Σχέδια Δράσης που περιγράφουν την διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσουν τα ίδια, οι διακρατικοί οργανισμοί και η παγκόσμια αεροπορική κοινότητα, ώστε να εξασφαλιστεί η κλιματική ουδετερότητα στις αερομεταφορές. Οι δράσεις που προτείνονται ακολουθούν τρεις βασικές στρατηγικές:

- Την μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, τόσο του CO₂ όσο και των άλλων μη ανθρακικών αερίων. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε με μείωση των εκπομπών τους, είτε με απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα με τεχνητό τρόπο. Η ανανέωση του στόλου, η βελτιωμένη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας και

Πίνακας 1. Αλληλεπίδραση των διάφορων επιπέδων διακυβέρνησης και των κυριότερων πολιτικών τους (Mayer & Ding, 2023).

Γεωγραφικό επίπεδο διακυβέρνησης	Εταίροι	Πολιτική
Παγκόσμιο	ICAO	CORSIA
Πολυεθνικό	EU	EU ETS
Εθνικό	Κράτη	Φόρος επιβατών Φόρος στα καύσιμα Ποσόστωση βιοκαυσίμων
Τοπικό	Πόλεις	ενημερωτικές εκστρατείες & ταξιδιωτικές πολιτικές



Αλληλεπίδραση πολιτικών

η χρήση βιοκαυσίμων, η αντικατάσταση δηλαδή των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα, είτε βιοκαύσιμα καθαρών μηδενικών εκπομπών ή συνθετικά καύσιμα, είναι μερικές από τις στρατηγικές που προτείνονται από τη Διεθνή Ένωση Αερομεταφορών (IATA) και τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) (IATA, 2023; IPCC, 2023).

- Την εισαγωγή νέων τεχνολογιών στα συστήματα πρόωσης των αεροσκαφών, ηλεκτροκίνητα, υβριδικά αεροσκάφη ή αεροσκάφη που θα προωθούνται με υδρογόνο βρίσκονται στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος τόσο από την επιστημονική κοινότητα, όσο και από τη βιομηχανία. Τα αεροσκάφη αυτά δεν εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου, έτσι αναμένεται να συντελέσουν δραστικά στην κλιματική ουδετερότητα.
- Την ενσωμάτωση των πολιτικών που βασίζονται στην αγορά σε συνεργατικά και ολοκληρωμένα συστήματα μακροπρόθεσμού σχεδιασμού των αερομεταφορών, με την μέγιστη δυνατή συναίνεση. Ο σχεδιασμός αυτός θα λαμβάνει υπόψη όλες τις πτυχές του αεροπορικού τομέα, συμπεριλαμβανομένης της τεχνολογίας, των καυσίμων, της διαχείρισης και των λειτουργιών τους, για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Κάποιες από τις δράσεις αυτές βρίσκονται σε προχωρημένο επίπεδο εφαρμογής και ήδη έχουν δοκιμαστεί και κάποιες άλλες βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, υπάρχει όμως η κοινή πεποίθηση από όλους τους εταίρους των αερομεταφορών ότι η υλοποίησή τους θα πρέπει να επιταχυνθεί. Αυτή η πεποίθηση επιβεβαιώθηκε και επικυρώθηκε στην τελευταία Διάσκεψη των Μερών (COP27), στην οποία η υλοποίηση των δράσεων πέρασε στο προσκήνιο (UNFCCC, 2022), αλλά και στην πρόσφατη συνθετική έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) όπου αναλύονται αυτές οι δράσεις (IPCC, 2023). Στη συνέχεια θα γίνει μια πιο αναλυτική περιγραφή των σημαντικότερων δράσεων σύμφωνα με τις εκθέσεις των διεθνών οργανισμών και σύγχρονα επιστημονικά δεδομένα.

3.2.1. Βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα (SAF)

Για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από τα αεροπλάνα, μπορούν να γίνουν διάφορες προσεγγίσεις. Ωστόσο, η επίτευξη καθαρών μηδενικών εκπομπών στις αερομεταφορές θα απαιτήσει περαιτέρω μειώσεις στη ζήτηση για αεροπορικές μεταφορές, βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση και αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων αεριωθουμένων με βιοκαύσιμα καθαρών μηδενικών εκπομπών ή συνθετικά καύσιμα (Bergero, et al., 2023). Η μετάβαση σε βιώσιμα αεροπορικά

καύσιμα είναι μια βασική πτυχή για την επίτευξη μηδενικών καθαρών εκπομπών στον τομέα των αερομεταφορών. Τα τρέχοντα αεροσκάφη έχουν σχεδιαστεί γύρω από την καύση αεροπορικής κηροζίνης με βάση το πετρέλαιο, αλλά τα αεροπορικά καύσιμα μειωμένου άνθρακα είναι απαραίτητα για την επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών. Τα συνθετικά καύσιμα από βιομάζα, πράσινο υδρογόνο και ατμοσφαιρικό CO₂, καθώς και η άμεση χρήση πράσινου υγρού υδρογόνου, έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές CO₂ των αερομεταφορών (Dray, et al., 2022).

Ένας όρος που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία για να περιγράψει αυτή την κατηγορία καυσίμων είναι τα «βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα» (SAF), τα οποία είναι επίσης γνωστά ως καύσιμα βιο-τζετ (bio-jet). Ο όρος αυτός περιλαμβάνει μια ομάδα καυσίμων που δεν βασίζονται στο πετρέλαιο, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει βιοκαύσιμα και συνθετικά καύσιμα. Τα SAF είναι ανανεώσιμα και καθαρής καύσης και έχουν παρόμοιες χημικές ιδιότητες με τα συμβατικά που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα. Μπορούν να παραχθούν από διάφορες πηγές, τόσο από μη βιογενείς πρόδρομες ουσίες, όπως χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια και γεωργικά υπολείμματα, όσο και βιογενείς πηγές, όπως φύκια και φυτικά έλαια. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι διπτά, καθώς μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης της αεροπορικής βιομηχανίας από τα ορυκτά καύσιμα, αλλά και να μετριάσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αεροπορικών ταξιδιών, καθώς συμβάλουν στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων όπως τα οξείδια του αζώτου και τα σωματίδια (Okolie, et al., 2023).

Ωστόσο, η παραγωγή SAF δεν είναι χωρίς προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της διαθεσιμότητας και του κόστους των πρώτων υλών, της επεκτασιμότητας της παραγωγής και της ανάγκης υποδομής για την υποστήριξη της χρήσης τους. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι παρά το σύνολο των δυνατοτήτων για μείωση περίπου 80% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα SAF αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 1% του καυσίμου που χρησιμοποιείται στην πολιτική αεροπορία (Amankwah-Amoah, et al., 2023). Νέες μέθοδοι παραγωγής όμως, ολοένα και μειώνουν το κόστος, καθιστώντας κάποια από τα καύσιμα αυτά πιο ανταγωνιστικά. Για παράδειγμα, σε μια τεχνοοικονομική αξιολόγηση και αξιολόγηση του κύκλου ζωής σε σχέση με τα αέρια του θερμοκηπίου, που διεξήχθη σε εργοστάσιο βιοδιυλιστηρίου για βιώσιμη παραγωγή αεροπορικών καυσίμων με χρήση υδρογόνου που παράγεται μέσω αναμόρφωσης υδατικής φάσης, διαπιστώθηκε ότι η ελάχιστη τιμή πώλησης καυσίμου

ήταν 17% χαμηλότερη από την παραγωγή SAF που βασίζεται σε υδρογόνο που προέρχεται από ηλεκτρόλυση (Pipitone, et al., 2023).

Τα βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως καύσιμα που μπορούν να αναμιχθούν με τα συμβατικά (drop-in) και αυτά που δεν μπορούν να αναμιχθούν με άλλα και χρησιμοποιούνται αυτόνομα σε εξειδικευμένους κινητήρες (non-drop-in) (Okolie, et al., 2023). Τα drop-in βιώσιμα καύσιμα για την αεροπορία, είναι εναλλακτικά καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως άμεσοι αντικαταστάτες των συμβατικών καυσίμων αεριωθούμενων αεροσκαφών χωρίς να απαιτείται καμία τροποποίηση των κινητήρων αεροσκαφών ή της υποδομής καυσίμων (Kramer, et al., 2022). Αυτά τα καύσιμα έχουν παρόμοιες χημικές και φυσικές ιδιότητες με τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούν τα αεροσκάφη και μπορούν να αναμιχθούν με αυτά, επιτρέποντας την απρόσκοπτη ενσωμάτωση στα υπάρχοντα συστήματα. Αποτελούν τα κύρια εναλλακτικά καύσιμα που διατίθενται στην αγορά και προτιμώνται από τον κλάδο των αερομεταφορών, καθώς δεν απαιτούν σημαντικές αλλαγές στην υπάρχουσα υποδομή και μπορούν εύκολα να υιοθετηθούν. Η χρήση βιώσιμων καυσίμων drop-in είναι ζωτικής σημασίας για τον τομέα των αερομεταφορών προκειμένου να επιτύχει τους στόχους του για απαλλαγή από τις εκπομπές άνθρακα και να μειώσει τα αέρια του θερμοκηπίου.

Από την άλλη πλευρά, τα καύσιμα αεροσκαφών non-drop-in είναι βιώσιμα καύσιμα που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά με τα συμβατικά καύσιμα αεριωθούμενων ή αυτόνομα χωρίς τροποποιήσεις στους κινητήρες, τα συστήματα καυσίμων ή την υποδομή καυσίμων. Αυτό σημαίνει ότι τα καύσιμα χωρίς πτώση έχουν ιδιότητες που διαφέρουν σημαντικά από τα συμβατικά καύσιμα αεριωθούμενων αεροσκαφών, γεγονός που τα καθιστά ασυμβίβαστα με την υπάρχουσα αεροπορική υποδομή. Ως αποτέλεσμα, απαιτούν ειδική υποδομή και προσαρμογές κινητήρων για χρήση στην αεροπορία. Αυτές οι τροποποιήσεις μπορεί να είναι δαπανηρές και χρονοβόρες, γεγονός που καθιστά τα καύσιμα χωρίς πτώση λιγότερο ελκυστικά από τα προηγούμενα. Επομένως, απαιτούν σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και τροποποιήσεις κινητήρων, καθιστώντας τα λιγότερο ελκυστικά για τον κλάδο των αερομεταφορών. Παρ' όλα αυτά, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα non-drop-in καύσιμα ενδέχεται να εξακολουθούν να διαδραματίζουν ρόλο στον κλάδο των αερομεταφορών, ειδικά καθώς αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες και υποδομές για την υποστήριξη της χρήσης τους. Για τον λόγο αυτό οι έρευνες για την παραγωγή και αξιοποίησή τους συνεχίζεται (Okolie, et al., 2023).

Τα βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα (SAF) μπορούν να παραχθούν από διάφορες πρώτες ύλες, όπως λιγνοκυτταρινική βιομάζα, φυτικά έλαια, λάσπη λυμάτων, φύκια, δασοκομικά προϊόντα και υπολείμματα ξύλου, λιγνίνη, αστικά στερεά απόβλητα (MSW), ενεργειακές καλλιέργειες και ζωικά λίπη. Τα χρησιμοποιημένα μαγειρικά λάδια είναι επίσης ένα κατάλληλο βιολογικό απόβλητο για την παραγωγή SAF μέσω της διαδικασίας Υδροεπεξεργασμένων Εστέρων και Λιπαρών Οξέων (HEFA). (Bhatt, et al., 2023; Sacchi, et al., 2023; Okolie, et al., 2023). Στην επιστημονική έρευνα έχουν εξεταστεί διάφορες οδοί και τεχνολογίες, όπως η αεριοποίηση και η σύνθεση Fischer-Tropsch και η γρήγορη πυρόλυση βιομάζας.

Γενικότερα, συνιστάται η ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής SAF που χρησιμοποιούν πρώτες ύλες χαμηλών εκπομπών άνθρακα, όπως καύσιμο αλκοόλης σε αεριοθούμενο, αεριοποίηση και διαδικασία Fischer-Tropsch και η υδροεπεξεργασία άμεσων σακχάρων σε υδρογονάνθρακες, για την επίτευξη απαλλαγής από τον άνθρακα στα καυσαέρια της αεροπορικής βιομηχανίας. Παρά το ενδιαφέρον για το SAF ως μονοπάτι προς την απαλλαγή από τον άνθρακα της αεροπορικής βιομηχανίας, οι μελέτες που σχετίζονται με το SAF εξακολουθούν να μην είναι πολλές. Στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας οι Okolie *et al.* (2023), αναφέρουν ότι ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) εκτιμά ότι εάν η παραγωγή SAF αναπτυχθεί βιώσιμα, θα είναι σε θέση να καλύψει το 10% της παγκόσμιας ζήτησης αεροπορικών καυσίμων μέχρι το 2030. Όμως, το 2019, μόνο το 1% από τα 363 δισεκατομμύρια λίτρα αεροπορικών καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν στην αεροπορία SAF.

Οι ερευνητές εφάρμοσαν ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων (MCDS) και κατέταξαν κατά σειρά σπουδαιότητας πέντε διαφορετικές μεθόδους παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροσκαφών (SAF): την παραγωγή από υδροεπεξεργασμένους εστέρες και λιπαρά οξέα (HEFA), της αεριοποίησης και της διαδικασίας Fischer-Tropsch (GFT), της μεθόδου αλκοόλης στο τζετ (Alcohol to Jet-ATJ), της άμεσης μετατροπής σακχάρων σε υδρογονάνθρακες (DSHC) και της γρήγορης πυρόλυσης (FP). Οι τεχνολογίες επιλέχθηκαν με βάση το επίπεδο ωριμότητας και το ερευνητικό τους ενδιαφέρον. Η μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποίησαν (MCDS) υποδεικνύει ότι η παραγωγή από υδροεπεξεργασμένους εστέρες και λιπαρά οξέα (HEFA) εξασφάλισε την υψηλότερη βαθμολογία και αξιολόγηση και αποτελεί τη προτιμώμενη οδό. Αν και απαιτείται περαιτέρω ερευνητική κατεύθυνση για την ανάπτυξη καταλυτών και την επιλογή πρώτης ύλης.

Παρότι πολλοί ερευνητές έχουν ερευνήσει την ανάπτυξη εναλλακτικών οδών για την παραγωγή SAF, για να βοηθήσουν την απαλλαγή από τον άνθρακα της αεροπορικής βιομηχανίας, η εξέλιξη δεν είναι αυτή που θα αναμενόταν προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος που θέτει η IEA. Αυτό συμβαίνει επειδή η παραγωγή SAF είναι επί του παρόντος πιο ακριβή από την παραγωγή συμβατικών καυσίμων αεροσκαφών, γεγονός που την καθιστά δύσκολη για τις αεροπορικές εταιρείες να στραφούν σε SAF. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, είναι απαραίτητη η διερεύνηση διαφορετικών ολοκληρωμένων τεχνολογικών εξελίξεων που μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής αεροπορικών καυσίμων (Bergero, et al., 2023). Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν βελτιώσεις στην παραγωγή πρώτων υλών, τις διαδικασίες μετατροπής και τους καταλύτες, καθώς και τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία της παραγωγικής διαδικασίας. Μόνο με την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής SAF, θα γίνει πιο ανταγωνιστικό με τα συμβατικά αεροπορικά καύσιμα, καθιστώντας πιο ελκυστικό για τις αεροπορικές εταιρείες να στραφούν σε SAF και να μειώσουν τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Okolie, et al., 2023).

Ένα πρόβλημα που αξίζει να συζητηθεί είναι ότι τα βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα έχουν χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα, αλλά χρησιμοποιούν γεωργικές πρώτες ύλες πρώτης γενιάς, γεγονός που δημιουργεί μια αντιστάθμιση μεταξύ της χρήσης βιομάζας για τρόφιμα και ζωοτροφές και της χρήσης της ως πρώτης ύλης για την παραγωγή ενέργειας. Οι γεωργικές πρώτες ύλες πρώτης γενιάς είναι καλλιέργειες που καλλιεργούνται ειδικά για την παραγωγή καυσίμων, όπως καλαμπόκι, ζαχαροκάλαμο και σόγια. Η χρήση αυτών των πρώτων υλών για την παραγωγή καυσίμων μπορεί να οδηγήσει σε ανταγωνισμό με την παραγωγή τροφίμων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των τιμών των τροφίμων και σε ελλείψεις τροφίμων σε ορισμένες περιοχές. Αυτή η αντιστάθμιση μεταξύ παραγωγής τροφίμων και καυσίμων αποτέλεσε μείζονα ανησυχία για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και τους ερευνητές, καθώς μπορεί να έχει σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις (UN, 2022).

Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, διερευνώνται εναλλακτικές πρώτες ύλες, όπως η ζύμωση αερίων, η οποία μπορεί να μετατρέψει τα αέρια του θερμοκηπίου σε καύσιμα χρησιμοποιώντας μικροβιακά ακετογόνα. Οι Rodriguez *et al.* (2023) προτείνουν ότι νέες μέθοδοι για την παραγωγή SAF που περιλαμβάνουν τη μέθοδο χορήγησης αλκοόλης στο τζετ (Alcohol to Jet - ATJ), αποτελούν τεχνικά εφικτές

διαδικασίες που μπορούν να προμηθεύσουν βιοκαύσιμα αεροσκαφών σε εμπορική κλίμακα. Στην μέθοδο που εξετάζουν, η ζύμωση του αερίου προσφέρει μια πιο εφικτή πορεία προς την επιβράδυνση της κλιματικής αλλαγής, καθώς δεν ανταγωνίζεται την παραγωγή τροφίμων και μπορεί να χρησιμοποιήσει απόβλητα αερίων από την παραγωγή τροφίμων και τα απόβλητα τροφίμων.

Οι ερευνητές διερεύνησαν εναλλακτικές λύσεις παραγωγής βιοκαυσίμων χρησιμοποιώντας το ακετογόνο *Clostridium autoethanogenum* για την παραγωγή ισοβουτανόλης από απόβλητα αέρια $CO/CO_2 + H_2$ (εικόνα 2). Οι πιο βιώσιμες μέθοδοι παραγωγής βιοκαυσίμων περιλαμβάνουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ή πηγών αποβλήτων, που οδηγεί σε διεργασίες ουδέτερες ή αρνητικές ως προς τον άνθρακα.



Εικόνα 2: Παραγωγή βιοκαυσίμων με χρήση βιοτεχνολογικά τροποποιημένων μικροοργανισμών (Rodriguez, et al., 2023).

3.2.2. Αντιστάθμιση άνθρακα

Η αεροπορική βιομηχανία χρησιμοποιεί διάφορες επιλογές αντιστάθμισης άνθρακα για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από τα αεροσκάφη. Όπως έχει ήδη αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα, μια επιλογή είναι το πρόγραμμα αντιστάθμισης και μείωσης του άνθρακα για τη διεθνή αεροπορία

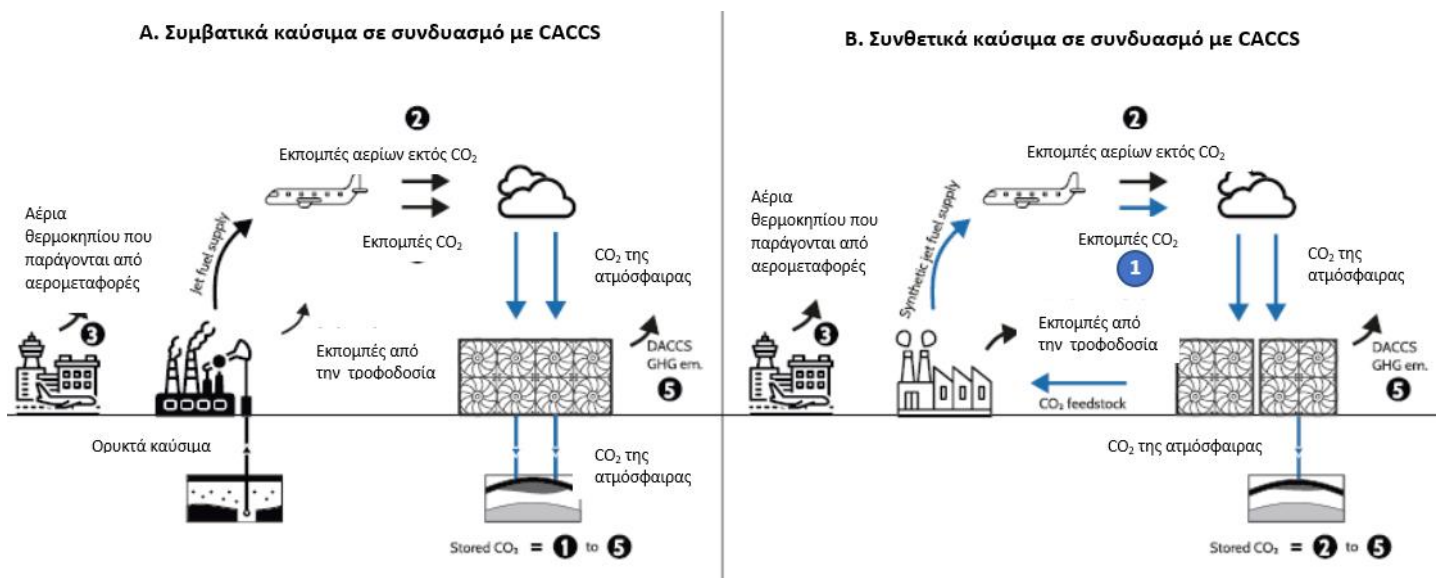
(CORSA), που ξεκίνησε από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO). Η CORSIA στοχεύει στην τόνωση της ζήτησης και της παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροσκαφών (SAF) και στη μείωση της αύξησης των αεροπορικών ταξιδιών. Μια άλλη επιλογή που προτείνεται είναι ένα σύστημα αναφοράς CO₂, το οποίο καθορίζει δείκτες αναφοράς έντασης εκπομπών ανά ομάδα δρομολογίων και επιτρέπει στις αεροπορικές εταιρείες να πωλούν άδειες εάν λειτουργούν πιο αποτελεσματικά από τους δείκτες αναφοράς, και να αγοράζουν άδειες εάν δεν πληρούν τα κριτήρια αναφοράς μέσω του Συστήματος εμπορίας εκπομπών της ΕΕ (EU ETS).

Επιπλέον, προτείνεται η χρηματοδότηση δραστηριοτήτων που ευνοούν την απομάκρυνση του CO₂ από την ατμόσφαιρα, όπως οι επενδύσεις σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πρωτοβουλίες αναδάσωσης και υποστήριξη βιώσιμων γεωργικών πρακτικών. Οι επιλογές αυτές παρέχουν ευκαιρίες στον κλάδο των αερομεταφορών να μετριάσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και να συμβάλει στην επίτευξη των παγκόσμιων κλιματικών στόχων. Σε Ευρωπαϊκό και Παγκόσμιο επίπεδο, τα τελευταία χρόνια διερευνάται έντονα η ανακύκλωση άνθρακα σε συνθετικά καύσιμα χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως μέσο επίτευξης ουδετερότητας άνθρακα. Η δέσμευση του άνθρακα από την ατμόσφαιρα αποτελεί μια πολύ φιλόδοξη πολιτική που προωθείται από τους διεθνείς οργανισμούς και την Ευρωπαϊκή Ένωση και συγκεντρώνει το ενδιαφέρον και της επιστημονικής κοινότητας.

Στην βιβλιογραφία αναφέρονται τεχνολογίες άμεσης σύλληψης αέρα (DAC), όπως η προσρόφηση ταλάντευσης θερμοκρασίας (TSA) και το υδατικό διάλυμα υψηλής θερμοκρασίας (HT-Aq) DAC, που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από την ατμόσφαιρα. Αυτές οι τεχνολογίες DAC χρησιμοποιούν μηχανικά συστήματα και χημικές ουσίες, όπως στερεά απορροφητικά και υγρούς διαλύτες, για να δεσμεύουν CO₂ από τον αέρα, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να αποθηκευτεί μόνιμα σε γεωλογικούς σχηματισμούς, γνωστούς ως συστήματα άμεσης δέσμευσης αέρα και αποθήκευση άνθρακα (DACCS) ή να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων αεροσκαφών. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να βοηθήσει στην αντιστάθμιση των κλιματικών επιπτώσεων της αεροπορίας αφαιρώντας τις εκπομπές CO₂ από τον αέρα και αποθηκεύοντάς τις υπόγεια. Το κόστος της απομάκρυνσης CO₂ μέσω της DAC αναμένεται να μειωθεί με την πάροδο του χρόνου, αλλά παραμένει ακριβό. Η μελλοντική ανάπτυξη των

τεχνολογιών DAC εξαρτάται από παράγοντες όπως η χρήση ενέργειας και η πολιτική υποστήριξη των σχεδίων αυτών (Abdullatif, et al., 2023).

Οι Sacchi *et al.* (2023), μελέτησαν ένα σύστημα απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα του ατμοσφαιρικού αέρα και μετατροπής του σε συνθετικά καύσιμα (syn-jet). Αυτό το καύσιμο παράγεται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία που ονομάζεται DACCU, η οποία σημαίνει άμεση δέσμευση του CO₂ αέρα και χρησιμοποίησή του. Σε αυτή τη διαδικασία, το CO₂ που προσλαμβάνεται από τον αέρα αντιδρά με υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης νερού. Τα υπολείμματα από την παραγωγή αυτού του καυσίμου αντισταθμίζονται από μια διαδικασία άμεσης δέσμευσης αέρα και αποθήκευση άνθρακα (DACCS). Αυτό σημαίνει ότι τυχόν πρόσθετες εκπομπές CO₂ που προκύπτουν από την παραγωγή του καυσίμου αποθηκεύονται, αντί να απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Η χρήση καυσίμου syn-jet θεωρείται ως ένας τρόπος μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα της αεροπορίας, το οποίο συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Χρησιμοποιώντας CO₂ που συλλαμβάνεται από τον αέρα και αντισταθμίζοντας τυχόν εναπομένουσες επιπτώσεις, το καύσιμο syn-jet μπορεί να παραχθεί με τρόπο που να είναι κλιματικά ουδέτερος. Στη συνέχεια συνέκριναν την διαδικασία αυτή με την απομάκρυνση του άνθρακα της ατμόσφαιρας χωρίς τη παραγωγή του syn-jet (εικόνα 3).



Εικόνα 3. Σύγκριση δύο συστημάτων (Sacchi, et al., 2023).

Τα αποτελέσματα της έρευνά τους δείχνουν ότι η χρήση καυσίμου syn-jet αντί για ορυκτά καύσιμα αεριωθουμένων μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη απαίτηση για

αποθήκευση CO₂. Η μείωση της απαίτησης αποθήκευσης CO₂ μπορεί να είναι έως και 45% εάν το καύσιμο syn-jet χρησιμοποιείται υπό μια αυξανόμενη τροχιά ζήτησης. Ωστόσο, η χρήση καυσίμου syn-jet εξαρτάται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Αυτό σημαίνει ότι για τη χρήση καυσίμου syn-jet, πρέπει να προστεθούν δυνατότητες παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ο λόγος για αυτό είναι ότι το καύσιμο syn-jet παράγεται με τη μετατροπή βιομάζας ή άλλων ανανεώσιμων πηγών σε υγρό καύσιμο.

Αυτή η διαδικασία μετατροπής απαιτεί ενέργεια και εάν η ενέργεια που χρησιμοποιείται δεν προέρχεται από πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα, μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές εκπομπές άνθρακα. Επομένως, για να καταστεί το καύσιμο syn-jet βιώσιμη επιλογή για την αεροπορία, είναι απαραίτητο να παραχθεί με ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ηλιακή, αιολική ή υδροηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τη διαδικασία μετατροπής. Τα αποτελέσματα αυτά υποστηρίζουν και άλλες έρευνες σχετικά με την απομάκρυνση του ατμοσφαιρικού άνθρακα είτε για την αποθήκευσή του είτε για την αξιοποίησή του σε συνθετικά καύσιμα (Abdullatif, et al., 2023; Sanchez, et al., 2023).

Εναλλακτικά, η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας μπορεί να επιτευχθεί με βιολογικό τρόπο με την τεχνολογία της βιολογικής παραγωγής ενέργειας με δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα Bio-Energy with Carbon Capture and Storage (BECCS). Το BECCS είναι μια τεχνολογία αρνητικών εκπομπών (NET) που αφαιρεί το CO₂ από την ατμόσφαιρα μέσω της φωτοσύνθεσης των φυτών και το αποθηκεύει σε γεωλογικές δεξαμενές. Ο Sebos (2022), στην μελέτη του αναφέρει ότι ένας αριθμός τεχνολογιών BECCS έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία, συμπεριλαμβανομένης της Hydrogen Bio-Energy with Carbon Capture and Storage (HyBECCS). Το HyBECCS εστιάζει στην παραγωγή βιο-υδρογόνου από βιογενές υλικό μέσω ηλεκτρόλυσης, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον στην ίδια μελέτη εκτιμάται ότι μια πιθανή πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμων, η οποία θα μπορούσε να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς των χερσαίων πηγών βιοκαυσίμων και να καλύψει τις παγκόσμιες απαιτήσεις καυσίμων μεταφορών στο μέλλον, είναι τα φύκια. Ωστόσο, βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο προόδου και απαιτείται περαιτέρω εργασία προκειμένου να ενισχυθεί η οικονομική σκοπιμότητα του τομέα των βιοκαυσίμων των φυκιών. Ένας άλλος ταχέως

εξελισσόμενος τομέας διεθνούς έρευνας είναι η παραγωγή βιοκαυσίμων μέσω μηχανικής ανάπτυξης κυανοβακτηρίων (Sebos, 2022).

Ένα σημείο που πρέπει να τονιστεί σε σχέση με τα βιοκαύσιμα, αφορά και την πραγματική προέλευση του άνθρακα που θα δεσμευτεί. Ο Sebos (2022), στην μελέτη του αναφέρει ότι παρά τη βιολογική του προέλευση, μέρος του άνθρακα των βιοκαυσίμων μπορεί να έχει ορυκτή προέλευση, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής τους, και ως εκ τούτου σχετίζεται με «μη ουδέτερες» εκπομπές CO₂. Αυτό αναγνωρίστηκε στις κατευθυντήριες γραμμές του 2006 IPCC για τις εθνικές απογραφές αερίων θερμοκηπίου, οι οποίες τονίζουν τη σημασία της αξιολόγησης της προέλευσης των βιοκαυσίμων ειδικά για το σκοπό της διάκρισης μεταξύ ορυκτών και βιογενών πρώτων υλών. Οι κατευθυντήριες γραμμές της IPCC του 2006 παρέχουν ορισμένα παραδείγματα της ορυκτής προέλευσης που σχετίζεται με τα βιοκαύσιμα (στο Sebos, 2022).

Ο ερευνητής αναπτύσσει μια μέθοδο για τον τρόπο εκτίμησης των άμεσων εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την καύση της περιεκτικότητας σε ορυκτά άνθρακα των βιοκαυσίμων, καλύπτοντας όλους τους πιθανούς τύπους βιοκαυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων. Η προτεινόμενη μέθοδος θεωρείται «υψηλότερης βαθμίδας» (ο όρος «βαθμίδα» αντιπροσωπεύει το επίπεδο μεθοδολογικής πολυπλοκότητας), καθώς βασίζεται σε λεπτομερή δεδομένα σχετικά με τον τύπο και την προέλευση των βιοκαυσίμων. Με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, κατέστη δυνατό να εκτιμηθούν, ως μελέτη περίπτωσης, οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με το ορυκτό μέρος των βιοκαυσίμων στην ΕΕ-27. Υπολογίστηκαν ότι ήταν περίπου 5,2 Mt CO₂ το έτος 2019. Αυτές οι εκπομπές CO₂ είναι του ίδιου μεγέθους με τις συνολικές εθνικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου καθενός από τα μικρότερα κράτη μέλη της ΕΕ, δηλαδή της Μάλτας και της Κύπρου. Επιπλέον, αντιστοιχούν στο 0,13% περίπου των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της ΕΕ-27 (Sebos, et al., 2021)

3.2.3. Ηλεκτρικά, υβριδικά και υδρογονοκίνητα αεροσκάφη

Καθοδηγούμενες από τις πρωτοβουλίες αειφορίας στον τομέα των αερομεταφορών, οι αναδυόμενες τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης και υδρογονοκίνησης αεροσκαφών έχουν αναγνωρισθεί ως η πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την υλοποίηση βιώσιμης και απελευθερωμένης από τον άνθρακα αεροπορίας. Ο τομέας της πολιτικής αεροπορίας αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία όσον αφορά τη βιωσιμότητα, συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών, οικονομικών και

κοινωνικών πτυχών. Η υψηλή χρήση και κατανάλωση ορυκτών καυσίμων στους τομείς της ενέργειας και των μεταφορών αυξάνει τις εκπομπές ρύπων, με αποτέλεσμα σοβαρές αρνητικές εξωτερικές επιδράσεις και περιβαλλοντική υποβάθμιση. Από τη μία πλευρά, η απόκτηση νέων βιώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί πρόκληση. Από την άλλη πλευρά, απαιτείται συνεχής εξόρυξη και καύση ορυκτών καυσίμων για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων, αλλά με σοβαρές περιβαλλοντικές συνέπειες (Bergero, et al., 2023; IATA, 2023; IPCC, 2023).

Σε αυτό το πλαίσιο, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση νέων συστημάτων πρόωσης με ηλεκτρισμό και υδρογόνο που παράγονται από πηγές πρωτογενούς ενέργειας χαμηλών εκπομπών, ιδιαίτερα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ως εναλλακτικό καύσιμο στα μέσα μεταφοράς αντί των ορυκτών καυσίμων, καθώς και ως αποθήκη ενέργειας για την εξασφάλιση αξιόπιστης και συνεχούς παροχής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ένας αυξανόμενος αριθμός μελετών, αναφέρει ότι ο ηλεκτρισμός και το υδρογόνο θα μπορούσε να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια στρατηγική βιώσιμης ενέργειας, η οποία, αφενός, μειώνει αποτελεσματικά την απειλή της κλιματικής αλλαγής, ενώ παρέχει επίσης καύσιμο μηδενικών εκπομπών για τις μεταφορές, καθώς επιτρέπουν μια σταδιακή μετάβαση μακριά από την εξάντληση των πόρων ορυκτών καυσίμων (Chen, et al., 2022; ICAO, 2022; Yusaf, et al., 2023; Zhang, et al., 2023).

Για να μειωθεί το αποτύπωμα άνθρακα του αεροπορικού τομέα, η ηλεκτροκίνητη πρόωση αεροσκαφών (EAP) έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Το EAP περιλαμβάνει την παραγωγή, διανομή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας στο αεροσκάφος για την εξάλειψη των εκπομπών άμεσης καύσης κατά τη διάρκεια της πτήσης. Έχει επίσης τη δυνατότητα να βελτιώσει την απόδοση του αεροσκάφους, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συμβάλει στη μείωση των έμμεσων εκπομπών CO₂ από την ηλεκτρική ενέργεια επί του σκάφους, προσφέροντας περαιτέρω ανακούφιση στις επίγειες ενεργειακές υποδομές με την ενσωμάτωση ανανεώσιμων και βιώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακή, αιολική και υδρογόνο (Buticchi, et al., 2023).

Η αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η διαμόρφωση του συστήματος πρόωσης ηλεκτρικού αεροσκάφους (EAP), η απόδοση των ηλεκτρικών εξαρτημάτων του και οι συγκεκριμένες αποστολές πτήσης για τις οποίες χρησιμοποιείται. Το βάρος αποτελεί κρίσιμη ανησυχία για τα συστήματα EAP, καθώς πρέπει να λαμβάνουν υπόψη το

πρόσθετο βάρος των μπαταριών, των ηλεκτρικών μηχανών, των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος και της δομικής ανάπτυξης. Οι μπαταρίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά ως εναλλακτική πηγή ενέργειας για συστήματα αυτά, έχουν σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα αεριωθούμενων αεροσκαφών. Αυτό σημαίνει ότι οι ενσωματωμένες μπαταρίες αυξάνουν σημαντικά το βάρος του συστήματος πρόωσης. Σε αντίθεση με τα καύσιμα τζετ, οι μπαταρίες δεν χάνουν μάζα κατά τη διάρκεια αποστολών πτήσης, πράγμα που σημαίνει ότι η έλξη που προκαλείται από το βάρος τους ενισχύεται περαιτέρω κατά τη διάρκεια αποστολών μεγάλης εμβέλειας. Ως αποτέλεσμα, οι πλήρως ηλεκτρικές διαμορφώσεις των συστημάτων ΕΑΡ είναι κατάλληλες μόνο για την τροφοδοσία ορισμένων τύπων αεροσκαφών, όπως αεροσκάφη κάθετης απογείωσης και προσγείωσης, αεροσκάφη μετακίνησης και μικρά αεροσκάφη που μεταφέρουν μόνο λίγους επιβάτες (Zhang, et al., 2023).

Λαμβάνοντας υπόψη διάφορους τύπους αεροσκαφών, έχουν προταθεί διάφορα αρχιτεκτονικές ΕΑΡ: αεροσκάφη με περισσότερα ηλεκτρικά μέρη (ΜΕΑ), υβριδικά ηλεκτρικά αεροσκάφη (ΗΕΑ) και πλήρως ηλεκτρικά αεροσκάφη (ΑΕΑ). Στο πλαίσιο των ΜΕΑ, η πρόωση παράγεται από έναν συμβατικό κινητήρα τζετ. Ωστόσο, όλα τα δευτερεύοντα συστήματα (υδραυλικά, πνευματικά και ενεργοποίηση) είναι εξηλεκτρισμένα. Σε αρχιτεκτονικές με περαιτέρω αύξηση της ηλεκτροδότησης, οι ηλεκτρικοί κινητήρες μπορούν να παρέχουν πρόωση με την ηλεκτρική ισχύ που παρέχεται από τον συμβατικό κινητήρα (ΗΕΑ) ή από την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΕΑ). Οι ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος και οι ηλεκτρικές μηχανές διαδραματίζουν βασικό ρόλο σε αυτό το σενάριο στο οποίο η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται, να διανέμεται και να καταναλώνεται αποτελεσματικά για την ικανοποίηση εξαιρετικά υψηλών απαιτήσεων ασφάλειας της αεροπορίας (Buticchi, et al., 2023).

Στην μελέτη τους οι Zhang *et al.* (2023), εξέτασαν τα πιθανά οφέλη από τη μείωση του άμεσου λειτουργικού κόστους (DOC) μέσω της ηλεκτροκίνησης της πρόωσης αεροσκαφών. Εστιάζοντας σε υβριδικά ηλεκτρικά αεροσκάφη (ΗΕΑ) έδειξαν ότι οι πτήσεις μικρών αποστάσεων μπορούν να επωφεληθούν σημαντικά από αυτήν την προσέγγιση, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της καύσης καυσίμου και των εκπομπών άνθρακα. Ωστόσο, η μελέτη σημειώνει επίσης ότι η επίτευξη οικονομικής αποτελεσματικότητας για τις πτήσεις μεγάλων αποστάσεων θα απαιτούσε περισσότερα κίνητρα και σενάρια περιβαλλοντικής πολιτικής με υψηλό φόρο άνθρακα.

Επιπλέον, το κόστος των τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης των αεροσκαφών θα πρέπει να είναι χαμηλότερο για να καταστεί βιώσιμη επιλογή για πτήσεις μεγάλων αποστάσεων. Η μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία της συνεκτίμησης τόσο των οικονομικών όσο και των περιβαλλοντικών παραγόντων κατά την αξιολόγηση της σκοπιμότητας της ηλεκτροκίνησης της πρόωσης αεροσκαφών.

Σήμερα, τα ΜΕΑ είναι ενοποιημένα προϊόντα που εξυπηρετούν χιλιάδες πτήσεις μεγάλων αποστάσεων. Επιπλέον, τα πρώτα πλήρως ηλεκτρικά αεροσκάφη (ΑΕΑ) έχουν αρχίσει να πιστοποιούνται και να εμπορεύονται. Οι κύριοι παράγοντες του κλάδου και τα πανεπιστήμια έχουν προτείνει επίσης λύσεις για συστήματα μετάδοσης κίνησης υψηλής ισχύος για παραγωγή ενέργειας και ηλεκτρική πρόωση για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των περιφερειακών αεροσκαφών. Είναι πλέον προφανές ότι αυτό που ξεκίνησε ως απλή ηλεκτροδότηση επιλεγμένων υποσυστημάτων σε συμβατικά αεροσκάφη θα οδηγήσει σύντομα στην ευρεία χρήση των ηλεκτρικών αεροσκαφών ως μέρος της καθημερινής πραγματικότητας (Buticchi, et al., 2023).

Εκτός από την εισαγωγή της ηλεκτροκίνησης στα συστήματα πρόωσης ή σε συνδυασμό με αυτή, τα τελευταία χρόνια εξετάζεται και η χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτική επιλογή για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας. Δίπλα στις μπαταρίες και τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για την απανθρακοποίηση του συστήματος αεροπορικών μεταφορών. Η βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου είναι συγκρίσιμη με τα υπάρχοντα καύσιμα αεριωθουμένων, κατά συνέπεια, τα υδρογονοκίνητα αεροσκάφη μπορούν ενδεχομένως να καλύψουν τυπικές αποστάσεις στην αεροπορία (Mueller & Gronau, 2023). Το υδρογόνο είναι ένας δευτερεύων φορέας ενέργειας και μπορεί να παραχθεί από διάφορες πηγές πρωτογενούς ενέργειας. Για παράδειγμα, μπορεί να δημιουργηθεί με ηλεκτρόλυση, η οποία δεν προκαλεί άμεσες εκπομπές όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό το αποκαλούμενο πράσινο υδρογόνο θεωρείται βιώσιμο και θεωρείται από πολλούς ως αναπόσπαστο μέρος της ενεργειακής μετάβασης (Huete, et al., 2021).

Ένας αυξανόμενος αριθμός μελετών προτείνουν το υδρογόνο ως πιθανή λύση στην παγκόσμια ενεργειακή κρίση και αναφέρουν ότι το υδρογόνο μπορεί να είναι ένα κρίσιμο στοιχείο σε μια βιώσιμη ενεργειακή στρατηγική που μπορεί να μετριάσει αποτελεσματικά τους κινδύνους της κλιματικής αλλαγής. Το υδρογόνο θεωρείται καύσιμο μηδενικών εκπομπών, πράγμα που σημαίνει ότι δεν παράγει επιβλαβείς

ρύπους ή αέρια θερμοκηπίου όταν χρησιμοποιείται ως πηγή καυσίμου. Η χρήση υδρογόνου ως καυσίμου για μεταφορές μπορεί να συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης από την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, οι οποίοι είναι πεπερασμένοι και μη ανανεώσιμοι. Έτσι, η σταδιακή μετάβαση προς το καύσιμο υδρογόνου μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία ενός πιο βιώσιμου και φιλικού προς το περιβάλλον συστήματος μεταφορών και στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα του αεροπορικού τομέα, ο οποίος συμβάλλει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Τα θετικά αποτελέσματα διαφόρων ερευνών και η ανάπτυξη νέων μονάδων κινητήρα που μπορούν να φιλοξενήσουν οικονομικές κυψέλες καυσίμου υδρογόνου δείχνουν ότι το υδρογόνο είναι μια βιώσιμη επιλογή για βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα (Yusaf, et al., 2023).

Η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, η οποία χρησιμοποιεί υδρογόνο για την παραγωγή ενέργειας ενώ δεν εκπέμπει αέρια θερμοκηπίου και μόνο νερό, έχει ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον ως καύσιμο μεταφοράς. Το υδρογόνο είναι ένα καύσιμο υψηλής απόδοσης και φιλικό προς το περιβάλλον. Η καύση του δεν εκπέμπει αέρια θερμοκηπίου, χημικές ουσίες που καταστρέφουν το όζον και ελάχιστα έως καθόλου συστατικά όξινης βροχής ή ρύπανση. Το υδρογόνο που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή, αιολική κ.λπ.) θα είχε ως αποτέλεσμα ένα μόνιμο ενεργειακό σύστημα που δεν θα χρειαζόταν ποτέ να αλλάξει (Eissele, et al., 2023).

Αυτή η δυναμική αντικατοπτρίζεται από μια γόνιμη ακαδημαϊκή βιβλιογραφία που ασχολείται με διάφορες πτυχές της αεροπορίας που κινούνται με υδρογόνο. Ένα ερευνητικό σκέλος αξιολογεί τις διαφορετικές δυνατότητες εφαρμογής του υδρογόνου στα αεροσκάφη. Για παράδειγμα, το υδρογόνο μπορεί να συνδυαστεί με κυψέλες καυσίμου για την τροφοδοσία υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης. Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροσκαφών (SAF). Επιπλέον, το υγρό υδρογόνο μπορεί να εφαρμοστεί σε κινητήρες αεροσκαφών για άμεση καύση. Εκτός από το δυναμικό εφαρμογής του, οι μελετητές έχουν αντιμετωπίσει αρκετά σημεία συμφόρησης που πρέπει να ξεπεραστούν για να υλοποιηθεί η υδρογόνου αεροπορία (Mueller & Gronau, 2023):

(1) Οι τεχνολογικές προκλήσεις, που περιλαμβάνουν τροποποιήσεις στο σχεδιασμό αεροσκαφών, την ανάπτυξη νέων συστημάτων πρόωσης και την ενσωμάτωση κατάλληλων δεξαμενών υδρογόνου.

(2) Η επίγεια υποδομή που είναι απαραίτητη για να τροφοδοτήσει τα αεροσκάφη, καθώς εκφράζονται ανησυχίες για την ασφάλεια που σχετίζεται με τη διαχείριση του υδρογόνου.

(3) Η τρέχουσα έλλειψη ανταγωνιστικότητας λόγω του υψηλού κόστους σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα αεριωθουμένων έχει αποκαλυφθεί σε τεχνοοικονομικές έρευνες.

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι το υψηλό κόστος των μεθόδων παραγωγής υδρογόνου που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ενώ το υδρογόνο είναι ένα καθαρό και βιώσιμο καύσιμο, η παραγωγή του απαιτεί πολλή ενέργεια και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξακολουθούν να είναι δαπανηρές. Μια άλλη πρόκληση είναι η έλλειψη υποδομής για καύσιμα υδρογόνου. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά καύσιμα όπως η βενζίνη και το ντίζελ, το καύσιμο υδρογόνου απαιτεί διαφορετικό είδος υποδομής για αποθήκευση, μεταφορά και διανομή. Αυτή η υποδομή δεν είναι ακόμη ευρέως διαθέσιμη, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη χρήση του υδρογόνου ως κύρια επιλογή καυσίμου. Τα προβλήματα με την αποθήκευση υδρογόνου είναι επίσης μια σημαντική πρόκληση. Το υδρογόνο είναι ένα πολύ εύφλεκτο αέριο και η αποθήκευσή του με ασφάλεια απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και διαδικασίες. Οι τρέχουσες μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου δεν είναι πολύ αποτελεσματικές και μπορεί να είναι δαπανηρές και πολύπλοκες.

Τέλος, η απαίτηση αλλαγής του σχεδιασμού του αεροσκάφους είναι μια άλλη πρόκληση. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου απαιτούν διαφορετικό είδος μονάδας κινητήρα από τους παραδοσιακούς κινητήρες καύσης, πράγμα που σημαίνει ότι οι κατασκευαστές αεροσκαφών πρέπει να επανασχεδιάσουν τα αεροπλάνα τους για να προσαρμόσουν αυτή τη νέα τεχνολογία. Αυτό μπορεί να είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία, η οποία έχει επιβραδύνει την υιοθέτηση αεροσκαφών με υδρογόνο (Yusaf, et al., 2023).

3.2.4 Αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας των αερομεταφορών

Επειδή η τεχνολογική καινοτομία από μόνη της είναι απίθανο να μειώσει τις εκπομπές σύμφωνα με τους στόχους απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές, είναι απαραίτητη η ορθολογική λειτουργία όλου του συστήματος που τις ελέγχει, ο συντονισμός με τις πολιτικές που επιδρούν στην συμπεριφορά των επιβατών και τη συνεργασία και συντονισμό των δράσεων σε όλους τους τομείς που αφορούν την κλιματική αλλαγή (Gössling & Dolnicar, 2023). Παράλληλα, αποτελεί αναγκαιότητα η

ολοκληρωμένη εφαρμογή των δράσεων σε δύο επίπεδα: τόσο στην μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του πλανήτη (μέτρα μετριασμού), όσο και στην ανάπτυξη δράσεων που αποσκοπούν στην προσαρμογή των ανθρώπινων κοινωνιών στην νέα πραγματικότητα (μέτρα προσαρμογής), καθώς η κλιματική αλλαγή είναι ένα γεγονός. Διαμορφώνεται λοιπόν η ανάγκη λήψης κοινών μέτρων προσαρμογής και μετριασμού για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Kyriakopoulos & Sebos, 2023).

Η αποτελεσματικότερη λειτουργία των αεροσκαφών για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους κατά τη διάρκεια παραμονής του αεροσκάφους στο αεροδρόμιο. Μια προσέγγιση είναι η βελτιστοποίηση των ουρών διαδρόμου και η μείωση των καθυστερήσεων απογείωσης, οι οποίες μπορούν να γίνουν με τον προσδιορισμό του χρόνου που αφιερώνει ένα αεροσκάφος στην ουρά και την επικοινωνία αυτών των πληροφοριών στον τερματικό ελεγκτή (Mayer & Ding, 2023). Μια άλλη μέθοδος είναι να διερευνηθούν λύσεις νέας τεχνολογίας, όπως μη συμβατικές δομικές λύσεις, απογείωση και προσγείωση με μαγνητική διείδυση (maglev) και έννοια διαμόρφωσης χωρίς σύστημα προσγείωσης, η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας (Quan, et al., 2023). Επιπλέον, η βελτίωση της απόδοσης καυσίμου των αεροσκαφών κατά τη λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση του χρόνου λειτουργίας στο έδαφος, τη μείωση του βάρους απογείωσης και την επιλογή βέλτιστων τρόπων πλοήγησης (Chen, et al., 2022).

Οι στρατηγικές για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου άρα και την μείωση των εκπομπών, σε διαφορετικές φάσεις της πτήσης μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως τον τύπο του αεροσκάφους, τις επιχειρησιακές διαδικασίες και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Μερικές κοινές στρατηγικές περιλαμβάνουν (Kurdekar, 2023; Quan, et al., 2023; Sacchi, et al., 2023):

1. Τον σχεδιασμό πριν από την πτήση: Ο προσεκτικός σχεδιασμός πτήσεων μπορεί να βελτιστοποιήσει τις διαδρομές, τα υψόμετρα και τις ταχύτητες για να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση καυσίμου. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αποφυγή περιττών παρακάμψεων και τη βελτιστοποίηση της χρήσης ευνοϊκών μοτίβων ανέμου.
2. Αποτελεσματική απογείωση: Οι πιλότοι μπορούν να ακολουθήσουν βελτιστοποιημένα προφίλ απογείωσης, όπως η χρήση μειωμένης ώθησης και η

διατήρηση ιδανικών ταχυτήτων αέρα, για να ελαχιστοποιηθεί η καύση καυσίμου κατά την ανάβαση σε μεγαλύτερα υψόμετρα.

3. Βελτιστοποίηση της διαδρομής: Η χρήση τεχνικών όπως η αναρρίχηση με σκαλοπάτια, η βελτιστοποίηση υψομέτρου και ταχύτητας και η πτήση σε πιο αποδοτικό εναέριο χώρο μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη φάση της διαδρομής.

4. Διαχείριση καθόδου: Οι πιλότοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν ώθηση σε αδράνεια, βελτιστοποιημένες διαδρομές καθόδου και προσεγγίσεις συνεχούς καθόδου για να μειώσουν την καύση καυσίμου κατά τη φάση της καθόδου.

5. Τεχνικές προσγείωσης: Η χρήση τεχνικών όπως η ανάστροφη ώθηση σε αδράνεια, η ελαχιστοποίηση της τροχοδρόμησης και η αποτελεσματική χρήση των επίγειων υπηρεσιών μπορεί να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά την προσγείωση και τις λειτουργίες ταξί (η κίνηση του Αεροσκάφους στην επιφάνεια ενός αεροδρομίου χρησιμοποιώντας τη δική του ισχύ).

6. Μείωση βάρους: Η προσεκτική εξέταση του ωφέλιμου φορτίου, του φορτίου καυσίμου και του περιττού εξοπλισμού μπορεί να μειώσει το βάρος του αεροσκάφους και στη συνέχεια να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι στρατηγικές υπόκεινται σε κανονιστικές απαιτήσεις, επιχειρησιακές εκτιμήσεις και συγκεκριμένους περιορισμούς αεροσκαφών. Κάθε αεροπορική εταιρεία και αερομεταφορέας μπορεί να έχει το δικό της σύνολο μέτρων εξοικονόμησης καυσίμων προσαρμοσμένων στις ιδιαίτερες ανάγκες του. Μπορούν όμως να έχουν αποτέλεσμα και κατά τη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας με βάση την ελάχιστη κατανάλωση υδρογόνου για μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα υβριδικών κυψελών καυσίμου με χρήση αλγόριθμου βέλτιστης αναζήτησης τροφοδοσίας πρόβλεψης κατεύθυνσης. Αυτή η στρατηγική, στοχεύει στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του οχήματος προβλέποντας την κατεύθυνση κίνησης και προσδιορίζοντας την πιο αποτελεσματική διαδρομή. Χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο για την πρόβλεψη της κατεύθυνσης με βέλτιστη τροφοδοσία καυσίμου, η στρατηγική στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης υδρογόνου και στην παράταση του χρόνου πτήσης του μη επανδρωμένου εναέρια οχήματος (Quan, et al., 2023).

Αντίστοιχες διαδικασίες μπορούν να εφαρμοστούν για την αλλαγή του υψομέτρου πτήσης και τη βελτιστοποίηση των διαδρομών πτήσης. Η πτήση σε μεγαλύτερα υψόμετρα μπορεί να αυξήσει την ακτινοβολία των επιπτώσεων κυρίως

των αερίων εκτός CO₂, αλλά επίσης οδηγεί σε ελαφρά μείωση των εκπομπών CO₂ και των επιπτώσεων τους. Από την άλλη πλευρά, η πτήση σε χαμηλότερα υψόμετρα μειώνει την ακτινοβολία των επιδράσεων εκτός CO₂ και μειώνει την αλλαγή θερμοκρασίας που προκαλείται από την αεροπορία. Η βελτιστοποίηση των διαδρομών πτήσης για την αποφυγή περιοχών όπου οι εκπομπές έχουν τον μεγαλύτερο αντίκτυπο μπορεί επίσης να μειώσει σημαντικά τις συνολικές κλιματικές επιπτώσεις της αεροπορίας (Matthes, et al., 2021).

Επειδή οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου παράγονται από τα αεροσκάφη σε ποικίλες ποσότητες ανάλογα με τις συνθήκες του καυστήρα, έχουν μια χωροχρονικά ευαίσθητη κλιματική απόκριση, πράγμα που σημαίνει ότι η καθαρή επιβάρυνσή τους στην ατμόσφαιρα ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος στις οποίες εκπέμπονται. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ανθρωπογενείς καθώς και φυσικές διαταραχές στην χημεία της ατμόσφαιρας, Η μεταφορά των αερίων αυτών στο νέφος των καυσαερίων για αρκετές ώρες μετά την εκπομπή τους, οδηγεί σε τοπικά υψηλές συγκεντρώσεις. Αυτό αναγκάζει τα δραστικά είδη αερίων να υποστούν μια μη γραμμική χημική και μικροφυσική επεξεργασία, που συμβαίνει στην κλίμακα του νέφους, η οποία στη συνέχεια επηρεάζει την καθαρή κλιματική τους απόκριση όταν διαδίδεται σε παγκόσμια κλίμακα (Grewé, et al., 2021).

Μέτρα όπως η βέλτιστη για το κλίμα δρομολόγηση αεροσκαφών και η πτήση σχηματισμού παρουσιάζουν τη δυνατότητα για σημαντική μείωση των κλιματικών επιπτώσεων σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ απαιτούν ελάχιστες τεχνολογικές αλλαγές στον τρέχοντα στόλο και την επίγεια υποδομή. Ακόμη και μικρές αλλαγές στη δρομολόγηση, οι οποίες αν και μπορεί να αυξήσουν το λειτουργικό κόστος, είναι δυνατό να οδηγήσουν σε σημαντικές μειώσεις των κλιματικών επιπτώσεων. Η εφαρμογή του βελτιστοποιημένου για το κλίμα σχεδιασμού πτήσεων παγκοσμίως θα απαιτούσε την υπέρβαση των προκλήσεων, αλλά είναι μια εφικτή επιλογή (Hasan, et al., 2021).

Η βέλτιστη για το κλίμα δρομολόγηση αεροσκαφών, περιλαμβάνει την εκ νέου δρομολόγηση αεροσκαφών κατά το ταξίδι τους για την αποφυγή περιοχών της ατμόσφαιρας που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε κλιματικές επιδράσεις των αερίων που εκπέμπονται, όπως τα NO_x που προκαλούν υπερβολική παραγωγή όζοντος ή σε περιοχές στις οποίες σχηματίζονται επίμονα ίχνη συμπύκνωσης. Οι προσπάθειες προσομοίωσης έχουν προτείνει ότι αυτή η μέθοδος έχει τη δυνατότητα να μειώσει τον αντίκτυπο της αεροπορίας στο κλίμα κατά 10-20%, με κόστος μόνο ένα μικρό ποσοστό

της πρόσθετης κατανάλωσης καυσίμου (Tait, et al., 2022). Επιπλέον, ο αντίκτυπος των αερίων του θερμοκηπίου από τις αερομεταφορές δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλες τις αποστάσεις της πτήσης, πράγμα που σημαίνει ότι ο επιχειρησιακός μετριάσμος θα πρέπει να στοχεύει σε διαδρομές που προκαλούν τον ελάχιστο αντίκτυπο.

Ωστόσο, η εφαρμογή διαδικασιών δρομολόγησης βέλτιστων για το κλίμα στον πραγματικό κόσμο απαιτεί να αντιμετωπιστούν πρώτα ορισμένα ζητήματα. Οι Gewe *et al.* (2021), όρισαν τέσσερα βασικά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν:

1. Η ακρίβεια και η ευρωστία στον προσδιορισμό των οικολογικά αποδοτικών τροχιών πτήσης πρέπει να βελτιωθούν, και αυτό πρέπει να είναι δυνατό σχεδόν σε πραγματικό χρόνο.

2. Πρέπει να επιτευχθεί συναίνεση ως προς τον προσδιορισμό του βαθμού στον οποίο θα πρέπει να αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα ψύξης (π.χ. η σκόπιμη πτήση σε μια διαδρομή που δημιουργεί ένα ίχνος ψύξης θα μπορούσε να θεωρηθεί ως περιττή παρέμβαση στη φύση).

3. Οι επιπτώσεις της βέλτιστης για το κλίμα δρομολόγησης σε όλο τον στόλο στο σύστημα διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας πρέπει να αξιολογούνται αυστηρά, ώστε να διασφαλίζεται η διατήρηση της ασφάλειας, της τάξης και της αποτελεσματικότητας.

4. Πρέπει να υιοθετηθεί ένα μέτρο ή μια οδός πολιτικής, που δεν θα βασίζεται στην αγορά ή στο CO₂ αλλά στο σύνολο των αερίων, για να δοθεί κίνητρο για αυτήν τη μετάβαση προς ένα βελτιστοποιημένο για το κλίμα δίκτυο εναέριας κυκλοφορίας.

Μια άλλη παράμετρος που σχετίζεται με την λειτουργία και την πολιτική των αερομεταφορών αφορά την εκπαίδευση των επιβατών και των επιχειρήσεων στην διαμόρφωση της συμπεριφοράς τους απέναντι στην χρήση των προϊόντων της. Σε πολλές επιστημονικές αναφορές και εκθέσεις των διεθνών οργανισμών αναφέρεται ως στόχος για τον μετριάσμο των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, η μείωση στον αριθμό των πτήσεων, ειδικά σε διαδρομές υψηλής κίνησης (Bergero, et al., 2023; Chen, et al., 2022; IATA, 2023). Η αλλαγή συμπεριφοράς αναφέρεται στις αλλαγές στη συμπεριφορά ατόμων ή ομάδων ως απάντηση σε μια συγκεκριμένη κατάσταση ή πρόβλημα. Στο πλαίσιο των αεροπορικών ταξιδιών και της κλιματικής αλλαγής, η αλλαγή συμπεριφοράς αναφέρεται στις αλλαγές που μπορούν να κάνουν τα άτομα ή οι επιχειρήσεις στη συμπεριφορά των αεροπορικών ταξιδιών τους για να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακα (Gössling & Dolnicar, 2023).

Ένας από τους τρόπους για να επιτευχθεί αλλαγή συμπεριφοράς στα αεροπορικά ταξίδια είναι μέσω της αποφυγής πτήσεων. Αυτό σημαίνει την επιλογή εναλλακτικών μέσων μεταφοράς όπως για παράδειγμα τα τρένα, που εμφανίζουν μικρότερο κλιματικό αποτύπωμα (Sacchi, et al., 2023). Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα που σχετίζονται με τα αεροπορικά ταξίδια. Η επιλογή αποτελεσματικών επιλογών πτήσης είναι ένας άλλος τρόπος για να επιτευχθεί αλλαγή συμπεριφοράς. Αυτό σημαίνει την επιλογή αεροπορικών εταιρειών που χρησιμοποιούν πιο αποδοτικά αεροσκάφη ή την επιλογή απευθείας πτήσεων αντί για πτήσεις με ανταπόκριση, οι οποίες μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές άνθρακα που σχετίζονται με τα αεροπορικά ταξίδια (Klöwer, et al., 2021). Η αντιστάθμιση άνθρακα είναι ένας τρίτος τρόπος για να επιτευχθεί αλλαγή συμπεριφοράς. Αυτό σημαίνει αντιστάθμιση των εκπομπών άνθρακα που σχετίζονται με τα αεροπορικά ταξίδια, επενδύοντας σε έργα που μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα, όπως έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή έργα αναδάσωσης. Συνολικά, η αλλαγή συμπεριφοράς είναι μια σημαντική πτυχή της μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα των αεροπορικών ταξιδιών. Κάνοντας συνειδητές επιλογές σχετικά με τη συμπεριφορά τους στα αεροπορικά ταξίδια, τα άτομα μπορούν να συμβάλουν στην παγκόσμια προσπάθεια μείωσης των εκπομπών άνθρακα και μετριασμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. (Gössling & Dolnicar, 2023)

Μια σειρά από επιπρόσθετες δράσεις μπορούν να ενισχύσουν τον στόχο αυτό. Μια βιώσιμη πολιτική προμηθειών για παράδειγμα, που δίνει προτεραιότητα σε τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών και βιώσιμες τεχνολογίες για την απόκτηση νέων αεροσκαφών και συναφούς εξοπλισμού. Η προσφορά οικονομικών κινήτρων ή επιχορηγήσεων σε εταιρείες και ερευνητικά ιδρύματα που εργάζονται σε καινοτόμες πράσινες τεχνολογίες για πολιτικά ή στρατιωτικά αεροσκάφη, μπορεί να τονώσει την καινοτομία και να οδηγήσει στην ταχύτερη υιοθέτηση λύσεων φιλικών προς το κλίμα. Η ενθάρρυνση της διεθνούς συνεργασίας και της ανταλλαγής γνώσεων μεταξύ των εθνών για την επιτάχυνση της τεχνολογικής προόδου. Οι συνεργατικές προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης μπορούν να οδηγήσουν σε ταχύτερη υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών και τεχνολογιών σε ολόκληρο τον τομέα των αερομεταφορών (Mayer & Ding, 2023).

Η συνεργασία δεν αρκεί να περιλαμβάνει μόνο τους εταίρους των αερομεταφορών, αλλά όλους τους τομείς που παρεμβαίνουν στην διαμόρφωση της κλιματικής αλλαγής, με σκοπό τη λήψη προληπτικών ανθρώπινων ενεργειών για τον

μετριασμό της σοβαρότητας των κλιματικών αλλαγών. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ληφθούν μέτρα για να μειωθούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο περιβάλλον και στις ανθρώπινες κοινωνίες και να βοηθήσουν στην προστασία τους. Για παράδειγμα, η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη της τήξης των παγετώνων και της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, η οποία μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις στις παράκτιες κοινότητες.

Οι δράσεις που θα εφαρμοστούν, πρέπει επίσης να έχουν μια ολιστική προσέγγιση, να ικανοποιούν παράλληλα δύο συνθήκες: την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την προσαρμογή στις αλλαγές του κλίματος που ήδη συμβαίνουν. Στην πορεία αυτή, η συνεργασία του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα είναι απαραίτητη για τη μόχλευση πόρων και εμπειρογνωμοσύνης για πιο αποτελεσματικές δράσεις μετριασμού και προσαρμογής. Αυτό σημαίνει ότι οι κυβερνήσεις, οι επιχειρήσεις και τα άτομα πρέπει να συνεργαστούν για να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις που θέτει η κλιματική αλλαγή. Απαιτείται συντονισμένη και στρατηγική προσέγγιση για την ιεράρχηση αυτών των δράσεων σε διαφορετικές κλίμακες. Και οι τρεις αυτοί εταίροι, θα πρέπει να συμμετέχουν στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου σχεδίου, που θα λαμβάνει υπόψη τους διάφορους παράγοντες που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή και θα προσδιορίζει τους αποτελεσματικότερους τρόπους αντιμετώπισής τους. Ακολουθώντας μια συντονισμένη προσέγγιση, μπορούν να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη της δράσης για το κλίμα και να διασφαλιστεί μια συντονισμένη απάντηση σε αυτήν την παγκόσμια πρόκληση (Kyriakopoulos & Sebos, 2023).

4. ΠΟΛΕΜΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΟΥΔΕΤΕΡΟΤΗΤΑ

Μια σημαντική ποσότητα ορυκτών καυσίμων χρησιμοποιούνται κάθε χρόνο στο όνομα της εθνικής ή παγκόσμιας ασφάλειας και γίνεται ολοένα και πιο δύσκολο να αγνοηθεί ο αντίκτυπος τους στο περιβάλλον. Η ακριβής συμβολή των στρατών του κόσμου στις παγκόσμιες κλιματικές εκπομπές δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί λόγω περιορισμένου υπολογισμού και αναφοράς, καθώς δεν περιλαμβάνονται στις διεθνείς εκθέσεις. Υπάρχουν όμως πολλές αναφορές ότι οι στρατοί του κόσμου εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου (Depledge, 2023; NATO, 2022; Rajaeifar, et al., 2022; Belcher, et al., 2019).

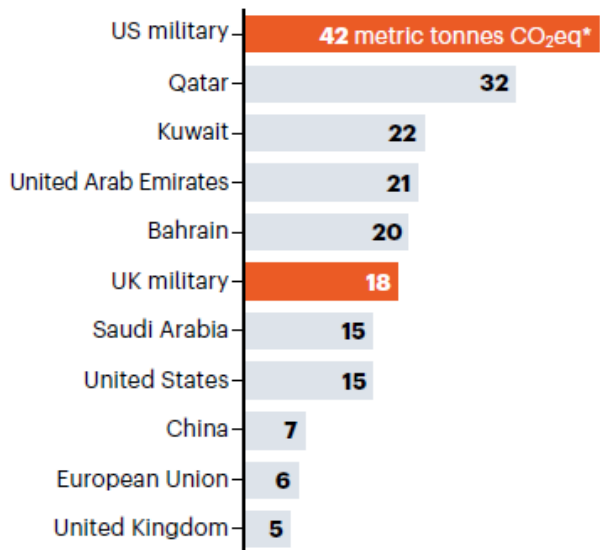
Παρά τις προκλήσεις, εκτιμάται ότι οι συνολικές εκπομπές άνθρακα των ενόπλων δυνάμεων του κόσμου και των βιομηχανιών που τις εξοπλίζουν θα μπορούσαν να συμβάλουν έως και το 5% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Depledge, 2023). Αυτή η εκτίμηση βασίζεται στο γεγονός ότι οι στρατιωτικές επιχειρήσεις απαιτούν τεράστια ποσότητα ενέργειας, η οποία προέρχεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα. Το αποτύπωμα άνθρακα του στρατού περιλαμβάνει όχι μόνο τις άμεσες εκπομπές από στρατιωτικές επιχειρήσεις αλλά και τις εκπομπές από την παραγωγή και μεταφορά στρατιωτικού εξοπλισμού και προμηθειών. Είναι προφανές ότι ο στρατός έχει την ευθύνη να μειώσει το αποτύπωμα άνθρακα και τη μετάβαση σε πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας για τον μετριασμό των επιπτώσεων των επιχειρήσεων του στο περιβάλλον.

Οι Rajaeifar *et al.* (2022), εκτιμούν ότι οι στρατοί είναι υπεύθυνοι για ένα ποσοστό μεταξύ 1% και 5% των παγκόσμιων εκπομπών, εκπομπές συγκρίσιμες με τις αεροπορικές και ναυτιλιακές βιομηχανίες (2% η καθεμία) του κόσμου. Ωστόσο, τα κράτη και οι στρατιωτικοί οργανισμοί δεν είναι σε μεγάλο βαθμό υποχρεωμένοι να αναφέρουν τις εκπομπές αυτές. Αυτό είναι κάτι που πρέπει να αλλάξει, διαφορετικά τα μέτρα μετριασμού κινδυνεύουν να γίνουν απλώς εικασίες. Για παράδειγμα, ο στρατός των ΗΠΑ είναι ο μεγαλύτερος στον κόσμο όσον αφορά τις δαπάνες σε ορυκτά καύσιμα. Αν ήταν έθνος, οι δυνάμεις των ΗΠΑ θα είχαν τις υψηλότερες κατά κεφαλήν εκπομπές στον κόσμο, με 42 μετρικούς τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂eq) ανά μέλος του προσωπικού (Εικόνα 4). Για κάθε 100 ναυτικά μίλια που διανύουν, τα χαρακτηριστικά μαχητικά αεροσκάφη F-35 της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ εκπέμπουν τόσο CO₂ το κάθε ένα (2,3 μετρικοί τόνοι CO₂eq), όσο ένα μέσο βρετανικό

βενζινοκίνητο αυτοκίνητο που οδηγείται για ένα χρόνο. Κάθε χρόνο, μόνο η χρήση καυσίμου αεριωθουμένων από τον αμερικανικό στρατό παράγει εκπομπές που ισοδυναμούν με έξι εκατομμύρια επιβατικά αυτοκίνητα των ΗΠΑ (Rajaeifar, et al., 2022).

Οι πολιτικές και οι δράσεις για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα στρατιωτικά αεροσκάφη εξετάζονται σε πολλαπλά επίπεδα διακυβέρνησης, συμπεριλαμβανομένου του τοπικού, εθνικού, πολυεθνικού και παγκόσμιου επιπέδου. Με την αυξανόμενη ανησυχία για την κλιματική αλλαγή και την ανάγκη για βιώσιμες πρακτικές, η επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας έχει καταστεί κρίσιμος στόχος σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένου του τομέα της πολεμικής αεροπορίας. Οι πολιτικές και οι δράσεις για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα στρατιωτικά αεροσκάφη είναι υψίστης σημασίας στο πλαίσιο των παγκόσμιων προσπάθειών για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής (NATOa, 2023).

Σύμφωνα με διάφορες μελέτες, ο τομέας των αερομεταφορών, συμπεριλαμβανομένων των στρατιωτικών αεροσκαφών, συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και προβλέπεται να καταλαμβάνει ένα αυξανόμενο μερίδιο του παγκόσμιου προϋπολογισμού βιώσιμων εκπομπών (Gossling & Humpe, 2020; Klöwer, et al., 2021). Δεδομένου του πιθανού αντίκτυπου των στρατιωτικών αεροσκαφών στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν πολιτικές και δράσεις που προάγουν την κλιματική ουδετερότητα σε αυτόν τον τομέα, αντίστοιχες με αυτές που αναλύθηκαν για την πολιτική αεροπορία στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως προειδοποίησε ο Γενικός Γραμματέας του NATO Γενς Στόλτενμπεργκ στη Σύνοδο Κορυφής του ΟΗΕ για το κλίμα (COP26) στη Γλασκώβη: «Δεν υπάρχει τρόπος να φτάσουμε στο καθαρό μηδέν χωρίς να συμπεριληφθούν και οι εκπομπές από τον στρατό». Επίσης, δήλωσε στο συνέδριο: «Δεν μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ πράσινων ή ισχυρών ενόπλων



Εικόνα 4. Τα δεδομένα χρήσης καυσίμου δείχνουν ότι οι ένοπλες δυνάμεις των ΗΠΑ και του Ηνωμένου Βασιλείου εκπέμπουν τόσο κατά κεφαλήν CO₂ όσο πολλές χώρες με ένταση άνθρακα (Rajaeifar, et al., 2022).

δυνάμεων, χρειαζόμαστε ισχυρές και πράσινες ταυτόχρονα. Αλλά είμαι απολύτως βέβαιος ότι στο μέλλον, τα πιο αποτελεσματικά, τα καλύτερα αεροπλάνα, τα καλύτερα πλοία, τα καλύτερα στρατιωτικά οχήματα, θα τροφοδοτούνται από κάτι διαφορετικό από τα ορυκτά καύσιμα. Δεν θα εκπέμπουν» (Depledge, 2023).

4.1 Υφιστάμενες Πολιτικές για την Κλιματική Ουδετερότητα στη πολεμική αεροπορία

Στη Σύνοδο Κορυφής του NATO στις Βρυξέλλες το 2021, οι Συμμαχικοί Αρχηγοί Κρατών και Κυβερνήσεων συμφώνησαν ένα Σχέδιο Δράσης για την Κλιματική Αλλαγή και την Ασφάλεια με στόχο να γίνει το NATO ο κορυφαίος διεθνής οργανισμός όσον αφορά την κατανόηση και την προσαρμογή στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην ασφάλεια. Παρέχει μια προσέγγιση 360 μοιρών, που περιλαμβάνει μέτρα για την αύξηση της ευαισθητοποίησης των Συμμάχων για τον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής στην ασφάλεια. Υπογραμμίζει την ανάγκη για σαφή μέτρα προσαρμογής και μετριασμού, καθώς και ενισχυμένη προσέγγιση, διασφαλίζοντας παράλληλα μια αξιόπιστη στάση αποτροπής και άμυνας (NATOa, 2023). Ως αποτέλεσμα της Συνόδου αυτής, το NATO εξέδωσε κατευθυντήριες γραμμές για την διαμόρφωση Σχεδίων Δράσης από τα κράτη μέλη του που κινήθηκαν σε τέσσερις άξονες:

A. Ευαισθητοποίηση

Ορισμένοι Σύμμαχοι εισήγαγαν την έννοια της κλιματικής αλλαγής ως πολλαπλασιαστική απειλή στις εθνικές και αμυντικές τους πολιτικές. Οι δημόσιες εθνικές αξιολογήσεις κινδύνου υπογραμμίζουν και αναλύουν βασικούς κινδύνους που έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν κρίσεις που υπερβαίνουν κατά πολύ αυτό που μπορεί να διαχειρίζεται τοπικά ή με συνηθισμένους καθημερινούς πόρους. Αυτά τα προφίλ κινδύνου συχνά περιέχουν τυπικά συμβάντα που σχετίζονται με το κλίμα, π.χ. καύσωνες και ξηρασία, καταιγίδες και τυφώνες, παράκτιες πλημμύρες και ακραίες βροχοπτώσεις και μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τον προγραμματισμό ετοιμότητας.

Τα εθνικά σχέδια δράσης για την ενεργειακή μετάβαση στον τομέα της άμυνας καθορίζουν την προσέγγιση, τις αρχές, τις συνθήκες και τα μέτρα που επιτρέπουν να καταστούν οι αμυντικοί οργανισμοί πιο βιώσιμοι με στοχευμένο τρόπο, λαμβάνοντας δεόντως υπόψη τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους και τα καθήκοντα των ενόπλων δυνάμεων. Οι αμυντικοί προϋπολογισμοί ενισχύονται σε ολόκληρη τη Συμμαχία για τη χρηματοδότηση των μέτρων που απαριθμούνται στα Σχέδια Δράσης, δηλαδή για την υλοποίηση των ευνοϊκών συνθηκών για την ενεργειακή μετάβαση, για

την πραγματοποίηση μελετών και πιλοτικών έργων και για την ενσωμάτωση της βιωσιμότητας με μεγαλύτερη σαφήνεια στη διεξαγωγή τακτικών δραστηριοτήτων .

B. Προσαρμογή

Οι Σύμμαχοι επανεξετάζουν τα εθνικά τους σχέδια αντιμετώπισης κρίσεων για την αντιμετώπιση ακραίων καιρικών φαινομένων, συμπεριλαμβανομένων των τομέων της παροχής ενέργειας, νερού και τροφίμων. Οι εθνικές ασκήσεις δοκιμάζουν την ανθεκτικότητα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, των κρίσιμων υποδομών και του ενεργειακού τους μείγματος. Μέσω της Κλιματικής Αλλαγής και της Αξιολόγησης Επιπτώσεων στην Ασφάλεια του NATO, εντοπίστηκαν μια σειρά από μέτρα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, από τη μετασκευή και τη βελτίωση της ανθεκτικότητας της υποδομής έως την αλλαγή του επιχειρησιακού σχεδιασμού και των προγραμμάτων εκπαίδευσης. Ορισμένες χώρες του NATO δημιούργησαν συνεργασίες δημόσιου-ιδιωτικού τομέα, για να παρέχουν μια στρατηγική και ολοκληρωμένη προσέγγιση για να ανταποκριθούν στις ενεργειακές και περιβαλλοντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την άμυνα. Οι συμμαχίες στρατηγικής άμυνας και μη στρατιωτικών ενδιαφερομένων μπορούν να ενσωματώσουν ευκολότερα διεθνή αμυντικά προγράμματα, παγκόσμιες αμυντικές αλυσίδες αξίας και έργα έρευνας και ανάπτυξης στους τομείς της βιώσιμης κινητικότητας, της προστασίας του περιβάλλοντος, της ενεργειακής απόδοσης και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Γ. Μείωση

Πολλοί Σύμμαχοι έχουν δημιουργήσει σχέδια δράσης για να πλαισιώσουν τις προσπάθειές τους για τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Συχνά, αυτές οι πολιτικές καθορίζουν στόχους μείωσης των αερίων θερμοκηπίου (GHG) για το 2030 και περιλαμβάνουν ενδεικτικές τροχιές και στόχους για το 2040 και το 2050. Συνήθως, οι εθνικές προσπάθειες για τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής περιλαμβάνουν συγκριτική αξιολόγηση των εκπομπών και των πόρων που χρησιμοποιούνται σε δραστηριότητες που σχετίζονται με την άμυνα (καύσιμα κατανάλωση, παραγωγή αποβλήτων, ενεργειακή δαπάνη, χρήση πυρομαχικών, κατανάλωση νερού, χημικά, τυχαίες εκπομπές κ.λπ.). Η συλλογή, ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων δίνει τη δυνατότητα στα αμυντικά ιδρύματα να θέτουν στόχους και στρατηγικές μείωσης.

Στο πλαίσιο του Προγράμματος Επιστήμης για την Ειρήνη και την Ασφάλεια (SPS) του NATO, οι ερευνητές εργάζονται για την ανάπτυξη τεχνολογίας για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένης της

ανάπτυξης πράσινου υδρογόνου και ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένες Συμμαχικές Κυβερνήσεις έχουν εισαγάγει περιβαλλοντικά κριτήρια για την προμήθεια διαφορετικών τύπων προϊόντων και υπηρεσιών. Η ενεργειακή απόδοση γίνεται κριτήριο για την ανάπτυξη νέου στρατιωτικού εξοπλισμού. Οι συμμαχικοί αμυντικοί οργανισμοί διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη μετάβαση δοκιμάζοντας συγκεκριμένες λύσεις. Παραδείγματα αυτού περιλαμβάνουν:

- πειράματα με τη χρήση υδρογόνου σε drones μεγάλης εμβέλειας για θαλάσσια επιτήρηση.
- τη χρήση βιοκαυσίμων στους τομείς πτήσης, ιστιοπλοΐας και οδήγησης.
- την ανακαίνιση των αμυντικών κτισμάτων σύμφωνα με τις αρχές και τα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης και με τη χρήση καινοτόμων τεχνικών αστικής κατασκευής.
- την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.
- τη χρήση έξυπνων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας που οδηγούν σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.
- την ανάπτυξη νέων υποβρύχιων σπύλλερ που μειώνουν την κατανάλωση καυσίμου στα περιπολικά πλοία.
- τη χρήση πιο οικονομικών κινητήρων ντίζελ και ηλεκτρικών κινητήρων αντί των αεριοστροβίλων στις νέες φρεγάτες.
- Έρευνα σε ενεργειακά ανεξάρτητα στρατόπεδα, μεταξύ άλλων με τη δημιουργία «αυτοκινητόδρομου υδρογόνου» στην Ευρώπη και με την ανάπτυξη ενεργειακά αυτόνομων κόμβων υλικοτεχνικής υποστήριξης που βρίσκονται σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις για τη διασφάλιση της ενεργειακής αυτάρκειας και την υποστήριξη των πράσινων μεταφορών.
- την αυξημένη χρήση προσομοιωτών από αεροσκάφη, οχήματα ξηράς και πληρώματα υποβρυχίων.
- τη χρήση διδαγμάτων από τον πολιτικό τομέα για να γίνουν πιο αποτελεσματικές οι στρατιωτικές βαριές μεταφορές.

Το NATO ως οργανισμός έχει αναπτύξει τη δική του μεθοδολογία για τον εντοπισμό των εκπομπών που σχετίζονται με τις λειτουργίες της επιχείρησής του.

Δ. Υπέρβαση (outreach)

Οι Σύμμαχοι συνηγορούν υπέρ της ενσωμάτωσης των ανησυχιών που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή σε όλες τις δραστηριότητες του ΟΗΕ. Αρκετά έθνη είναι μέλη της Ομάδας Φίλων του ΟΗΕ για το Κλίμα και την Ασφάλεια και υποστηρίζουν

τον Μηχανισμό για το Κλίμα και την Ασφάλεια. Ο δημόσιος τομέας, η κοινωνία των πολιτών και τα ερευνητικά ιδρύματα των χωρών του NATO συμμετέχουν σε συνεργατικά δίκτυα, για να μοιράζονται γνώση, να αναζητούν καινοτόμες λύσεις, να αποκαλύπτουν παραδείγματα βέλτιστων πρακτικών και να θέτουν συλλογικούς στόχους σε σχέση με την κλιματική αλλαγή και την ασφάλεια. (NATOa, 2023)

Σε συνέχεια των προσπαθειών αυτών η Συμμαχία διατύπωσε αναλυτικές οδηγίες για τη χαρτογράφηση και την αναλυτική μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία και τις επιχειρήσεις του (NATOb, 2023). Στο έγγραφο αυτό συζητά την ανάγκη για το NATO να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις ασφάλειας που σχετίζονται με το κλίμα και να προσαρμοστεί στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο προσωπικό, τις υποδομές και τις δυνατότητές του. Τονίζει τη διασύνδεση της ασφάλειας του κλίματος και των παραδοσιακών απειλών για την ασφάλεια, και τη σημασία της μελλοντικής θωράκισης των υποδομών και των επιχειρήσεων του NATO μέσω βιώσιμων προσεγγίσεων και εναλλακτικών ενεργειακών πόρων. Το έγγραφο υπογραμμίζει επίσης την ανάγκη για πολιτική συναίνεση μεταξύ των συμμάχων του NATO και την υποχρέωση του οργανισμού να αντιμετωπίσει το δικό του αποτύπωμα άνθρακα. Το έγγραφο παρέχει πρακτική καθοδήγηση στα κεντρικά γραφεία του NATO και στα κράτη μέλη για την εφαρμογή μέτρων προσαρμογής και μετριασμού για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας έναντι της κλιματικής αλλαγής.

Ο κατάλογος αερίων θερμοκηπίου (GHG) για τη λειτουργία και τις επιχειρήσεις του NATO βασίζεται στις συστάσεις του διεθνώς αναγνωρισμένου εταιρικού προτύπου πρωτοκόλλου GHG. Βασίζεται στις αρχές της συνάφειας, της πληρότητας, της συνέπειας, της διαφάνειας και της λογοδοσίας, όπως αναφέρονται στο Πρωτόκολλο αυτό. Καθώς το NATO αναπτύσσει τις ικανότητές του στη μέτρηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, θα επιδιώξει να χρησιμοποιήσει τα αποδεικτικά στοιχεία που συλλέγονται για να ενημερώσει τις αποφάσεις σχετικά με τη βελτίωση της επιχειρησιακής αποτελεσματικότητας, για παράδειγμα, μέσω της κατανόησης που θα μπορούσαν να τεθούν κατά προτεραιότητα οι επενδύσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Το πεδίο εφαρμογής της απογραφής των GHG είναι:

- ❖ Να παρέχει καθοδήγηση για τον υπολογισμό των εκπομπών GHG.
- ❖ Να χρησιμεύει ως πηγή για την ανάπτυξη στρατηγικών και πολιτικών για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

- ❖ Να παρέχει μια βάση για τον εντοπισμό ευκαιριών για μειώσεις των αερίων του θερμοκηπίου.
- ❖ Να παρακολουθεί την πρόοδο αυτών των πολιτικών με την πάροδο του χρόνου και,
- ❖ Να υποστηρίζει τη δημιουργία αρχείου εκπομπών, παρακολουθώντας την εξέλιξή τους σε όλο το NATO.

Οι μη στρατιωτικές και στρατιωτικές εγκαταστάσεις του NATO έχουν λάβει καθοδήγηση σχετικά με την εφαρμογή των προδιαγραφών του καταλόγου των GHG που εκπέμπονται από τη λειτουργία και τις επιχειρήσεις του. Αυτό περιλαμβάνει τη δυνατότητα πρόσβασης σε ένα γενικό εργαλείο υπολογισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύμφωνα με συγκεκριμένες οργανωτικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Καθώς όμως η προσπάθεια αυτή μόλις έχει αρχίσει, δεν υπάρχουν ακόμα ξεχωριστά δεδομένα ανά τομέα δράσης και για τον λόγο αυτό δεν αναφέρονται συγκεκριμένα στοιχεία για την συμβολή της πολεμικής αεροπορίας στην εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου (NATOb, 2023).

Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση εισήγαγε τη Στρατηγική της Πολεμικής Αεροπορίας της ΕΕ στο ολοκληρωμένο σχέδιο που αναπτύχθηκε για την προώθηση της ανάπτυξης, της ανταγωνιστικότητας και της βιωσιμότητας της αεροπορικής βιομηχανίας εντός της ΕΕ. Το σχέδιο αυτό επικεντρώνεται σε πολλούς βασικούς τομείς, όπως η βελτίωση της συνδεσιμότητας, η διασφάλιση θεμιτού ανταγωνισμού, η ενίσχυση των δικαιωμάτων και της ασφάλειας των επιβατών, η προώθηση της καινοτομίας και της ψηφιοποίησης και η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων. Η στρατηγική στοχεύει στη δημιουργία ενός πλαισίου που υποστηρίζει τη μακροπρόθεσμη ανάπτυξη του τομέα των αερομεταφορών, ενώ παράλληλα εξισορροπεί τις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές πτυχές.

Η Στρατηγική της ΕΕ για την κλιματική ουδετερότητα είναι ένα ολοκληρωμένο σχέδιο που αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση, για να διασφαλίσει ότι οι επιχειρήσεις και οι πρακτικές της στρατιωτικής αεροπορίας ευθυγραμμίζονται με τους κλιματικούς στόχους. Στοχεύει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στην προώθηση της χρήσης βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων και στην εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών και πρακτικών σε στρατιωτικά αεροσκάφη και υποδομές. Η στρατηγική δίνει επίσης έμφαση στη συνεργασία και την ανταλλαγή

γνώσεων μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στη στρατιωτική αεροπορία (EU European Defence Agency, 2022).

Την ίδια χρονιά, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ψήφισε τον χάρτη πορείας της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Εξωτερικής Δράσης (ΕΥΕΔ) για την κλιματική αλλαγή και την άμυνα, στον οποίο περιγράφει τη στρατηγική και τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης όσον αφορά τη διασταύρωση της κλιματικής αλλαγής και της άμυνας. Ορίζει τον οδικό χάρτη για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής ως πρόκληση για την ασφάλεια και υπογραμμίζει την ανάγκη για συλλογική δράση για τον μετριασμό των επιπτώσεων της στην άμυνα και τη διεθνή ασφάλεια. Το ψήφισμα στοχεύει στην προώθηση της κλιματικής ανθεκτικότητας εντός των αμυντικών δομών, στην ενσωμάτωση των προβληματισμών για την κλιματική αλλαγή στον αμυντικό σχεδιασμό και στις επιχειρήσεις και στη δημιουργία συνεργασιών για την αντιμετώπιση των κινδύνων ασφάλειας που σχετίζονται με το κλίμα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2022).

4.2 Στρατιωτικά Σχέδια Δράσης για το κλίμα

Μέσα στο πλαίσιο αυτό των περιφερειακών (ΕΕ) και διεθνών (NATO) πρωτοβουλιών πολλά κράτη ανέπτυξαν Σχέδια Δράσης για την προσαρμογή της αμυντικής λειτουργίας και υποδομών στις ανάγκες της κλιματικής αλλαγής, στα οποία συμπεριέλαβαν και προβλέψεις και σχέδια για την πορεία σε μια διαδικασία μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η διαδικασία αυτή όμως είναι ακόμα σε εξέλιξη. Οι Rajaeifar *et al.* (2022) στην μελέτη τους βρήκαν ότι από τα 27 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μόνο δέκα Υπουργεία Άμυνας είχαν επισημάνει την ανάγκη μετριασμού των αερίων του θερμοκηπίου, εκ των οποίων μόλις οι επτά είχαν θέσει στόχους. Ο Ελληνικός Στρατός για παράδειγμα, έχει διαμορφώσει τον δικό του οδικό χάρτη για τον περιορισμό των επιπτώσεων και την προσαρμογή των Ενόπλων Δυνάμεων στην κλιματική αλλαγή (ΥΠΕΘΑ, 2022), στον οποίο περιγράφονται και ορισμένες δράσεις που σχετίζονται με την πολεμική αεροπορία. Μέσα στα επόμενα χρόνια αναμένεται αυτές οι δράσεις να ποσοτικοποιηθούν και να γίνουν πιο συγκεκριμένες.

Από τις χώρες που έχουν προχωρήσει περισσότερο τον σχεδιασμό για την μείωση των επιπτώσεων της πολεμικής αεροπορίας στην κλιματική αλλαγή, ξεχωρίζουν οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Αγγλία. Ελάχιστα δεδομένα είναι διαθέσιμα από άλλα έθνη με μεγάλες ένοπλες δυνάμεις. Αυτές περιλαμβάνουν τη Ρωσία, η οποία διεξάγει πόλεμο με την Ουκρανία, την Κίνα και την Ινδία, που έχουν περισσότερο

ενεργό στρατιωτικό προσωπικό από τις Ηνωμένες Πολιτείες. Η ταχεία ανάπτυξη για τη μεγαλύτερη στρατιωτική δύναμη, την Κίνα, με τα δύο εκατομμύρια ενεργό προσωπικό της, μπορεί να αναμένεται. Πρόσφατα, ο Πρόεδρος Χι Jinping ανακοίνωσε ότι η χώρα σκοπεύει να έχει έναν «στρατό παγκόσμιας κλάσης» έως το 2049 (Rajaeifar, et al., 2022). Η Πολεμική Αεροπορία της Αγγλίας έχει θέσει ως στόχο να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα και να επιτύχει την κλιματικά ουδετερότητα μέχρι το 2040 (RAF UK, 2021). Έχει αναπτύξει μια στρατηγική πρωτοβουλιών και έργων για να επιδιώξει τη βιωσιμότητα και να μειώσει το αποτύπωμα άνθρακα, διατηρώντας παράλληλα την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα - μερικά από τα οποία περιλαμβάνουν:

- Χρήση βιώσιμων και συνθετικών καυσίμων για αεροσκάφη
- Αναβάθμιση εξοπλισμού με υδρογόνο και ηλεκτρικές εναλλακτικές λύσεις
- Ανάπτυξη ηλεκτρικών αεροσκαφών
- Εισαγωγή περιβαλλοντικών στρατηγικών
- Ανάπτυξη σταθμών διατήρησης της φύσης
- Χρήση εναλλακτικών πόρων ενέργειας
- Διασφάλιση της σύγχρονης, καλά μονωμένης και συντηρημένης υποδομής
- Διάδοση του μηνύματος «μείωση, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση».
- Ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων εργασίας
- Μείωση των πλαστικών μιας χρήσης

Δεν έχει όμως ακόμα δημοσιεύσει κάποιο αναλυτικό σχέδιο δράσης για την επίτευξη αυτών των στόχων.

Αντίθετα, η μόνη στρατιωτική δύναμη που έχει αναπτύξει ένα πιο συγκεκριμένο Σχέδιο Δράσης για την Πολεμική της Αεροπορία είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες. Ο αμερικανικός στρατός είναι σημαντικός καταναλωτής υγρών καυσίμων και εκπέμπει μεγάλη ποσότητα ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂eq) λόγω της εκτεταμένης υποδομής και των δραστηριοτήτων του τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό. Οι Belcher *et al.* (2019) υπολόγισαν ότι το 2017 ο αμερικανικός στρατός αγόρασε περίπου 269.230 βαρέλια πετρελαίου την ημέρα, με αποτέλεσμα την εκπομπή 25.375,8 ΚΤ-CO₂eq με την καύση αυτών των καυσίμων. Εάν ο αμερικανικός στρατός θεωρηθεί χώρα, η κατανάλωση καυσίμων του θα κατατάσσεται μεταξύ Περού και Πορτογαλίας στον παγκόσμιο πίνακα αγορών καυσίμων της Παγκόσμιας Τράπεζας. Ο όρος CO₂eq αναφέρεται στην ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων θερμοκηπίου που έχουν το ίδιο φαινόμενο θέρμανσης με το διοξείδιο του άνθρακα. Αυτό είναι

σημαντικό επειδή δεν έχουν όλα τα αέρια του θερμοκηπίου την ίδια επίπτωση θέρμανσης και το CO₂eq επιτρέπει μια τυποποιημένη σύγκριση.

Το Υπουργείο Πολεμικής Αεροπορίας των Ηνωμένων Πολιτειών διατύπωσε μια ευρεία λίστα με στόχους που έχουν ως σκοπό να κρατήσουν την υπηρεσία έτοιμη να διατηρήσει το αξιόμαχό της εν μέσω έντονων καιρικών συνθηκών που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή και να συνεισφέρει στον μετριασμό των επιπτώσεων της σε αυτή. Το Σχέδιο Κλιματικής Εκστρατείας είναι το τμήμα εφαρμογής του Σχεδίου Δράσης για το Κλίμα που παρουσίασε η Πολεμική Αεροπορία τον Οκτώβριο του 2022 (DAF, US, 2022). Οι στόχοι του σχεδίου περιλαμβάνουν την επίτευξη καθαρών μηδενικών εκπομπών στις εγκαταστάσεις της Πολεμικής Αεροπορίας έως το οικονομικό έτος 2046, ηλεκτρική ενέργεια 100% χωρίς εκπομπές άνθρακα σε καθαρή ετήσια βάση έως το οικονομικό έτος 2030, δοκιμή ενός πρωτοτύπου αεροσκάφους μικτών πτερυγίων πλήρους κλίμακας έως το οικονομικό έτος 2027, συμπεριλαμβανομένου τις κλιματικές εκτιμήσεις για την επαγγελματική στρατιωτική εκπαίδευση έως το δημοσιονομικό έτος 2024 και τον εντοπισμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής για επιλεγμένες αλυσίδες εφοδιασμού έως το τέλος του δημοσιονομικού έτους 2023.

Αυτό το ευρύ φάσμα στόχων αντικατοπτρίζει το εύρος του σχεδίου. Για να προετοιμαστούν αποτελεσματικά η Πολεμική Αεροπορία και η Διαστημική Δύναμη για την κλιματική αλλαγή, προβλέπονται και δράσεις προσαρμογής, ώστε να διαμορφωθούν οι εγκαταστάσεις τους ικανές να αντέχουν μελλοντικούς κλιματικούς κινδύνους, να έχουν την ικανότητα να λαμβάνουν αποφάσεις πολεμικών επιχειρήσεων ενημερωμένες για το κλίμα και να μειώσουν την επιμελητεία του τμήματος βελτιστοποιώντας τη χρήση ενέργειας και επιδιώκοντας εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Το σχέδιο εκστρατείας για το κλίμα στοχεύει να προετοιμάσει τις εγκαταστάσεις της Πολεμικής Αεροπορίας για υπερβολική ζέστη, πυρκαγιές, πλημμύρες και άλλα έντονα καιρικά φαινόμενα που επιδεινώνονται από την κλιματική αλλαγή.

Η πρώτη προτεραιότητα του σχεδίου είναι να «διατηρηθεί η κυριαρχία του αέρα και του διαστήματος έναντι των κλιματικών κινδύνων», που συνεπάγεται τον εκσυγχρονισμό των υποδομών και των εγκαταστάσεων για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας των βάσεων, την αξιολόγηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις εγκαταστάσεις του τμήματος και τη δημιουργία σχεδίων ανάπτυξης εγκαταστάσεων για την προετοιμασία από κλιματικούς κινδύνους. Πολλές από τις ημερομηνίες λήξης αυτών των δράσεων είναι μεταξύ 2023-2027, αλλά η συνολική

δράση αποσκοπεί στην προετοιμασία της Πολεμικής Αεροπορίας για την επίτευξη του στόχου του 2046 για εγκαταστάσεις καθαρών μηδενικών εκπομπών. Για να υλοποιηθούν οι δράσεις αυτές θα πρέπει πρώτα το Υπουργείο Άμυνας να αναπτύξει ένα νομοθετικό πλαίσιο για την επίτευξη αυτών των στόχων μέχρι το δημοσιονομικό έτος 2024 και στη συνέχεια, να επιδιώξει τη μείωση των εκπομπών κατά 50% από τα επίπεδα του 2008 έως το δημοσιονομικό έτος 2033.

Η δεύτερη προτεραιότητα του σχεδίου είναι να λαμβάνονται αποφάσεις συμβατές με την αλλαγή του κλίματος, πράγμα που σημαίνει ότι οι αποφάσεις να αντικατοπτρίζουν την κατανόηση των επιπτώσεων του κλίματος στην επιχειρησιακή αποστολή. Τα βήματα για την επίτευξη αυτού του στόχου περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση θεμάτων για το κλίμα στο πρόγραμμα σπουδών επαγγελματικής στρατιωτικής εκπαίδευσης του τμήματος και στην ανάπτυξη της ιδέας αυτής στην Αεροπορική και Διαστημική Δύναμη και στα επιχειρησιακά σχέδια μεγάλων πεδίων διοίκησης έως το οικονομικό έτος 2024. Οι προσομοιώσεις πολεμικών επιχειρήσεων αποτελούν μέρος της εκπαίδευσης, επομένως ένας από τους στόχους του σχεδίου είναι να ενσωματώσει τις καλύτερες εφικτές αναπαραστάσεις των φυσικών περιβαλλόντων για πιθανές μελλοντικές επιχειρήσεις μάχης, οι οποίες, θα προετοιμάσουν καλύτερα τους ηγέτες της Αεροπορικής και Διαστημικής Δύναμης για πραγματικές αποστολές. Το σχέδιο απαιτεί επίσης να φωτιστούν περισσότερο οι κίνδυνοι που σχετίζονται με το κλίμα στην αλυσίδα εφοδιασμού του Υπουργείου Πολεμικής Αεροπορίας και να ενσωματωθεί αυτή η ανάλυση στην πολιτική διαχείρισης κινδύνου της εφοδιαστικής αλυσίδας (DAF, US, 2022).

Η τρίτη προτεραιότητα, περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας και την επιδίωξη εναλλακτικών πηγών ενέργειας, με στόχο να καταστήσει λιγότερο ευάλωτες τις εφοδιαστικές αλυσίδες του Υπουργείου Πολεμικής Αεροπορίας και να εξασφαλίσει τη θέση του τμήματος συνολικά μειώνοντας τη συμβολή του στην κλιματική αλλαγή. Το σχέδιο απαιτεί τόσο την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών όσο και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του τρέχοντος εξοπλισμού και εγκαταστάσεων. Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, το σχέδιο καθορίζει μια έννοια που ονομάζεται λειτουργική ενεργειακή ένταση, η οποία μετρά πόση ενέργεια χρειάζεται για μια μονάδα για να επιτύχει τους στόχους της. Ανάλογα με τη μονάδα που εμπλέκεται, αυτή η ιδέα θα μπορούσε να λάβει τη μορφή δοκιμαστικών γεγονότων ανά γαλόνι, όπλων που απελευθερώνονται ανά γαλόνι, συμβάντων προγράμματος σπουδών ανά γαλόνι, ακόμη και εκφόρτωσης αερίου εναέριου ανεφοδιασμού ανά γαλόνι. Ένας άλλος όρος

για αυτήν την εννοιολογική μέτρηση είναι "θνησιμότητα ανά γαλόνι". Το σχέδιο απαιτεί αύξηση της λειτουργικής ενεργειακής έντασης των πτήσεων της Πολεμικής Αεροπορίας κατά 5% έως το οικονομικό έτος 2027 και 7,5% έως το 2032, εν μέρει μέσω της χρήσης τεχνολογιών μείωσης της αντίστασης αεροσκαφών, σύγχρονων εργαλείων προγραμματισμού λογισμικού και βελτιωμένων πρακτικών υποστήριξης κινητήρα.

Σε ό,τι αφορά τις εφαρμογές νέων τεχνολογιών, το Σχέδιο Δράσης προβλέπει τη δοκιμή ενός πρωτοτύπου αεροσκάφους πλήρους κλίμακας, μικτών πτερυγίων - ενός αεροσκάφους όπου η άτρακτος βοηθά τα φτερά να ανυψωθούν - έως τον Σεπτέμβριο του 2027 και την ολοκλήρωση επιτυχημένων πτήσεων του με τη χρήση βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων που κοστίζουν το ίδιο ή λιγότερο από παραδοσιακό αεροπορικό καύσιμο σε δύο επιχειρησιακές τοποθεσίες της Πολεμικής Αεροπορίας έως το φορολογικό έτος 2026. Άλλα βήματα περιλαμβάνουν την ολοκλήρωση μιας πιλοτικής εγκατάστασης πυρηνικών μικροαντιδραστήρων έως το 2028, την επίτευξη ηλεκτρικής ενέργειας 100% χωρίς ρύπανση άνθρακα σε καθαρή ετήσια βάση έως το 2030 και 100% μη τακτικές εξαγορές οχημάτων με μηδενικές εκπομπές έως το 2035.

Στο σχέδιο τονίζεται ότι η επίτευξη αυτών των στόχων δεν θα είναι δυνατή χωρίς την ανάπτυξη ενός συνόλου «διασταυρούμενων δυνατοτήτων», η πρώτη από τις οποίες είναι η συλλογή και ανάλυση δεδομένων. Σήμερα, πολλά από τα πιο σημαντικά σύνολα δεδομένων για τη μέτρηση του ενεργειακού και κλιματικού κινδύνου διαχειρίζονται σε «λειτουργικές εστίες» που περιορίζουν τη συνεργασία που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων του σχεδίου. Η Πολεμική Αεροπορία θα πρέπει επίσης να διατηρεί συστηματικά δεδομένα σε επίπεδο πτήσης για τη χρήση καυσίμων και να δημιουργεί αυτοματοποιημένες διαδικασίες ή συστήματα για τη συλλογή δεδομένων ενέργειας υποδομής. Η άλλη αναγκαία διατομεακή ικανότητα είναι οι συνεργασίες με το Γραφείο του Υπουργού Άμυνας, τον υπόλοιπο στρατό, άλλους κρατικούς φορείς, τον ιδιωτικό τομέα, τον ακαδημαϊκό κόσμο και τις σχετικές ξένες οντότητες.

4.3 Προτεραιότητες της Πολεμικής Αεροπορίας

Αναλύοντας τις εκθέσεις του NATO και τα Σχέδια Δράσης που εντοπίστηκαν, μπορούν να συγκεντρωθούν ορισμένες δράσεις που τίθενται από κοινού σε υψηλή προτεραιότητα. Μια διαπίστωση που προκύπτει είναι ότι πλέον είναι κοινά αποδεκτό από τις στρατιωτικές ηγεσίες ότι οι επιπτώσεις των στρατιωτικών αεροσκαφών στο περιβάλλον είναι ένα περίπλοκο θέμα που απαιτεί προσεκτική ανάλυση. Τα

στρατιωτικά αεροσκάφη καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες καυσίμων, παράγουν εκπομπές και προκαλούν ηχορύπανση κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων. Ωστόσο, ο στρατός επενδύει επίσης στην έρευνα και ανάπτυξη, για να βελτιώσει την απόδοση των καυσίμων και να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αεροσκαφών τους. Επιπρόσθετα, καταβάλλονται προσπάθειες για τον μετριασμό της ηχορύπανσης μέσω λειτουργικών διαδικασιών και τεχνολογικών εξελίξεων. Είναι σημαντικό να συνεχιστεί η διερεύνηση βιώσιμων λύσεων για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των στρατιωτικών αεροσκαφών διατηρώντας παράλληλα τον κρίσιμο ρόλο τους στην εθνική ασφάλεια.

Για να πετύχει στον ρόλο του αυτό θα πρέπει να αναπτύξει κάποιες δράσεις που περιλαμβάνουν:

A. Την ανανέωση στόλου και άλλες τεχνολογικές αναβαθμίσεις

Μια προσέγγιση για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα στρατιωτικά αεροσκάφη είναι μέσω της ανανέωσης του στόλου και της τεχνολογικής αναβάθμισης των παλιών που είναι ακόμα αξιόμαχα. Η ανανέωση του στόλου περιλαμβάνει την αντικατάσταση παλαιότερων, λιγότερο αποδοτικών σε κατανάλωση καυσίμων αεροσκαφών με νεότερα μοντέλα που ενσωματώνουν προηγμένες τεχνολογίες. Αυτές οι προηγμένες τεχνολογίες μπορούν να περιλαμβάνουν πιο αποδοτικούς κινητήρες καυσίμου, ελαφρύτερα πλαίσια αεροσκαφών και βελτιωμένη αεροδυναμική, τα οποία συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην αύξηση της απόδοσης καυσίμου. Αυτή η προσέγγιση ευθυγραμμίζεται με τον ισχυρισμό της Διεθνούς Ένωσης Αεροπορικών Μεταφορών και του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας, οι οποίοι υποστηρίζουν ότι οι νέοι σκελετοί και κινητήρες θα οδηγήσουν τελικά σε απόλυτες μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2035-2040.

B. Βελτιωμένη διαχείριση εναέριας κυκλοφορίας

Μια άλλη πολιτική για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα στρατιωτικά αεροσκάφη είναι η εφαρμογή βελτιωμένων συστημάτων διαχείρισης εναέριας κυκλοφορίας. Η βελτιωμένη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση των διαδρομών πτήσης, στη μείωση της συμφόρησης και στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών όπως τα συστήματα δορυφορικής πλοήγησης, ο αυτοματοποιημένος έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας και τα συνεργατικά εργαλεία λήψης αποφάσεων. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν πιο αποτελεσματικές και άμεσες

διαδρομές πτήσης, μειώνοντας τον χρόνο που αφιερώνουν τα αεροσκάφη στον αέρα και έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Γ. Υιοθέτηση Βιώσιμων Αεροπορικών Καυσίμων

Η ανάπτυξη και η υιοθέτηση βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων είναι επίσης ζωτικής σημασίας για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα στρατιωτικά αεροσκάφη. Τα αειφόρα αεροπορικά καύσιμα, όπως τα βιοκαύσιμα, μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Αυτά τα καύσιμα παράγονται από ανανεώσιμες πηγές όπως φυτά, φύκια και υλικά αποβλήτων, καθιστώντας τα μια πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση. Με την ενσωμάτωση βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων στις επιχειρήσεις στρατιωτικών αεροσκαφών, ο τομέας μπορεί να επιτύχει μια ουδέτερη θέση άνθρακα, όπου δεν υπάρχει καθαρή εκπομπή CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Εκτός από τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις, είναι σημαντικό να εφαρμοστούν πολιτικές και δράσεις που προωθούν την υιοθέτηση βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων στα στρατιωτικά αεροσκάφη. Τέλος, μια κρίσιμη πολιτική για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στα στρατιωτικά αεροσκάφη είναι η εφαρμογή αυστηρών περιβαλλοντικών κανονισμών και στόχων. Η απαίτηση για μείωση των εκπομπών αερίων, βελτιστοποίηση των επιδόσεων των αεροσκαφών και μείωση του κόστους συντήρησης έχει ωθήσει τις βιομηχανίες αεροσκαφών προς την ιδέα των περισσότερων ηλεκτρικών αεροσκαφών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα όλων των επιστημονικών ερευνών και των εκθέσεων των διεθνών οργανισμών, που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, συνηγορούν στο συμπέρασμα ότι ο τομέας των μεταφορών είναι υπεύθυνος για σημαντικό μέρος των εκπομπών CO₂ παγκοσμίως. Πολλοί επιστήμονες παρουσιάζουν βάσιμες ενδείξεις ότι είναι πιθανό ότι οι εκπομπές από τις αερομεταφορές θα συνεχίσουν να αυξάνονται, εκτός εάν εφαρμοστούν νέα καθεστώτα πολιτικής (Bergero, et al., 2023; Filho, et al., 2023; Mayer & Ding, 2023; Sebos, 2022). Σήμερα, αυτό γίνεται ολοένα και πιο βέβαιο καθώς αφενός διαπιστώνεται μια αδυναμία των πολιτικών που ήδη εφαρμόζονται, για να συγκρατήσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου από τις αερομεταφορές (Brazzola, et al., 2022; Mayer & Ding, 2023; Sacchi, et al., 2023), αφετέρου οι αερομεταφορές δείχνουν να ξεπερνούν την μείωση της κίνησης που παρατηρήθηκε στην πανδημία και ήδη έχουν ανακάμψει, ενώ η πορεία τους είναι ανοδική (Amankwah-Amoah, et al., 2023; Sun, et al., 2023).

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να εντοπιστούν τέσσερα επίπεδα συζήτησης που φαίνεται να απασχολούν έντονα την επιστημονική κοινότητα:

- i) τις πολιτικές που εφαρμόζονται, κατά πόσο αυτές είναι αποτελεσματικές και ποιες βελτιώσεις πρέπει να συμβούν στο μέλλον, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος του μετριασμού της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε λιγότερο από 2°C,
- ii) τις δράσεις που πρέπει να υλοποιηθούν τόσο στον τεχνολογικό τομέα, όσο και στην δομή και τη λειτουργία των αερομεταφορών
- iii) τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να καταγράφονται και να αξιοποιούνται οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου από τις αερομεταφορές, και
- iv) Οι συνεργασίες και οι κοινές δράσεις που πρέπει να αναπτυχθούν, ώστε να δημιουργηθούν πιο ολοκληρωμένες πολιτικές και δράσεις για τον κοινό στόχο.

Στο επίπεδο των πολιτικών παρεμβάσεων για τις δυνατότητες της βιομηχανίας των αερομεταφορών να επιτύχει κλιματική ουδετερότητα, υπάρχει μια κοινή εντύπωση ότι οι τρέχουσες πολιτικές για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής είναι ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση των αναγκών μετριασμού (Grewe, et al., 2021). Αγνοούν επίσης θέματα διανομής, καθώς και την ανάγκη σταδιακής κατάργησης των ορυκτών καυσίμων (Gössling & Lyled, 2021). Σε επίπεδο πολιτικής, φαίνεται να λειτουργούν δύο διακριτές ροές πρωτοβουλιών μετριασμού στον τομέα των

αερομεταφορών. Ενώ ο ICAO έχει διεκδικήσει αποκλειστική αρμοδιότητα για τη ρύθμιση της διεθνούς πολιτικής αεροπορίας, ούτε η νομοθεσία για το κλίμα ούτε η αεροπορική νομοθεσία εμποδίζουν τις εθνικές πρωτοβουλίες που στοχεύουν στη μείωση των επιπτώσεων της αεροπορίας, συμπεριλαμβανομένης της διεθνούς πολιτικής αεροπορίας, στο κλιματικό σύστημα. Στην πραγματικότητα, ενώ ο ICAO δεν έχει ακόμη επιτύχει σημαντικά αποτελέσματα μετριασμού, οι εθνικές πρωτοβουλίες έχουν εδώ και καιρό οδηγήσει στην εφαρμογή αποτελεσματικότερων μέτρων, συμπεριλαμβανομένων της άμεσης και έμμεσης τιμολόγησης του άνθρακα, της ανάπτυξης υποδομών, των απαιτήσεων σε βιοκαύσιμα και της διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας (Brazzola, et al., 2022; Cui, et al., 2022; Nick & Thalmann, 2022).

Τα δύο κύρια εργαλεία διεθνούς πολιτικής περιλαμβάνουν το CORSIA ή το EU ETS. Το CORSIA πρέπει να χαιρετιστεί ως ο πρώτος μηχανισμός που βασίζεται στην παγκόσμια αγορά, αλλά πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ο περιορισμένος στόχος της (να αντισταθμίσει τις αυξήσεις στις εκπομπές CO₂ του κλάδου, χωρίς να αντιμετωπιστούν τα προϋπάρχοντα επίπεδα εκπομπών και οι επιπτώσεις των άλλων αερίων του θερμοκηπίου), αλλά και τις προβλέψιμες δυσκολίες για τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής ακεραιότητας των μονάδων αντιστάθμισης. Υπάρχει κίνδυνος, όπως και κατά τις προηγούμενες πρωτοβουλίες του ICAO, το CORSIA να αποπροσανατολίσει την προσοχή των ρυθμιστικών αρχών από την ανάγκη για πολύ πιο αποτελεσματική δράση μέσω εθνικών πρωτοβουλιών (Mayer & Ding, 2023).

Υπάρχει μια ευρεία συμφωνία ότι απαιτούνται νέα, ολοκληρωμένα καθεστώτα πολιτικής που να χαρακτηρίζονται από υπευθυνότητα (ένας φορέας καθεστώτος αναλαμβάνει την ευθύνη για τις εκπομπές), πληρότητα (που καλύπτει όλη την ακτινοβολία από την αεροπορία ακόμα και την στρατιωτική), μελλοντική προστασία (που οδηγεί σε μια μετάβαση στα συστήματα πρόωσης) και κοινούς στόχους (που υποστηρίζονται από το κοινό). Θα πρέπει να καθιερωθούν νέα καθεστώτα πολιτικής σε εθνικό ή περιφερειακό επίπεδο και εξετάζοντας τους αντίστοιχους ρόλους των παραγόντων. Οι πολιτικές μετάβασης που συμπληρώνουν και υπερβαίνουν το CORSIA ή το EU ETS θα πρέπει να περιλαμβάνουν ιδανικά όλες τις εκπομπές πτήσεων, θα περιορίσουν τη ζήτηση αεροπορικών μεταφορών και θα αναγκάσουν τον κλάδο να εξετάσει εναλλακτικές τεχνολογίες πρόωσης. Πιο πολύπλοκες πολιτικές θα εξετάσουν επίσης την αλλαγή των κοινωνικών κανόνων, για παράδειγμα με την εισαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις εκπομπές στα εισιτήρια. Ακόμη και αν οι χώρες

εφαρμόζουν συνδυασμούς πολιτικών που ποικίλλουν ως προς το εύρος και την προσέγγισή τους, θα είναι όλες σχετικές με τη δοκιμή διαφορετικών στρατηγικών ενώ παράλληλα θα μαθαίνουν από τα αποτελέσματα (Gössling & Lyled, 2021; Gössling & Dolnicar, 2023; IPCC, 2023; Larsson, et al., 2019).

Μια παράμετρος που δείχνει να απασχολεί πολλούς ερευνητές και φορείς είναι η αύξηση των πτήσεων που αναμένεται τα επόμενα χρόνια. Τα αεροπορικά ταξίδια συμβάλλουν σημαντικά στην αλλαγή του κλίματος, ωστόσο αντιπροσωπεύουν μια υπηρεσία που χρησιμοποιείται μόνο από ένα μικρό μερίδιο της ανθρωπότητας, συχνά σε μορφές υψηλής έντασης άνθρακα (ιδιωτικές αεροπορικές μεταφορές, πτήση premium) και ως «θέλω» και όχι ως "χρειάζομαι". Πολλοί πιστεύουν ότι ένας αριθμός αεροπορικών ταξιδιών θα μπορούσαν να μην γίνονται ή να αντικατασταθούν από κάποιο άλλο μεταφορικό μέσο με μικρότερες επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή. Υπάρχει πολυπλοκότητα στα κίνητρα και οι συναισθηματικές αξίες των αεροπορικών μεταφορών καθιστούν απίθανη την εκούσια αλλαγή.

Δεδομένης της συνάφειας των αεροπορικών ταξιδιών για τη δημιουργία κοινωνικού κεφαλαίου και τη διαμόρφωση προσωπικής ταυτότητας, συγκεκριμένες παρεμβάσεις —όπως πληροφορίες σχετικά με τις αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες των πτήσεων— μπορεί ακόμη και να οδηγήσουν σε γνωστική ασυμφωνία, ωθώντας τους ταξιδιώτες να απορρίψουν την κλιματική αλλαγή ή να ασπαστούν μύθους τεχνολογίας. Τα στοιχεία δείχνουν ότι μια τέτοια ψυχολογία άρνησης λειτουργεί ιδιαίτερα σε κύκλους συχνών επιβατών, καθιστώντας απαραίτητη την αντιμετώπιση αυτών των ομάδων μέσω στρατηγικών βασισμένων στην αγορά ή εντολών και ελέγχου. Οι μελλοντικές προσπάθειες έρευνας και πολιτικής μπορούν επίσης να κατευθυνθούν προς τη δράση πολλών ενδιαφερομένων, για να διασφαλιστεί ότι οποιαδήποτε πρωτοβουλία ενός ενδιαφερόμενου μέρους ενισχύεται από άλλες πρωτοβουλίες.

Οι μεμονωμένες προσπάθειες μείωσης των εκπομπών άνθρακα που σχετίζονται με τα αεροπορικά ταξίδια είναι πολύ λιγότερο πιθανό να είναι επιτυχείς από τις συλλογικές προσπάθειες. Για παράδειγμα, οι κυβερνήσεις μπορεί να επιβάλλουν φόρους για αεροσκάφη που δεν καταναλώνουν καύσιμα και επίσης να διεξάγουν ενημερωτικές εκστρατείες που απευθύνουν έκκληση στους καταναλωτές να επιλέξουν πτήσεις με οικονομία καυσίμου. Οι αεροπορικές εταιρείες θα ενθαρρυνθούν από τέτοια μέτρα για να ανανεώσουν τους στόλους και στη συνέχεια να το αξιοποιήσουν σε εκστρατείες μάρκετινγκ, δηλαδή ως ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι των

αεροπορικών εταιρειών με λιγότερο ευνοϊκές επιδόσεις. Οι ερευνητές θα μπορούσαν να αναπτύξουν και να δοκιμάσουν στρατηγικές επικοινωνίας, για να εντοπίσουν τα πιο αποτελεσματικά μηνύματα για την αλλαγή των σχετικών πεποιθήσεων, στάσεων και κοινωνικών κανόνων (Gössling & Dolnicar, 2023; Nick & Thalmann, 2022).

Σε ένα δεύτερο επίπεδο συζήτησης, το ενδιαφέρον εντοπίζεται σε δράσεις και μέτρα που είναι ικανά να οδηγήσουν τις αερομεταφορές στην κλιματική ουδετερότητα. Οι πολιτικές αποφάσεις και κυρίως η αδυναμία να μετριαστούν οι επιπτώσεις του κλάδου στην κλιματική αλλαγή έχουν φέρει στο προσκήνιο τις προσπάθειες για την τεχνολογική εξέλιξη των αερομεταφορών. Οι κύριες δράσεις που έχουν ήδη ενταχθεί στο στάδιο της εφαρμογής, έχουν να κάνουν με την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με βιο-καύσιμα, την απομάκρυνση του άνθρακα από την ατμόσφαιρα ή με συνδυασμό των δύο.

Μια πολιτική μετριασμού που προωθείται για τη μείωση των εκπομπών CO₂ από τον τομέα των μεταφορών είναι η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με βιοκαύσιμα. Τα βιοκαύσιμα θεωρούνται ουδέτερα ως προς τον άνθρακα, όσον αφορά τις άμεσες εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την καύση τους, γιατί δεν αποδίδουν επιπλέον CO₂ στο περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη το CO₂ που έχει απορροφηθεί από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης (Sebos, 2022) ή μέσω της άμεσης δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα στον αέρα (Sacchi, et al., 2023). Ένα μέρος του άνθρακα των βιοκαυσίμων, ωστόσο, μπορεί να έχει μια πηγή ορυκτών και επομένως σχετίζεται με «μη ουδέτερες» εκπομπές CO₂. Αυτό το ζήτημα αναγνωρίστηκε από την IPCC, η οποία είναι ο οργανισμός που παρέχει καθοδήγηση στους φορείς που έχουν αναλάβει την απογραφή των αερίων του θερμοκηπίου σχετικά με την εκτίμηση των εκπομπών GHG ανά κατηγορία πηγής (Sebos, 2022).

Οι αερομεταφορείς θα πρέπει να δώσουν μεγαλύτερη προσοχή στην ενσωμάτωση βιοκαυσίμου στα αεροσκάφη για να μειώσουν τις παγκόσμιες εκπομπές άνθρακα και να εξασφαλίσουν θετικό αντίκτυπο στο κλίμα. Μια άλλη προσέγγιση για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η χρήση συνθετικών καυσίμων αεροσκαφών με βάση την ηλεκτρική ενέργεια, τα οποία μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ωστόσο και σε αυτή την προσέγγιση υπάρχουν περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Εάν τα συνθετικά καύσιμα αεριωθουμένων παράγονται με ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, θα μπορούσε να ασκήσει υπερβολική πίεση στους οικονομικούς και φυσικούς πόρους εάν η εναέρια κυκλοφορία συνεχίσει να αυξάνεται. Από την άλλη πλευρά, η

αντιστάθμιση των κλιματικών επιπτώσεων των ορυκτών καυσίμων αεριωθούμενων αεροσκαφών μέσω του DACCS θα απαιτούσε τεράστιους όγκους αποθήκευσης CO₂ και θα παρατείνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (Sacchi, et al., 2023).

Η ηλεκτροδότηση των αεροσκαφών είναι μια έννοια που εξετάζεται εδώ και αρκετές δεκαετίες τόσο από την πολιτική, όσο και από την στρατιωτική αεροπορία και έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για τη βελτίωση της απόδοσης των αεροσκαφών ως απάντηση στην αυξανόμενη εναέρια κυκλοφορία. Για να επιτευχθούν οι ακραίοι στόχοι της πυκνότητας και της διαθεσιμότητας ισχύος που απαιτούνται από τις εφαρμογές των αεροσκαφών, έπρεπε να συγκλίνουν οι ακόλουθες πολλαπλές σφαίρες γνώσεων μηχανικής: ηλεκτρονικά ισχύος, σχεδιασμός ηλεκτρικών μηχανών, σύστημα ελέγχου, θερμική και κατασκευαστική μηχανική και νέα μαγνητικά και ημιαγωγικά υλικά. Προφανώς, όταν αυξάνεται η απαίτηση απόδοσης, η βελτιστοποίηση μεμονωμένων εξαρτημάτων και η συναρμολόγηση του συστήματος στη συνέχεια είναι ανεπαρκείς.

Ωστόσο, μια αλλαγή παραδείγματος, η οποία συνίσταται σε μια ολιστική προσέγγιση στο σχεδιασμό του συστήματος, είναι απαραίτητη. Δεδομένης της εξαιρετικά στενής σχέσης μεταξύ ηλεκτρονικών ισχύος και θερμικού σχεδιασμού, οι πτυχές κατασκευής και ολοκλήρωσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στα αρχικά στάδια σχεδιασμού. Είναι πλέον προφανές ότι αυτό που ξεκίνησε ως απλή ηλεκτροδότηση επιλεγμένων υποσυστημάτων σε συμβατικά αεροσκάφη θα οδηγήσει σύντομα στην ευρεία χρήση των ηλεκτρικών αεροσκαφών ως μέρος της καθημερινής πραγματικότητας. Τα ευρήματα των σχετικών ερευνών υποδηλώνουν ότι ένας συνδυασμός πολιτικών κινήτρων και τεχνολογικών εξελίξεων θα ήταν απαραίτητος για να καταστεί η ηλεκτροδότηση πρόωσης αεροσκαφών οικονομικά αποδοτική και βιώσιμη επιλογή για τον κλάδο των αερομεταφορών (Buticchi, et al., 2023).

Αντίστοιχες είναι και οι προσδοκίες από την εισαγωγή του υδρογόνου στα συστήματα πρόωσης των αεροσκαφών. Φαίνεται ότι υπάρχουν πολλές δυνατότητες του καυσίμου υδρογόνου να εμπορευματοποιηθεί παγκοσμίως στο εγγύς μέλλον λόγω της συμβατότητάς του με τη δομή του κινητήρα, την απόδοση καυσίμου και τα φιλικά προς το περιβάλλον υποπροϊόντα. Η αεροπορική βιομηχανία έχει δείξει αισιόδοξα αποτελέσματα για έργα που βασίζονται σε καύσιμα υδρογόνου, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν προτού η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μπορέσει να ενσωματωθεί πλήρως στον κλάδο. Οι εξελίξεις στο σχεδιασμό κυψελών καυσίμου και στις δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου έχουν

αυξήσει τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου για αεροδιαστημικές εφαρμογές. Για τη δημιουργία αποτελεσματικών συσκευών για αεροδιαστημικές εφαρμογές, είναι ζωτικής σημασίας να κατανοήσουμε την απόδοση των κυψελών καυσίμου σε σοβαρές συνθήκες όπως χαμηλή πίεση, χαμηλή βαρύτητα και χαμηλή θερμοκρασία. Τα προηγμένα έργα έχουν ήδη επεκταθεί για να οδηγήσουν σε βελτιωμένα δεδομένα και οι επιστήμονες εκμεταλλεύονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου για να αναδείξουν το καλύτερο από αυτό. Το υδρογόνο είναι άφθονο στη φύση και φιλικό προς το περιβάλλον, καθιστώντας το μια βιώσιμη επιλογή για χρήση αεροσκαφών χωρίς επιβλαβείς συνέπειες στο περιβάλλον. Η χρήση καυσίμου υδρογόνου στον τομέα των αερομεταφορών μπορεί να οδηγήσει σε μηδενικές εκπομπές άνθρακα και ένα πράσινο μέλλον στον γαλάζιο ουρανό (Yusaf, et al., 2023).

Στο επίπεδο της καταγραφής των αερίων του θερμοκηπίου και η αξιοποίηση των στοιχείων για τη διαμόρφωση της πολιτικής και των δράσεων που απαιτούνται φαίνεται να υπάρχει και η μεγαλύτερη ανησυχία. Ιδιαίτερα γνωρίζοντας ότι ένα μεγάλο μέρος των εκπομπών δεν περιλαμβάνονται στα σημερινά συστήματα, ενώ σε άλλα δεν γίνεται εφικτός ο ποσοτικός τους προσδιορισμός. Η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των πολιτικών και των μέτρων για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής είναι μια πολύ χρήσιμη διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη ποικίλων στόχων, όπως η ενημέρωση του σχεδιασμού πολιτικής, η ενίσχυση της εφαρμογής πολιτικής, η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της πολιτικής, η αιτιολόγηση της κατανομής του προϋπολογισμού σε δράσεις μετριασμού. και προσέλκυση χρηματοδότησης για το κλίμα. Αποτελεί επίσης απαίτηση υποβολής εκθέσεων σύμφωνα με το τρέχον πλαίσιο αναφοράς της UNFCCC και το επικείμενο Ενισχυμένο Πλαίσιο Διαφάνειας της Συμφωνίας του Παρισιού. Επιπλέον, αποτελεί απαίτηση υποβολής εκθέσεων για την υποβολή εκθέσεων σχετικά με το κλίμα των κρατών μελών της ΕΕ στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Ωστόσο, σύμφωνα με την αξιολόγηση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, η αναφορά τόσο για την εκ των υστέρων όσο και για την εκ των προτέρων εξοικονόμηση εκπομπών από τα κράτη μέλη της ΕΕ είναι ελλιπής σε σημαντικό βαθμό (Sebos, et al., 2021).

Τόσο για την υλοποίηση των πολιτικών και το δράσεων όσο και για την αποτελεσματική απογραφή και ποσοτικοποίηση των εκπομπών, είναι απαραίτητο να εγκατασταθούν δίκτυα επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ των φορέων, των κρατών και της επιστημονικής κοινότητας και όπου χρειάζεται και της στρατιωτικής ηγεσίας.

Επιπλέον, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται ολοκληρωμένες αποφάσεις που θα συνυπολογίζουν τόσο τον μετριασμό των επιπτώσεων των εκπομπών στο περιβάλλον, όσο και την προσαρμογή στις νέες συνθήκες που διαμορφώνονται. Ο μετριασμός, αναφέρεται σε ενέργειες που λαμβάνονται για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την επιβράδυνση του ρυθμού της κλιματικής αλλαγής, όπως η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η εισαγωγή τεχνολογικών καινοτομιών ή η εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα. Η προσαρμογή αναφέρεται σε μέτρα που λαμβάνονται για την προσαρμογή στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, όπως η κατασκευή θαλάσσιων τειχών για την προστασία από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, η αντιμετώπιση έντονων καιρικών φαινομένων ή η ανάπτυξη καλλιεργειών ανθεκτικών στην ξηρασία. Οι κοινές δράσεις προσαρμογής και μετριασμού αναφέρονται σε προσπάθειες που αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα τόσο τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής όσο και τις υποκείμενες αιτίες της κλιματικής αλλαγής.

Η ανάγκη για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του σχεδιασμού δράσης για το κλίμα που να ενσωματώνει μέτρα προσαρμογής και μετριασμού σημαίνει ότι ο σχεδιασμός της δράσης για το κλίμα δεν πρέπει να επικεντρώνεται αποκλειστικά στη μείωση των εκπομπών ή αποκλειστικά στην προσαρμογή στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, αλλά θα πρέπει να ακολουθήσει μια ολιστική προσέγγιση που θα αντιμετωπίζει και τις δύο πτυχές του προβλήματος και θα οδηγήσει σε αλλαγές στον τρόπο που λειτουργούν οι ανθρώπινες δραστηριότητες, τον τρόπο ζωής και την συμπεριφορά των κοινωνιών. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη της δράσης για το κλίμα και να διασφαλιστεί μια συντονισμένη απάντηση σε αυτήν την παγκόσμια πρόκληση (Kyriakopoulos & Sebos, 2023).

Σε ό,τι αφορά την στρατιωτική αεροπορία, τα τελευταία χρόνια συμμετέχει στις συζητήσεις και στα τέσσερα αυτά επίπεδα, εμφανίζοντας όμως περιορισμούς που σχετίζονται με την ασφάλεια και τον ιδιαίτερο ρόλο που καλύπτει. Η εφαρμογή πολιτικών κλιματικής ουδετερότητας στη στρατιωτική αεροπορία παρουσιάζει πολλές προκλήσεις και ιδιομορφίες που μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα:

1. **Τεχνολογικοί περιορισμοί:** Η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών που μπορούν να επιτύχουν ουδετερότητα άνθρακα στη στρατιωτική αεροπορία είναι μια σημαντική πρόκληση. Η βιομηχανία πρέπει να επενδύσει στην έρευνα και την ανάπτυξη για να δημιουργήσει πιο βιώσιμα αεροσκάφη, καύσιμα και συστήματα πρόωσης. Σε αυτό το κομμάτι φαίνεται ότι έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους οι περισσότεροι στρατοί.

2. Συνέπειες κόστους: Η μετάβαση σε κλιματικά ουδέτερες πρακτικές μπορεί να είναι δαπανηρή για τον τομέα της στρατιωτικής αεροπορίας. Το κόστος που σχετίζεται με την ανάπτυξη και την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, την αναβάθμιση της υποδομής και την εκπαίδευση του προσωπικού μπορεί να δημιουργήσει οικονομικά εμπόδια.
3. Επιχειρησιακές απαιτήσεις: Η στρατιωτική αεροπορία λειτουργεί συχνά σε εξαιρετικά απαιτητικές και απρόβλεπτες καταστάσεις, οι οποίες μπορούν να περιορίσουν τη σκοπιμότητα εφαρμογής πολιτικών για την κλιματική ουδετερότητα. Η εξισορρόπηση της ανάγκης για ετοιμότητα και αποτελεσματικότητας μάχης με τους στόχους βιωσιμότητας μπορεί να είναι περίπλοκη.
4. Περιορισμοί υποδομής: Η υπάρχουσα στρατιωτική αεροπορική υποδομή ενδέχεται να μην είναι συμβατή με τους στόχους κλιματικής ουδετερότητας. Η αναβάθμιση των διαδρόμων προσγείωσης, των υπόστεγων και των εγκαταστάσεων συντήρησης για την υποστήριξη βιώσιμων λειτουργιών μπορεί να είναι μια υλικοτεχνική πρόκληση.
5. Διεθνής συνεργασία: Ο παγκόσμιος χαρακτήρας της στρατιωτικής αεροπορίας απαιτεί διεθνή συνεργασία για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Η εναρμόνιση πολιτικών, προτύπων και κανονισμών σε διάφορες χώρες μπορεί να είναι μια πολύπλοκη εργασία.
6. Ανησυχίες για την ασφάλεια: Η εφαρμογή των πολιτικών για την κλιματική ουδετερότητα δεν πρέπει να θέτει σε κίνδυνο τις δυνατότητες ασφάλειας και άμυνας της στρατιωτικής αεροπορίας. Η εξεύρεση ισορροπίας μεταξύ της βιωσιμότητας και της διατήρησης της στρατιωτικής ετοιμότητας είναι ζωτικής σημασίας.

Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων θα απαιτήσει συνεργασία μεταξύ στρατιωτικών οργανισμών, κυβερνήσεων, ερευνητικών ιδρυμάτων και φορέων της βιομηχανίας για την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων και την υπέρβαση των εμποδίων για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στη στρατιωτική αεροπορία.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdullatif, Y. και συν., 2023. Emerging trends in direct air capture of CO₂ : a review of technology options targeting net-zero emissions. *RSC Adv.* 13, p. 5687. DOI: 10.1039/d2ra07940b.
- Amankwah-Amoah, J., Debrah, Y. & Anang, S., 2023. Greening aviation in era of COVID-19: Towards conceptualizing and operationalizing decarbonization. *Journal of Environmental Management* 326, p. 116649. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116649>.
- Belcher, O., Bigger, P., Neimark, B. & Kennelly, C., 2019. Hidden carbon costs of the “everywhere war”: Logistics, geopolitical ecology, and the carbon boot-print of the US military. *Trans Inst Br Geogr.*, p. 1–16. DOI: 10.1111/tran.12319.
- Bergero, C. και συν., 2023. Pathways to net-zero emissions from aviation. *Nature Sustainability* 6, pp. 404–414. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01046-9>.
- Bhatt, A. H. και συν., 2023. Evaluation of performance variables to accelerate the deployment of sustainable aviation fuels at a regional scale. *Energy Conversion and Management* 275, p. 116441. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116441>.
- Bickel, M. και συν., 2020. Estimating the effective radiative forcing of contrail cirrus. *Journal of Climate* 33(5), pp. 1991-2005. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0467.1>.
- Brazzola, N., Patt, A. & Wohland, J., 2022. Definitions and implications of climate-neutral aviation. *Nature Climate Change* 12(8), pp. 761-767. .
- Buticchi, G., Wheeler, P. & Boroyevich, D., 2023. The More-Electric Aircraft and Beyond. *Proceedings of the IEEE* (4), pp. 356-370. doi: 10.1109/JPROC.2022.3152995.
- Chen, L. και συν., 2022. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environmental Chemistry Letters* 20, pp. 2277–2310. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>.
- Cifuentes-Faura, J., 2022. European Union policies and their role in combating climate change over the years. *Air Quality, Atmosphere & Health* 15, pp. 1333–1340. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01156-5>.
- Cui, Q., Lei, Y. & Chen, B., 2022. Impacts of the proposal of the CNG2020 strategy on aircraft emissions of China–foreign routes. *Earth Syst. Sci. Data* 14, pp. 4419–4433. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4419-2022>.
- DAF, US, 2022. *Department of the Air Force Climate Action Plan*, Washington, DC: Department of the Air Force, Office of the Assistant Secretary for Energy, Installations, and Environmen.
- Dębkowska, K. και συν., 2022. The Analysis of Public Funds Utilization Efficiency for Climate Neutrality in the European Union Countries. *Energies* 15, p. 581. <https://doi.org/10.3390/en15020581>.
- Depledge, D., 2023. Low-carbon warfare: climate change, net zero and military operations. *International Affairs* 99(2), p. 667–685. doi: 10.1093/ia/iia001.
- Dray, L. & Schäfer, A., 2021. Initial Long-term Scenarios For Covid-19’s Impact On Aviation and Implications For Climate Policy. *Journal of the Transportation Research Board*, 4(2677), pp. 204-218. <https://doi.org/10.1177/036119812111045067>.
- Dray, L. και συν., 2022. Cost and emissions pathways towards net-zero climate impacts in aviation. *Nature Climate Change* 12, pp. 956–962. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01485-4>.

- Dupont, C. & Torney, D., 2021. European Union Climate Governance and the European Green Deal in Turbulent Times. *Politics and Governance Volume 9(3)*, p. 312–315. <https://doi.org/10.17645/pag.v9i3.4896>.
- Efthymiou, M. & Papatheodorou, A., 2019. EU Emissions Trading Scheme in Aviation: Policy Analysis and Suggestions. *Journal of Cleaner Production 237(1)*, p. 117734. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117734.
- Eissele, J. και συν., 2023. Hydrogen-Powered Aviation—Design of a Hybrid-Electric Regional Aircraft for Entry into Service in 2040. *Aerospace 10*, p. 277. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030277>.
- EU European Defence Agency, 2022. *The Military in the Single European Sky. Partnering for Excellence in Global Aviation*, Brussels: EU European Defence Agency.
- Falkner, R., 2019. The unavoidability of justice – and order – in international climate politics: From Kyoto to Paris and beyond. *British Journal of Politics & International Relations 21(2)*, p. 136914811881906. DOI:10.1177/1369148118819069.
- Fanzo, J. & Miachon, L., 2023. Harnessing the connectivity of climate change, food systems and diets: Taking action to improve human and planetary health. *Anthropocene 42*, p. 100381. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2023.100381>.
- Filho, W. L. και συν., 2023. Global tourism, climate change and energy sustainability: assessing carbon reduction mitigating measures from the aviation industry. *Sustainability Science 18*, pp. 983–996. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01207-x>.
- Fragkos, P., 2022. Decarbonizing the International Shipping and Aviation Sectors. *Energies 15*, p. 9650. <https://doi.org/10.3390/en15249650>.
- Gössling, S. & Dolnicar, S., 2023. A review of air travel behavior and climate change. *WIREs Clim Change. 14*, p. e802. <https://doi.org/10.1002/wcc.802>.
- Gossling, S. & Humpe, A., 2020. The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. *Global Environmental Change 65*, p. 102194. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194>.
- Gössling, S. & Lyled, C., 2021. Transition policies for climatically sustainable aviation. *Transport Reviews, 41:5*, pp. 643-658, DOI: 10.1080/01441647.2021.1938284.
- Grewe, V. και συν., 2021. Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. *NATURE COMMUNICATIONS 12*, pp. 3841. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24091-y>.
- Hasan, M. A. και συν., 2021. Climate Change Mitigation Pathways for the Aviation Sector. *Sustainability 13*, p. 3656. <https://doi.org/10.3390/su13073656>.
- Huete, J., Nalianda, D. & Pilidis, P., 2021. Propulsion system integration for a first-generation hydrogen civil airliner?. *THE AERONAUTICAL JOURNAL*, pp. 1-12. doi:10.1017/aer.2021.36.
- IATA, 2023. *Policy: Net Zero Roadmap*, Quebec, Canada H4Z 1M1: International Air Transport Association.
- ICAO, 2016. *Resolution A39-3*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.icao.int/environmental-protection/> [Πρόσβαση 02 08 2023].
- ICAO, 2021. *ICAO Action Plan for Aviation CO2 Emissions Reduction: Greece*, Athrns.: Ministry of Infrastructures and Transport, Hellenic Civil Aviation Authority.

- ICAO, 2022. *Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection — Climate change*, Montreal, Canada: Resolution A41-21: ICAO.
- IPCC, 2023. *CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*, Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations.
- Jing, L. και συν., 2022. Understanding variability in petroleum jet fuel life cycle greenhouse gas emissions to inform aviation decarbonization. *Nature Communications* 13, pp. 7853. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35392-1>.
- Johst, P. και συν., 2023. Identification of circular eco-subsystems for end-of-life aviation composite components based on a systematized R6-strategy. *Journal of Physics: Conference Series* 2526, pp. 012055. doi:10.1088/1742-6596/2526/1/012055.
- Kabir, M. και συν., 2023. Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University – Science* 35, p. 102693. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102693>.
- Klöwer, M. και συν., 2021. Quantifying aviation's contribution to global warming. *Environ. Res. Lett.* 16, pp. 104027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac286e>.
- Kramer, S. και συν., 2022. Perspectives on Fully Synthesized Sustainable Aviation Fuels: Direction and Opportunities. *Front. Energy Res.* 9, p. 782823. doi: 10.3389/fenrg.2021.782823.
- Kurdekar, M., 2023. A Review on Strategies to Reduce Fuel Consumption in Different Phases of Flight. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) Volume 11 Issue III*, pp. 799-804. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49539>.
- Kyriakopoulos, G. L. & Sebos, I., 2023. Enhancing Climate Neutrality and Resilience through Coordinated Climate Action: Review of the Synergies between Mitigation and Adaptation Actions. *Climate* 11, p. 105. <https://doi.org/10.3390/cli11050105>.
- Larsson, J., Elofsson, A., Sterner, T. & Åkermanc, J., 2019. International and national climate policies for aviation: a review. *Climate Policy*, 19(6), pp. 787-799. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1562871>.
- Leamon, M. A., Rincon, E. J., Robillard, N. M. & Sutherland, J. J., 2019. Sustainable Skies: How the Airline Industry is Addressing Climate Change. *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*, 14(2), pp. 1-28. <https://doi.org/10.33423/jsis.v14i2.1373>.
- Lee, D. και συν., 2021. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment* 244, p. 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.
- Leidecker, T., Bulman, T., Levin, I. & Blake, H., 2023. *TRANSITIONING TO A GREEN ECONOMY IN GREECE, ECO/WKP(2023)10*: OECD. ECONOMICS DEPARTMENT WORKING PAPERS No. 1757.
- Lenzi, D., 2022. How should we respond to climate change? Virtue ethics and aggregation problems. *J Soc Philos.*, p. 1–16. DOI: 10.1111/josp.12488.
- Lützkendorf, T. & Frischknech, R., 2020. (Net-) zero-emission buildings: a typology of terms and definitions. *Buildings and Cities* 1(1), p. 662–675. DOI: <https://doi.org/10.5334/bc.66>.

- Luyten, A., Winkler, M. S., Ammann, P. & Dietler, D., 2023. Health impact studies of climate change adaptation and mitigation measures – A scoping review. *The Journal of Climate Change and Health* 9, p. 100186. <https://doi.org/10.1016/j.joclim.2022.100186>.
- Mai, D. T. T. & Yan, B., 2023. Divergences between the European Union and China on reducing international aviation emissions. *Asia Europe Journal* 21, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10308-023-00657-x>.
- Matthes, S. και συν., 2021. Mitigation of Non-CO2 Aviation's Climate Impact by Changing Cruise Altitudes. *Aerospace* 8(36), pp. 1-20. <https://doi.org/10.3390/aerospace8020036>.
- Mayer, B. & Ding, Z., 2023. Climate Change Mitigation in the Aviation Sector: A Critical Overview of National and International Initiatives. *Transnational Environmental Law*, 12(1), p. 14–41. doi:10.1017/S204710252200019X.
- Mills-Novoa, M. & Liverman, D. M., 2019. Nationally Determined Contributions: Material climate commitments and discursive positioning in the NDCs. *WIREs Clim Change*. 10:e589. , pp. 1-15. <https://doi.org/10.1002/wcc.589>.
- Mueller, T. & Gronau, S., 2023. Fostering Macroeconomic Research on Hydrogen-Powered Aviation: A Systematic Literature Review on General Equilibrium Models. *Energies* 16, p. 1439. <https://doi.org/10.3390/en16031439>.
- NATOa, 2023. *Copendum of Best Practice*, Brussels: NATO Climate Change and Security Action Plan.
- NATOb, 2023. *The NATO Green House Gases (GHG) Emissions Mapping and Analytical Methodology*, Brussels, Belgium: NATO EMERGING SECURITY CHALLENGES DIVISION.
- Nick, S. & Thalmann, P., 2022. Towards True Climate Neutrality for Global Aviation: A Negative Emissions Fund for Airlines. *J. Risk Financial Manag.* 15, p. 505. <https://doi.org/10.3390/jrfm15110505>.
- Okolie, J. A. και συν., 2023. Multi-criteria decision analysis for the evaluation and screening of sustainable aviation fuel production pathways. *iScience* 26, p. 106944. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106944>.
- Paschalidou, A. K., Petrou, I., Fytianos, G. & Kassomenos, P., 2022. Anatomy of the atmospheric emissions from the transport sector in Greece: trends and challenges. *Environmental Science and Pollution Research* 29, pp. 34670–34684. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18062-5>.
- Pipitone, G., Zoppi, G., Pirone, R. & Bensaid, S., 2023. Sustainable aviation fuel production using in-situ hydrogen supply via aqueous phase reforming: A techno-economic and life-cycle greenhouse gas emissions assessment. *Journal of Cleaner Production* 418., p. 138141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138141>.
- Qiu, R., Hou, S. & Meng, Z., 2021. Low carbon air transport development trends and policy implications based on a scientometrics-based data analysis system. *Transport Policy* 107, p. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.04.013>.
- Quan, R. και συν., 2023. Minimum hydrogen consumption-based energy management strategy for hybrid fuel cell unmanned aerial vehicles using direction prediction optimal foraging algorithm. *Fuel Cells* 23(2), pp. 221-236. <https://doi.org/10.1002/face.202200121>.
- RAF UK, 2021. *A Net Zero RAF by 2040*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.raf.mod.uk/news/articles/a-net-zero-raf-by-2040/> [Πρόσβαση 05 08 2023].

- Rajaeifar, M. A. και συν., 2022. Decarbonize the military—mandate emissions reporting. *Nature*, 611, p. 29–32.
- Rodriguez, K. και συν., 2023. Gas fermentation for microbial sustainable aviation fuel production. *Microbiology Australia* 44(1), p. 31–35. doi:10.1071/MA2300.
- Sacchi, R. και συν., 2023. How to make climate-neutral aviation fly. *Nature Communications* 14, pp. 3989. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39749-y>.
- Sadkin, I. S., Kopyev, E. P., Mukhina, M. A. & Anufriev, I. S., 2022. Experimental study of the characteristics of heptane combustion in a high-speed steam jet. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2233, pp. 012001. DOI 10.1088/1742-6596/2233/1/012001.
- Sanchez, R. G. και συν., 2023. The Role of Direct Air Capture in EU’s Decarbonisation and Associated Carbon Intensity for Synthetic Fuels Production. *Energies* 16, p. 3881. <https://doi.org/10.3390/en16093881> .
- Schmalenbach, K., 2022. Paris Agreement. Στο: P. K. D. P. A. S. K. V. R. Gailhofer, επιμ. *Corporate Liability for Transboundary Environmental Harm*. s.l.:Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13264-3_16, pp. 615-621.
- Schmidt, N. M., Tobin, P. & Moore, B., 2022. Brace for turbulence: EU Member States’ climate strategies in the aviation sector. *Climate Action* 1(21), pp. 1-7. <https://doi.org/10.1007/s44168-022-00018-1>.
- Sebos, I., 2022. Fossil fraction of CO₂ emissions of biofuels. *CARBON MANAGEMENT* 13(1), p. 154–163 <https://doi.org/10.1080/17583004.2022.2046173>.
- Sebos, I., Progiou, A. G. & Kallinikos, L., 2021. Methodological Framework for the Quantification of GHG Emission Reductions from Climate Change Mitigation Actions. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, Vol. 39 1–4, pp. 219–242. doi: 10.13052/spee1048-4236.391411.
- Sun, X., Wandelt, S. & Zhang, A., 2023. A data-driven analysis of the aviation recovery from the COVID-19 pandemic. *Journal of Air Transport Management* 109, p. 102401. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102401>.
- Sustainable Aviation (SA), 2022. *Net Zero Carbon Road-Map*, London: Sustainable Aviation (SA).
- Tait, K. N. και συν., 2022. Aircraft Emissions, Their Plume-Scale Effects, and the Spatio-Temporal Sensitivity of the Atmospheric Response: A Review. *Aerospace* 9, p. 355. <https://doi.org/10.3390/aerospace9070355>.
- UN, 2022. *Causes and Effects of Climate Change*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
[Πρόσβαση 23 July 2023].
- UNFCCC, 2019. *COP25 – Loss and Damage outcomes*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://unepccc.org/cop25-loss-and-damage-outcomes/> [Πρόσβαση 03 08 2023].
- UNFCCC, 2022. *Five Key Takeaways from COP27*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/sharm-el-sheikh-climate-change-conference-november-2022/five-key-takeaways-from-cop27>
[Πρόσβαση 02 08 2023].
- United Nations, 2015. *UN Framework Convention on Climate Change, Adoption of the Paris Agreement, Conference of Parties, Twenty-first session*. 30 November to 11 December. Paris, United Nations. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1.

- US Department of Transportation, 2021. *U.S. Aviation Climate Action Plan*, Washington, DC 20590, United States: US Department of Transportation .
- Varotsos , C. A., Krapivin, V. F., Mkrtchyan, F. A. & Zhou, X., 2021. On the effects of aviation on carbon-methane cycles and climate change during the period 2015-2100. *Atmospheric Pollution Research (Elsevier)* 12(1), pp. 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.033>.
- Wang, C.-H., Ko, M.-H. & Chen, W.-J., 2019. Effects of Kyoto Protocol on CO2 Emissions: A Five-Country Rolling Regression Analysis. *Sustainability* 11, p. 744. doi:10.3390/su11030744.
- Yusaf, T. και συν., 2023. Sustainable hydrogen energy in aviation e A narrative review. *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.086>.
- Zervas, E. και συν., 2021. Assessment of the Greek National Plan of Energy and Climate Change—Critical Remarks. *Sustainability* 13(23), p. 13143. <https://doi.org/10.3390/su132313143> .
- Zhang, J., Roumeliotis, I., Zhang, X. & Zolotas, A., 2023. Techno-economic-environmental evaluation of aircraft propulsion electrification: Surrogate-based multi-mission optimal design approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 175, p. 113168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113168>.
- Zhang, Q. και συν., 2023. Synergetic roadmap of carbon neutrality and clean air for China. *Environmental Science and Ecotechnology* 16, p. 100280. <https://doi.org/10.1016/j.es.2023.100280>.
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2022. Έκθεση σχετικά με τον χάρτη πορείας της ΕΥΕΔ για την κλιματική αλλαγή και την άμυνα. (2021/2102(INI)), Βρυξέλλες: Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο: A9-0084/2022.
- IATA, 2022. *Air Passenger Market Analysis*, Montreal, Canada: International Air Transport Association (IATA).
- NATO, 2022. *195 SESA 22 E. Policy Recommendations: Climate change and International Security*, Plenary Assembly. Brussels: Resolution 480. NATO.
- ΥΠΕΘΑ, 2022. *Οδικός Χάρτης για τον Περιορισμό των Επιπτώσεων και την Προσαρμογή των Ενόπλων Δυνάμεων στην Κλιματική Αλλαγή*, Αθήνα: Υπουργείο Εθνικής Άμυνας.