



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας
Περιβαλλοντική Κατάλυση για Αντιρύπανση και Παραγωγή Καθαρής
Ενέργειας

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**«Πιθανές διαδρομές αξιοποίησης του CO₂ για τη σύνθεση βιώσιμων
καυσίμων αεροπορίας»**

<<Παπαδόπουλος Νικόλαος>>

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : ΓΟΥΛΑ ΜΑΡΙΑ

Πάτρα, 2026

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract	8
Λέξεις-κλειδιά:	9
Συντομογραφία.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή.....	11
1.1 Η κλιματική αλλαγή και ο ρόλος των αερομεταφορών.....	11
1.2 Οι εκπομπές CO ₂ στον αεροπορικό τομέα	12
1.3 Η ανάγκη για βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας (SAF)	14
1.4 Η αξιοποίηση του CO ₂ ως στρατηγική απανθρακοποίησης.....	16
1.5 Σκοπός και στόχοι της εργασίας.....	18
1.6 Μεθοδολογία και δομή της μελέτης.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο για το CO ₂ και τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας.....	20
2.1 Το διοξείδιο του άνθρακα ως αέριο του θερμοκηπίου.....	20
2.2 Πηγές εκπομπών CO ₂ στην αεροπορία	22
2.3 Βασικές αρχές δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS).....	24
2.4 Ορισμός και κατηγορίες βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας	26
2.5 Συμβατικά καύσιμα Jet A-1 και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	28
2.6 Διεθνείς πολιτικές και κανονισμοί για την απανθρακοποίηση της αεροπορίας	30
2.6.1 Συμφωνία των Παρισίων	31
2.6.2 ICAO και CORSIA	33
2.6.3 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και ReFuelEU Aviation.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δέσμευση και πηγές CO ₂ για παραγωγή βιώσιμων καυσίμων	37
3.1 Βιογενείς και βιομηχανικές πηγές CO ₂	37
3.2 Άμεση δέσμευση CO ₂ από την ατμόσφαιρα (Direct Air Capture – DAC)	39
3.3 Δέσμευση CO ₂ από βιομηχανικές εγκαταστάσεις	41
3.4 Ενεργειακές απαιτήσεις και τεchnοοικονομικές προκλήσεις	42
3.5 Ενσωμάτωση τεχνολογιών CCUS στην αεροπορία	45
3.6 Κυκλική οικονομία και ανθρακική ουδετερότητα.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παραγωγή e-fuels μέσω αξιοποίησης CO ₂	49
4.1 Η έννοια των ηλεκτροκαυσίμων (e-fuels).....	49
4.2 Παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης.....	51
4.2.1 Τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης.....	52
4.2.2 Ρόλος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	54
4.3 Αντίδραση Reverse Water Gas Shift (RWGS).....	55
4.4 Σύνθεση Fischer–Tropsch για παραγωγή συνθετικών καυσίμων.....	59

4.5 Παραγωγή e-kerosene από CO ₂ και H ₂	63
4.6 Καταλυτικά συστήματα και τεχνολογικές εξελίξεις.....	64
4.7 Ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντικό αποτύπωμα e-fuels.....	66
4.8 Τεχνοοικονομική αξιολόγηση παραγωγής e-SAF	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βιολογικές και Βιοτεχνολογικές Διαδρομές Αξιοποίησης CO ₂ για Παραγωγή Βιώσιμων Αεροπορικών Καυσίμων	69
5.1 Μικροάλγες ως μέσο δέσμευσης CO ₂	69
5.2 Παραγωγή βιοκαυσίμων αεροπορίας από μικροάλγες	71
5.3 Μεταβολική μηχανική μικροοργανισμών για παραγωγή καυσίμων	72
5.4 Βιοσύνθεση υδρογονανθράκων και αλκοολών από CO ₂	72
5.5 Downstream διεργασίες και καθαρισμός βιοκαυσίμων.....	73
5.6 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί βιολογικών διεργασιών.....	75
5.7 Σύγκριση βιολογικών και θερμοχημικών διαδρομών.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Εναλλακτικές Θερμοχημικές και Συνθετικές Διαδρομές Παραγωγής Βιώσιμων Καυσίμων Αεροπορίας	78
6.1 Παραγωγή μεθανόλης χαμηλού άνθρακα από CO ₂	78
6.2 Μετατροπή μεθανόλης σε καύσιμα αεροπορίας (MTJ – Methanol to Jet)	80
6.3 Alcohol-to-Jet (ATJ) τεχνολογίες	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Περιβαλλοντική, Ενεργειακή και Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Βιώσιμων Καυσίμων Αεροπορίας	83
7.1 Ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA).....	83
7.2 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των SAF.....	86
7.3 Ενεργειακή αποδοτικότητα και ενεργειακές απώλειες.....	88
7.4 Οικονομική βιωσιμότητα παραγωγής e-fuels.....	89
7.5 Κόστος παραγωγής και υποδομών	90
7.6 Σύγκριση SAF με συμβατικά αεροπορικά καύσιμα.....	92
7.7 Κοινωνικές και γεωπολιτικές επιπτώσεις.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Προκλήσεις, Περιορισμοί και Μελλοντικές Προοπτικές για την Αξιοποίηση CO ₂ στην Αεροπορία	94
8.1 Τεχνολογικά εμπόδια στην αξιοποίηση του CO ₂	94
8.2 Διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας και πράσινου υδρογόνου	96
8.3 Ζητήματα κλιμάκωσης και βιομηχανικής εφαρμογής.....	98
8.4 Πολιτικές ενίσχυσης και επενδυτικά κίνητρα	99
8.5 Προοπτικές για μηδενικές εκπομπές στην αεροπορία.....	100
8.6 Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις.....	101
Συμπεράσματα.....	102
Βιβλιογραφία.....	108

Περίληψη

Η αεροπορική βιομηχανία αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς μεταφορών παγκοσμίως, συμβάλλοντας σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ιδιαίτερα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Η αυξανόμενη ζήτηση αερομεταφορών, σε συνδυασμό με την εξάρτηση από συμβατικά ορυκτά καύσιμα, εντείνει την ανάγκη για ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών που θα μειώσουν το ανθρακικό αποτύπωμα του κλάδου. Σύμφωνα με τους Song et al. (2025), η πολιτική απανθρακοποίησης της πολιτικής αεροπορίας αποτελεί βασικό πυλώνα για την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας των Παρισίων και της παγκόσμιας κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Παράλληλα, οι Delbecq et al. (2025) επισημαίνουν ότι η μετάβαση της αεροπορίας σε βιώσιμες μορφές ενέργειας απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικών, οικονομικών και πολιτικών παρεμβάσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση του CO_2 για την παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (Sustainable Aviation Fuels – SAF) αναδεικνύεται ως μία από τις πλέον υποσχόμενες στρατηγικές κυκλικής οικονομίας και ενεργειακής μετάβασης. Η τεχνολογία δέσμευσης και αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Capture and Utilization – CCU) επιτρέπει τη μετατροπή του CO_2 από ρυπογόνο απόβλητο σε πολύτιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων, όπως e-kerosene, μεθανόλη και συνθετικοί υδρογονάνθρακες (Ramos-Fernandez et al., 2025). Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται κυρίως στη χρήση πράσινου υδρογόνου, το οποίο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης νερού με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και στη συνέχεια συνδυάζεται με CO_2 για την παραγωγή καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Anand et al., 2025).

Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι διαδρομές Power-to-Liquid με χρήση πράσινου υδρογόνου και καταλυτικής μετατροπής CO_2 μέσω RWGS/Fischer–Tropsch αποτελούν την πιο τεχνολογικά ώριμη επιλογή για παραγωγή e-SAF, ενώ οι βιολογικές διαδρομές παρουσιάζουν σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον αλλά παραμένουν λιγότερο ώριμες για εφαρμογή μεγάλης κλίμακας. Συνολικά, η αξιοποίηση του CO_2 μπορεί να αποτελέσει βασικό πυλώνα μετάβασης προς κλιματικά ουδέτερες αερομεταφορές, εφόσον υποστηριχθεί από επαρκή διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας, κατάλληλες πολιτικές και εκτεταμένες επενδύσεις.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν οι διεργασίες Power-to-Liquid (PtL), οι οποίες αξιοποιούν ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια για τη σύνθεση υγρών καυσίμων μέσω αντιδράσεων όπως η Reverse Water Gas Shift (RWGS) και η σύνθεση Fischer–Tropsch. Σύμφωνα με τους Panzone et al. (2020), η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή καυσίμων σχεδόν ουδέτερου ανθρακικού ισοζυγίου, εφόσον το CO₂ προέρχεται από βιογενείς ή ατμοσφαιρικές πηγές. Παράλληλα, οι Blay-Roger et al. (2024) τονίζουν ότι οι εξελίξεις στους καταλύτες Fischer–Tropsch βελτιώνουν σημαντικά την ενεργειακή απόδοση και την επιλεκτικότητα της παραγωγής αεροπορικών καυσίμων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι βιολογικές διαδρομές αξιοποίησης CO₂, όπως η χρήση μικροαλγών και μεταβολικά τροποποιημένων μικροοργανισμών. Οι Ahmad και Ashraf (2025) υπογραμμίζουν ότι οι μικροάλγες μπορούν να δεσμεύουν μεγάλες ποσότητες CO₂ μέσω φωτοσύνθεσης και να παράγουν λιπίδια κατάλληλα για μετατροπή σε biojet fuels. Παρόμοια, οι Panich et al. (2025) επισημαίνουν ότι η μεταβολική μηχανική βακτηρίων όπως το *Cupriavidus necator* δημιουργεί νέες δυνατότητες παραγωγής βιώσιμων καυσίμων απευθείας από CO₂.

Παρά τις σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις, η εμπορική εφαρμογή των SAF αντιμετωπίζει ακόμη προκλήσεις που σχετίζονται με το υψηλό κόστος παραγωγής, την περιορισμένη διαθεσιμότητα πράσινου υδρογόνου, την ανάγκη για ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια μεγάλης κλίμακας και τις απαιτούμενες υποδομές μεταφοράς και αποθήκευσης (Schemme et al., 2017). Παρ' όλα αυτά, η συνεχής πρόοδος στις τεχνολογίες CCU, η ανάπτυξη νέων καταλυτικών διεργασιών και οι διεθνείς πολιτικές στήριξης ενισχύουν τις προοπτικές ευρείας υιοθέτησης βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας στο μέλλον.

Ο αεροπορικός τομέας συγκαταλέγεται μεταξύ των δυσκολότερα απανθρακοποιήσιμων τομέων μεταφορών λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που απαιτούν οι αεροπορικές μεταφορές και της περιορισμένης δυνατότητας άμεσης ηλεκτροκίνησης. Στο πλαίσιο αυτό, τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας (Sustainable Aviation Fuels – SAF) και ιδιαίτερα τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται μέσω αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) αναδεικνύονται ως κρίσιμες τεχνολογικές επιλογές για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση των πιθανών δρόμων αξιοποίησης του CO₂ για τη σύνθεση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, με έμφαση στις τεχνολογικές, περιβαλλοντικές και τεχνοοικονομικές διαστάσεις των διαφορετικών διαδρομών παραγωγής. Ειδικότερα, εξετάζονται θερμοχημικές, ηλεκτροχημικές και βιολογικές οδοί μετατροπής CO₂, καθώς και οι δυνατότητες ενσωμάτωσής τους στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα της αεροπορίας.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση πιθανών διαδρομών αξιοποίησης του CO₂ για παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε στις βάσεις δεδομένων ScienceDirect, Scopus, SpringerLink και Google Scholar χρησιμοποιώντας συνδυασμούς λέξεων-κλειδιών όπως: “CO₂ utilization”, “sustainable aviation fuel”, “Power-to-Liquid”, “e-fuels”, “RWGS”, “Fischer–Tropsch”, “CCUS”, “green hydrogen”, “aviation decarbonization” και “Direct Air Capture”.

Ως χρονικό εύρος επιλέχθηκαν κυρίως δημοσιεύσεις της περιόδου 2017–2025, με εξαίρεση παλαιότερες θεμελιώδεις μελέτες που θεωρήθηκαν απαραίτητες για την κατανόηση βασικών τεχνολογικών αρχών. Συμπεριλήφθηκαν άρθρα περιοδικών με κριτές (peer-reviewed), τεχνικές αναφορές διεθνών οργανισμών και κανονιστικά κείμενα. Τα κριτήρια αποκλεισμού περιλάμβαναν μη τεκμηριωμένες πηγές, μη επιστημονικές δημοσιεύσεις, εργασίες περιορισμένης τεχνικής συνάφειας και πηγές χωρίς σαφή ποσοτικά δεδομένα.

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών πραγματοποιήθηκε βάσει έξι βασικών κριτηρίων: τεχνολογική ωριμότητα, ενεργειακή απόδοση, περιβαλλοντικό όφελος, οικονομικό κόστος, δυνατότητα βιομηχανικής κλιμάκωσης και συμβατότητα με την υφιστάμενη αεροπορική υποδομή.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η περιβαλλοντική απόδοση των διαδρομών αξιοποίησης CO₂ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την προέλευση του δεσμευμένου άνθρακα, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και την παραγωγή πράσινου υδρογόνου. Παράλληλα, η τεχνοοικονομική αξιολόγηση καταδεικνύει ότι το υψηλό κόστος ηλεκτρόλυσης, οι ενεργειακές απαιτήσεις δέσμευσης CO₂ και η ανάγκη μεγάλων επενδύσεων σε υποδομές εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικούς περιοριστικούς παράγοντες.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι διαδρομές Power-to-Liquid με χρήση πράσινου υδρογόνου και καταλυτικής μετατροπής CO₂ μέσω RWGS/Fischer-Tropsch αποτελούν την πιο τεχνολογικά ώριμη επιλογή για παραγωγή e-SAF, ενώ οι βιολογικές διαδρομές παρουσιάζουν σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον αλλά παραμένουν λιγότερο ώριμες για εφαρμογή μεγάλης κλίμακας. Συνολικά, η αξιοποίηση του CO₂ μπορεί να αποτελέσει βασικό πυλώνα μετάβασης προς κλιματικά ουδέτερες αερομεταφορές, εφόσον υποστηριχθεί από επαρκή διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας, κατάλληλες πολιτικές και εκτεταμένες επενδύσεις.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην πραγματοποίησή της. Αρχικά, εκφράζω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, Γούλα Μαρία για την επιστημονική καθοδήγηση, την υποστήριξη, τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και την πολύτιμη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή της υπήρξε καθοριστική τόσο στην ακαδημαϊκή προσέγγιση του θέματος όσο και στην ολοκλήρωση της έρευνας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου για τη διαρκή υποστήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών και της συγγραφής της παρούσας εργασίας. Η εμπιστοσύνη και η στήριξή τους αποτέλεσαν σημαντική πηγή δύναμης. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Γωγώ για την κατανόηση, την υπομονή, την ψυχολογική υποστήριξη και τη συνεχή ενθάρρυνση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής προσπάθειας. Η παρουσία και η στήριξή της υπήρξαν ιδιαίτερα σημαντικές. Τέλος, ευχαριστώ όλους όσοι συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ακαδημαϊκή και προσωπική μου πορεία και υποστήριξαν την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Abstract

The aviation sector is considered one of the most challenging sectors to decarbonize due to the high energy density requirements of air transportation and the limited potential for direct electrification. In this context, Sustainable Aviation Fuels (SAF), particularly synthetic fuels produced through carbon dioxide (CO₂) utilization, are emerging as critical technological pathways for reducing greenhouse gas emissions.

The aim of this thesis is to investigate and evaluate potential pathways for CO₂ utilization in the synthesis of sustainable aviation fuels, focusing on the technological, environmental, and techno-economic dimensions of different production routes. Particular emphasis is placed on thermochemical, electrochemical, and biological pathways and their integration into future aviation energy systems.

The methodological approach is based on an extensive literature review of recent scientific publications, life cycle assessment (LCA) studies, techno-economic analyses, and international decarbonization policies. The study examines Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) technologies, green hydrogen production, Reverse Water Gas Shift (RWGS) processes, Fischer–Tropsch synthesis, e-kerosene production, biological CO₂ utilization through microalgae and metabolically engineered microorganisms, as well as alternative pathways including Methanol-to-Jet and Alcohol-to-Jet technologies.

The findings indicate that the environmental performance of CO₂ utilization pathways strongly depends on carbon source selection, renewable electricity availability, and green hydrogen production. Furthermore, techno-economic evaluation highlights that electrolysis costs, energy-intensive CO₂ capture processes, and infrastructure investments remain major barriers to large-scale deployment.

The analysis suggests that Power-to-Liquid pathways using green hydrogen and catalytic CO₂ conversion through RWGS/Fischer–Tropsch currently represent the most technologically mature route for e-SAF production, while biological pathways remain promising but less mature for industrial-scale implementation. Overall, CO₂ utilization can play a significant role in achieving climate-neutral aviation, provided that large-scale renewable energy deployment, supportive policies, and sustained investments are ensured.

Λέξεις-κλειδιά:

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂),
- βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας (SAF),
- ηλεκτροκαύσιμα (e-fuels),
- αξιοποίηση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ utilization),
- δέσμευση, αξιοποίηση και αποθήκευση άνθρακα (CCUS),
- Power-to-Liquid (PtL),
- πράσινο υδρογόνο,
- Fischer–Tropsch,
- απανθρακοποίηση αεροπορίας,
- κυκλική οικονομία.

Συντομογραφία	Ορισμός
SAF	Sustainable Aviation Fuel
e-SAF	Electro-Sustainable Aviation Fuel
PtL	Power-to-Liquid
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
DAC	Direct Air Capture
RWGS	Reverse Water Gas Shift
FT	Fischer–Tropsch
ATJ	Alcohol-to-Jet
MTJ	Methanol-to-Jet
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
LCA	Life Cycle Assessment
ICAO	International Civil Aviation Organization
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Η κλιματική αλλαγή και ο ρόλος των αερομεταφορών

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές προκλήσεις του 21ου αιώνα, επηρεάζοντας το φυσικό περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία, την παγκόσμια οικονομία και τη βιωσιμότητα των παραγωγικών δραστηριοτήτων. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη συνδέεται άμεσα με την εντατική χρήση ορυκτών καυσίμων και την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), μεθανίου (CH_4) και υποξειδίου του αζώτου (N_2O). Ανάμεσα στους τομείς που συμβάλλουν σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι μεταφορές και ειδικότερα οι αερομεταφορές κατέχουν ιδιαίτερη θέση λόγω της συνεχούς ανάπτυξής τους και της υψηλής ενεργειακής έντασης που τις χαρακτηρίζει.

Ο αεροπορικός τομέας αποτελεί βασικό μοχλό της παγκόσμιας οικονομίας, διευκολύνοντας το εμπόριο, τον τουρισμό και τη διεθνή συνδεσιμότητα. Ωστόσο, η εξάρτησή του από συμβατικά αεροπορικά καύσιμα, όπως το Jet A-1, οδηγεί σε σημαντικές εκπομπές CO_2 και άλλων ρύπων. Σύμφωνα με τους Song et al. (2025), η πολιτική αεροπορία ευθύνεται για περίπου 2–3% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών CO_2 , ενώ το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί λόγω της συνεχούς αύξησης της αεροπορικής κίνησης. Παράλληλα, οι Dahal et al. (2021) επισημαίνουν ότι οι αερομεταφορές είναι από τους δυσκολότερους τομείς στην απανθρακοποίηση, καθώς απαιτούν καύσιμα υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που να μπορούν να εξασφαλίσουν μεγάλες αποστάσεις πτήσης και επιχειρησιακή ασφάλεια.

Η κλιματική επίδραση της αεροπορίας δεν περιορίζεται μόνο στις εκπομπές CO_2 . Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x), οι υδρατμοί, τα αιωρούμενα σωματίδια και ο σχηματισμός contrails συμβάλλουν επιπλέον στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην ατμοσφαιρική επιβάρυνση. Οι Delbecq et al. (2025) αναφέρουν ότι οι μη- CO_2 επιδράσεις της αεροπορίας μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά το συνολικό κλιματικό αποτύπωμα των πτήσεων, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη συνολική αναδιοργάνωση του αεροπορικού ενεργειακού μοντέλου.

Τα τελευταία χρόνια, διεθνείς οργανισμοί και κυβερνήσεις έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους μείωσης εκπομπών. Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής

Αεροπορίας (ICAO) μέσω του προγράμματος CORSIA επιδιώκει τη σταθεροποίηση των καθαρών εκπομπών CO₂ της αεροπορίας, ενώ η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί το πρόγραμμα ReFuelEU Aviation για την αύξηση της χρήσης Sustainable Aviation Fuels (SAF). Παράλληλα, η Συμφωνία των Παρισίων απαιτεί δραστική μείωση των εκπομπών ώστε η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας να διατηρηθεί κάτω από τους 2°C.

Στο πλαίσιο αυτό, η αεροπορία καλείται να μετασχηματιστεί ενεργειακά μέσω τεχνολογικών καινοτομιών, βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας και ανάπτυξης νέων καυσίμων χαμηλού άνθρακα. Οι Undavalli et al. (2024) υποστηρίζουν ότι τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας αποτελούν την πιο άμεσα εφαρμόσιμη λύση για τη μείωση των εκπομπών, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα υπάρχοντα αεροσκάφη χωρίς σημαντικές τεχνικές τροποποιήσεις. Παράλληλα, η αξιοποίηση του CO₂ ως πρώτης ύλης για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων δημιουργεί νέες προοπτικές κυκλικής οικονομίας και ενεργειακής μετάβασης.

Η μετά-COVID περίοδος έδειξε ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα και η βιωσιμότητα αποτελούν πλέον στρατηγικές προτεραιότητες για τις αεροπορικές εταιρείες. Οι Guzman et al. (2025) διαπίστωσαν ότι οι αεροπορικές επιχειρήσεις επενδύουν ολοένα περισσότερο σε τεχνολογίες εξοικονόμησης καυσίμου και βιώσιμων ενεργειακών λύσεων, τόσο για περιβαλλοντικούς όσο και για οικονομικούς λόγους. Ο ρόλος των αερομεταφορών στην κλιματική αλλαγή είναι καθοριστικός, αλλά ταυτόχρονα η αεροπορία μπορεί να αποτελέσει πεδίο εφαρμογής καινοτόμων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η αξιοποίηση του CO₂ και η ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας αποτελούν βασικά εργαλεία για τη μετάβαση προς μια πιο πράσινη και κλιματικά ουδέτερη αεροπορική βιομηχανία.

1.2 Οι εκπομπές CO₂ στον αεροπορικό τομέα

Ο αεροπορικός τομέας συγκαταλέγεται μεταξύ των σημαντικότερων πηγών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στον τομέα των μεταφορών, εξαιτίας της υψηλής κατανάλωσης υγρών καυσίμων και της αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης αερομεταφορών. Η καύση συμβατικών αεροπορικών καυσίμων, όπως το Jet A-1, οδηγεί στην απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων CO₂, το οποίο συμβάλλει σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην επιδείνωση της κλιματικής αλλαγής. Σύμφωνα με τους Song et al. (2025), οι εκπομπές της πολιτικής αεροπορίας

παρουσιάζουν διαρκή αυξητική τάση και προβλέπεται να πολλαπλασιαστούν έως το 2050 εάν δεν εφαρμοστούν αποτελεσματικές στρατηγικές απανθρακοποίησης.

Η παραγωγή εκπομπών CO₂ στην αεροπορία σχετίζεται άμεσα με τη χημική σύσταση των καυσίμων. Τα συμβατικά καύσιμα αεροσκαφών αποτελούνται κυρίως από υδρογονάνθρακες, οι οποίοι κατά την καύση αντιδρούν με το οξυγόνο παράγοντας ενέργεια, CO₂ και υδρατμούς. Οι Raji et al. (2025) αναφέρουν ότι κάθε κιλό καυσίμου Jet A-1 που καταναλώνεται μπορεί να παράγει περίπου 3,16 kg CO₂, γεγονός που αποδεικνύει τη σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση των αερομεταφορών.

Η αύξηση της αεροπορικής κίνησης τα τελευταία χρόνια αποτελεί βασικό παράγοντα ενίσχυσης των εκπομπών. Η παγκοσμιοποίηση, η ανάπτυξη του τουρισμού και η αύξηση των εμπορικών μεταφορών έχουν οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση του αριθμού πτήσεων διεθνώς. Παρά την προσωρινή μείωση που καταγράφηκε κατά την πανδημία COVID-19, η αεροπορική δραστηριότητα επανήλθε γρήγορα σε ανοδική πορεία. Οι Guzman et al. (2025) επισημαίνουν ότι η μεταπανδημική ανάκαμψη της αεροπορίας συνοδεύτηκε από αυξημένη κατανάλωση καυσίμων, επαναφέροντας στο προσκήνιο την ανάγκη βιώσιμων ενεργειακών λύσεων.

Η αεροπορία παρουσιάζει περιορισμένες δυνατότητες άμεσης ηλεκτροδότησης σε σύγκριση με άλλους τομείς μεταφορών. Τα ηλεκτρικά αεροσκάφη αντιμετωπίζουν σοβαρούς περιορισμούς λόγω του χαμηλού λόγου ενέργειας προς βάρος των σημερινών μπαταριών, ιδιαίτερα στις μεγάλες αποστάσεις πτήσης. Για τον λόγο αυτό, οι Dahal et al. (2021) θεωρούν ότι τα υγρά καύσιμα θα συνεχίσουν να κυριαρχούν στην αεροπορία για πολλές δεκαετίες, καθιστώντας αναγκαία τη μετάβαση σε καύσιμα χαμηλού άνθρακα.

Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα αφορά τις μη-CO₂ εκπομπές των αεροσκαφών. Εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα, οι κινητήρες εκπέμπουν οξείδια αζώτου, αιωρούμενα σωματίδια και υδρατμούς που συμβάλλουν στον σχηματισμό contrails και νεφών υψηλού υψομέτρου. Οι Delbecq et al. (2025) αναφέρουν ότι οι επιδράσεις αυτές αυξάνουν σημαντικά το συνολικό κλιματικό αποτύπωμα της αεροπορίας, ενισχύοντας τη ραδιενεργό forcing της ατμόσφαιρας.

Για την αντιμετώπιση των εκπομπών CO₂, αναπτύσσονται διεθνείς πολιτικές και στρατηγικές απανθρακοποίησης. Ο ICAO μέσω του μηχανισμού CORSIA προωθεί την αντιστάθμιση εκπομπών άνθρακα, ενώ η Ευρωπαϊκή Ένωση ενθαρρύνει την

υποχρεωτική χρήση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Σύμφωνα με τους Raman et al. (2024), τα SAF αποτελούν τη σημαντικότερη βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη λύση για τη μείωση των εκπομπών, καθώς μπορούν να ενσωματωθούν άμεσα στις υπάρχουσες αεροπορικές υποδομές.

Παράλληλα, η αξιοποίηση CO₂ για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων δημιουργεί τη δυνατότητα ανάπτυξης ενός κυκλικού ανθρακικού μοντέλου. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η μετατροπή του δεσμευμένου CO₂ σε e-fuels μπορεί να περιορίσει σημαντικά τις καθαρές εκπομπές άνθρακα της αεροπορίας, ιδιαίτερα όταν η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Οι εκπομπές CO₂ στον αεροπορικό τομέα αποτελούν κρίσιμο περιβαλλοντικό πρόβλημα με παγκόσμιες διαστάσεις. Η ανάπτυξη τεχνολογιών αξιοποίησης CO₂ και βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη μελλοντική απανθρακοποίηση των αερομεταφορών και στην επίτευξη διεθνών κλιματικών στόχων.

1.3 Η ανάγκη για βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας (SAF)

Η συνεχής αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον αεροπορικό τομέα έχει καταστήσει αναγκαία την ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (Sustainable Aviation Fuels – SAF), τα οποία μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των αερομεταφορών. Η αεροπορία εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από υγρά καύσιμα υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, γεγονός που καθιστά δύσκολη την άμεση αντικατάστασή τους από ηλεκτρικά ή άλλης μορφής ενεργειακά συστήματα. Ως αποτέλεσμα, τα SAF θεωρούνται σήμερα η πλέον ρεαλιστική και άμεσα εφαρμόσιμη λύση για την απανθρακοποίηση του τομέα (Undavalli et al., 2024).

Τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας περιλαμβάνουν καύσιμα που παράγονται από βιομάζα, οργανικά απόβλητα, μικροάλγες, συνθετικές διεργασίες αξιοποίησης CO₂ και τεχνολογίες Power-to-Liquid (PtL). Σε αντίθεση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, τα SAF μπορούν να επιτύχουν σημαντική μείωση εκπομπών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Σύμφωνα με τους Amhamed et al. (2025), ορισμένες τεχνολογίες SAF μπορούν να περιορίσουν τις καθαρές εκπομπές CO₂ έως και 80% συγκριτικά με το Jet A-1, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και βιογενές CO₂.

Η ανάγκη ανάπτυξης SAF συνδέεται άμεσα με τους διεθνείς στόχους για κλιματική ουδετερότητα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της στρατηγικής ReFuelEU Aviation προωθεί τη σταδιακή αύξηση της χρήσης SAF στις εμπορικές πτήσεις, ενώ ο ICAO υποστηρίζει την υιοθέτηση καυσίμων χαμηλών εκπομπών ως βασικό εργαλείο μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος της αεροπορίας. Οι Raman et al. (2024) τονίζουν ότι η έρευνα γύρω από τα SAF συνδέεται άμεσα με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ, ιδιαίτερα όσον αφορά τη δράση για το κλίμα και τη βιώσιμη βιομηχανική ανάπτυξη.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται μέσω αξιοποίησης CO₂ και πράσινου υδρογόνου. Τα e-fuels ή electrofuels βασίζονται στη χρήση δεσμευμένου CO₂ και υδρογόνου που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με ανανεώσιμη ενέργεια. Οι Ozkan et al. (2025) επισημαίνουν ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση δημιουργεί έναν σχεδόν κλειστό κύκλο άνθρακα, όπου το CO₂ που εκπέμπεται κατά την καύση επαναχρησιμοποιείται για την παραγωγή νέου καυσίμου. Παράλληλα, οι Schemme et al. (2017) αναφέρουν ότι τα καύσιμα PtL μπορούν να αποτελέσουν βασικό πυλώνα βιώσιμων συστημάτων μεταφορών στο μέλλον.

Σημαντική είναι επίσης η συμβολή του πράσινου υδρογόνου στην ανάπτυξη SAF. Το υδρογόνο θεωρείται κρίσιμος ενεργειακός φορέας για τη σύνθεση συνθετικών καυσίμων και τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτούς πόρους. Οι Anand et al. (2025) και Tak et al. (2025) επισημαίνουν ότι η ταχεία ανάπτυξη τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενισχύει σημαντικά τις προοπτικές εμπορικής παραγωγής e-SAF.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η ευρεία εφαρμογή των SAF εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις. Το υψηλό κόστος παραγωγής, οι περιορισμένες ποσότητες πρώτων υλών, η ανάγκη για εκτεταμένες επενδύσεις σε υποδομές και η περιορισμένη διαθεσιμότητα πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν βασικά εμπόδια. Οι Segovia-Hernandez (2025) και Liu et al. (2025) υπογραμμίζουν ότι απαιτείται συνδυασμός τεχνολογικής καινοτομίας, κρατικών κινήτρων και διεθνούς συνεργασίας για τη μαζική ανάπτυξη της αγοράς SAF.

Οι βιολογικές διαδρομές παραγωγής SAF μέσω μικροαλγών και μικροοργανισμών παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητας άμεσης αξιοποίησης CO₂ μέσω φωτοσύνθεσης ή βιοσύνθεσης. Οι Ahmad και Ashraf (2025)

σημειώνουν ότι οι μικροάλγες μπορούν να λειτουργήσουν ως φυσικοί μηχανισμοί δέσμευσης άνθρακα, παράγοντας ταυτόχρονα πρώτες ύλες για βιοκαύσιμα αεροπορίας.

1.4 Η αξιοποίηση του CO₂ ως στρατηγική απανθρακοποίησης

Η αυξανόμενη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιδείνωσης της κλιματικής αλλαγής, οδηγώντας τη διεθνή επιστημονική κοινότητα στην αναζήτηση τεχνολογιών που δεν περιορίζονται μόνο στη μείωση των εκπομπών αλλά και στην ενεργή αξιοποίηση του παραγόμενου CO₂. Στο πλαίσιο αυτό, οι τεχνολογίες δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS) έχουν αποκτήσει στρατηγική σημασία για την παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση και ιδιαίτερα για την απανθρακοποίηση τομέων υψηλής ενεργειακής έντασης, όπως η αεροπορία.

Η αξιοποίηση του CO₂ βασίζεται στη μετατροπή του από αέριο ρύπο σε πολύτιμη χημική πρώτη ύλη για την παραγωγή καυσίμων, χημικών προϊόντων και υλικών. Σύμφωνα με τους Okoye-Chine et al. (2024), το CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση συνθετικών καυσίμων μέσω θερμοχημικών, ηλεκτροχημικών και βιολογικών διεργασιών, συμβάλλοντας στη δημιουργία ενός κυκλικού μοντέλου άνθρακα. Αντί να απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, το διοξείδιο του άνθρακα επαναχρησιμοποιείται στην παραγωγή νέων ενεργειακών προϊόντων, μειώνοντας τις καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Στον αεροπορικό τομέα, η αξιοποίηση CO₂ αποκτά ιδιαίτερη σημασία λόγω της δυσκολίας πλήρους ηλεκτροδότησης των αεροσκαφών. Τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας που παράγονται από CO₂ και πράσινο υδρογόνο μπορούν να λειτουργήσουν ως “drop-in fuels”, δηλαδή να χρησιμοποιηθούν στα υπάρχοντα αεροσκάφη και συστήματα ανεφοδιασμού χωρίς σημαντικές τεχνικές τροποποιήσεις. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) επισημαίνουν ότι η αξιοποίηση του CO₂ για τη σύνθεση Sustainable Aviation Fuels (SAF) αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες στρατηγικές απανθρακοποίησης της αεροπορίας, καθώς επιτρέπει τη δραστική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των πτήσεων.

Μία από τις βασικότερες τεχνολογικές προσεγγίσεις είναι οι διεργασίες Power-to-Liquid (PtL), στις οποίες το CO₂ συνδυάζεται με πράσινο υδρογόνο για την παραγωγή συνθετικών υγρών καυσίμων. Η διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά τη

δέσμευση CO₂ από βιομηχανικές πηγές ή απευθείας από την ατμόσφαιρα (Direct Air Capture – DAC) και στη συνέχεια τη μετατροπή του σε μονοξείδιο του άνθρακα μέσω της αντίδρασης Reverse Water Gas Shift (RWGS). Το παραγόμενο syngas χρησιμοποιείται έπειτα σε διεργασίες Fischer–Tropsch για τη σύνθεση συνθετικών υδρογονανθράκων κατάλληλων για αεροπορική χρήση (Panzone et al., 2020).

Η αποδοτικότητα των τεχνολογιών αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανάπτυξη προηγμένων καταλυτών. Οι Choi et al. (2024) αναφέρουν ότι οι καταλύτες χαλκού παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες στην υδρογόνωση CO₂ μέσω της RWGS αντίδρασης, ενώ οι Blay-Roger et al. (2024) τονίζουν ότι οι σύγχρονες tandem catalytic διεργασίες μπορούν να αυξήσουν την επιλεκτικότητα και την ενεργειακή αποδοτικότητα της παραγωγής συνθετικών καυσίμων.

Οι βιολογικές μέθοδοι αξιοποίησης CO₂ αποκτούν ολοένα μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Η χρήση μικροαλγών, κυανοβακτηρίων και μεταβολικά τροποποιημένων μικροοργανισμών επιτρέπει τη φυσική δέσμευση CO₂ μέσω φωτοσύνθεσης ή βιοσύνθεσης. Οι Ahmad και Ashraf (2025) υποστηρίζουν ότι οι μικροάλγες μπορούν να λειτουργήσουν ως ιδιαίτερα αποδοτικοί βιολογικοί μηχανισμοί δέσμευσης άνθρακα, παράγοντας παράλληλα λιπίδια και βιομάζα κατάλληλη για παραγωγή biojet fuels. Αντίστοιχα, οι Panich et al. (2025) αναφέρουν ότι η μεταβολική μηχανική μικροοργανισμών όπως το *Cupriavidus necator* ανοίγει νέους δρόμους για τη βιώσιμη παραγωγή καυσίμων απευθείας από CO₂.

Η στρατηγική αξιοποίησης του CO₂ συνδέεται στενά και με την ανάπτυξη της κυκλικής οικονομίας. Μέσω της επαναχρησιμοποίησης του άνθρακα, μειώνεται η εξάρτηση από ορυκτές πρώτες ύλες και περιορίζεται η ανάγκη εξόρυξης νέων πόρων. Οι Eyitayo et al. (2024) επισημαίνουν ότι η ενσωμάτωση τεχνολογιών CCUS σε βιομηχανικά και ενεργειακά συστήματα μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην επίτευξη ανθρακικής ουδετερότητας.

Ωστόσο, η αξιοποίηση CO₂ συνοδεύεται ακόμη από σημαντικές προκλήσεις, όπως το υψηλό ενεργειακό κόστος, η ανάγκη μεγάλων ποσοτήτων πράσινου υδρογόνου και η περιορισμένη οικονομική ανταγωνιστικότητα σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Παρ' όλα αυτά, η συνεχής πρόοδος στις τεχνολογίες καταλυτών, στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα συστήματα δέσμευσης άνθρακα ενισχύει σημαντικά τις προοπτικές ευρείας εφαρμογής των τεχνολογιών αξιοποίησης CO₂ στο μέλλον.

1.5 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τους πιθανούς δρόμους αξιοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) για τη σύνθεση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, εστιάζοντας στις σύγχρονες τεχνολογικές προσεγγίσεις που μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην ενεργειακή μετάβαση του αεροπορικού τομέα. Η αεροπορία αποτελεί έναν από τους πλέον απαιτητικούς τομείς ως προς την απανθρακοποίηση, καθώς εξαρτάται από καύσιμα υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και μεγάλης αξιοπιστίας. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (SAF) και η αξιοποίηση του CO_2 ως πρώτης ύλης αποκτούν στρατηγική σημασία για την επίτευξη των διεθνών περιβαλλοντικών στόχων.

Βασικός σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση των τεχνολογιών που επιτρέπουν τη μετατροπή του CO_2 σε βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα, καθώς και η αποτίμηση της συμβολής τους στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος της αεροπορίας. Παράλληλα, επιδιώκεται η ανάλυση των περιβαλλοντικών, ενεργειακών και οικονομικών παραμέτρων που επηρεάζουν την εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνολογιών σε βιομηχανική κλίμακα.

Η εργασία εξετάζει αρχικά το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και τον ρόλο των αερομεταφορών στις παγκόσμιες εκπομπές CO_2 , αναδεικνύοντας την ανάγκη ανάπτυξης εναλλακτικών καυσίμων χαμηλού άνθρακα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες δέσμευσης και αξιοποίησης CO_2 , καθώς και οι διαθέσιμες πηγές άνθρακα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις διεργασίες Power-to-Liquid (PtL), στις αντιδράσεις Reverse Water Gas Shift και Fischer–Tropsch, καθώς και στις τεχνολογίες παραγωγής e-fuels μέσω πράσινου υδρογόνου (Schemme et al., 2017).

Η εργασία στοχεύει στην ανάλυση βιολογικών διαδρομών αξιοποίησης CO_2 , όπως η χρήση μικροαλγών και μικροοργανισμών για παραγωγή biojet fuels. Οι τεχνολογίες αυτές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητας φυσικής δέσμευσης CO_2 μέσω φωτοσύνθεσης και παραγωγής ανανεώσιμης βιομάζας (Ahmad & Ashraf, 2025).

Βασικός στόχος της μελέτης είναι η αξιολόγηση των τεχνοοικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων των SAF. Η ανάλυση περιλαμβάνει ζητήματα ενεργειακής αποδοτικότητας, κόστους παραγωγής, αναγκών σε ανανεώσιμη ενέργεια

και διαθεσιμότητας πράσινου υδρογόνου. Παράλληλα, εξετάζονται οι προκλήσεις που σχετίζονται με την εμπορική κλιμάκωση των τεχνολογιών αξιοποίησης CO₂, καθώς και οι πολιτικές και θεσμικές παρεμβάσεις που απαιτούνται για τη στήριξη της μετάβασης προς μία κλιματικά ουδέτερη αεροπορία.

Η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τις μελλοντικές προοπτικές της αξιοποίησης CO₂ στον τομέα των αερομεταφορών, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου ενεργειακού μοντέλου βασισμένου στην κυκλική οικονομία και στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.6 Μεθοδολογία και δομή της μελέτης

Η παρούσα εργασία βασίζεται κυρίως σε βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση σύγχρονων επιστημονικών δεδομένων που σχετίζονται με την αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) για τη σύνθεση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Η μεθοδολογική προσέγγιση της μελέτης έχει στόχο τη συγκέντρωση, αξιολόγηση και σύνθεση πληροφοριών από έγκριτες επιστημονικές δημοσιεύσεις, διεθνείς εκθέσεις και ερευνητικά άρθρα που αφορούν τις τεχνολογίες παραγωγής Sustainable Aviation Fuels (SAF), τις διεργασίες δέσμευσης και αξιοποίησης CO₂, καθώς και τις περιβαλλοντικές και τεχνοοικονομικές διαστάσεις της ενεργειακής μετάβασης της αεροπορίας.

Η βιβλιογραφική έρευνα πραγματοποιήθηκε μέσω επιστημονικών βάσεων δεδομένων όπως ScienceDirect, Scopus, SpringerLink και Google Scholar, με χρήση λέξεων-κλειδιών όπως “CO₂ utilization”, “Sustainable Aviation Fuels”, “Power-to-Liquid”, “e-fuels”, “green hydrogen”, “Fischer–Tropsch synthesis” και “aviation decarbonization”. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε πρόσφατες μελέτες της περιόδου 2020–2025, ώστε να αποτυπωθούν οι πλέον σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις και οι τρέχουσες ερευνητικές τάσεις.

Η μελέτη ακολουθεί ποιοτική και συγκριτική προσέγγιση, αξιολογώντας διαφορετικές τεχνολογικές διαδρομές αξιοποίησης CO₂. Συγκεκριμένα, αναλύονται θερμοχημικές, καταλυτικές και βιολογικές μέθοδοι παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, καθώς και οι ενεργειακές και οικονομικές απαιτήσεις κάθε τεχνολογίας. Παράλληλα, εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μέσω δεδομένων ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), οι οποίες επιτρέπουν τη σύγκριση των εκπομπών μεταξύ συμβατικών και βιώσιμων καυσίμων.

Η εργασία οργανώνεται σε εννέα βασικά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της έρευνας, η σύνδεση της αεροπορίας με την κλιματική αλλαγή και η ανάγκη ανάπτυξης βιώσιμων καυσίμων. Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με το CO₂, τις τεχνολογίες CCUS και τα χαρακτηριστικά των βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζονται οι πηγές και οι τεχνολογίες δέσμευσης CO₂, ενώ το τέταρτο επικεντρώνεται στις τεχνολογίες παραγωγής e-fuels μέσω διεργασιών Power-to-Liquid και συνθετικής χημείας. Το πέμπτο κεφάλαιο αναλύει τις βιολογικές διαδρομές αξιοποίησης CO₂, όπως οι μικροάλγες και οι μεταβολικά τροποποιημένοι μικροοργανισμοί. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εναλλακτικές τεχνολογικές προσεγγίσεις παραγωγής SAF, όπως τα Alcohol-to-Jet και Methanol-to-Jet καύσιμα.

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει περιβαλλοντική και τεχνοοικονομική αξιολόγηση των τεχνολογιών, ενώ το όγδοο εξετάζει τις προκλήσεις, τα εμπόδια και τις μελλοντικές προοπτικές εφαρμογής τους. Τέλος, στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή.

Μέσω της συγκεκριμένης μεθοδολογικής προσέγγισης επιδιώκεται η ολοκληρωμένη κατανόηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης του CO₂ ως βασικής πρώτης ύλης για τη σύνθεση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας και η ανάδειξη του ρόλου τους στη μετάβαση προς μία κλιματικά ουδέτερη αεροπορική βιομηχανία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο για το CO₂ και τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας

2.1 Το διοξείδιο του άνθρακα ως αέριο του θερμοκηπίου

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση της θερμοκρασίας της Γης. Παρότι το CO₂ υπάρχει φυσικά στην ατμόσφαιρα και συμμετέχει σε βασικές βιολογικές και γεωχημικές διεργασίες, η υπερβολική αύξηση της συγκέντρωσής του εξαιτίας ανθρωπογενών δραστηριοτήτων έχει οδηγήσει στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου και στην επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής. Η καύση ορυκτών καυσίμων, η αποψίλωση δασών, η βιομηχανική παραγωγή και οι μεταφορές αποτελούν τις κυριότερες πηγές ανθρωπογενών εκπομπών CO₂.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μία φυσική διαδικασία κατά την οποία ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας απορροφούν και επανεκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία, παγιδεύοντας θερμότητα κοντά στην επιφάνεια της Γης. Χωρίς την παρουσία αυτών των αερίων, η μέση θερμοκρασία του πλανήτη θα ήταν σημαντικά χαμηλότερη και η ζωή όπως είναι γνωστή σήμερα δεν θα μπορούσε να αναπτυχθεί. Ωστόσο, η αυξημένη συγκέντρωση CO₂ ενισχύει υπερβολικά αυτή τη διαδικασία, προκαλώντας άνοδο της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, μεταβολές στα κλιματικά συστήματα και ακραία καιρικά φαινόμενα.

Η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί δραματικά από τη Βιομηχανική Επανάσταση μέχρι σήμερα. Οι σύγχρονες βιομηχανικές δραστηριότητες και η αυξανόμενη ενεργειακή κατανάλωση έχουν οδηγήσει σε εκπομπές που υπερβαίνουν σημαντικά τη φυσική ικανότητα απορρόφησης άνθρακα από δάση, ωκεανούς και οικοσυστήματα. Σύμφωνα με τους Liu et al. (2025), το CO₂ αποτελεί το κυρίαρχο ανθρωπογενές αέριο του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας καθοριστικά στη μακροπρόθεσμη αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Ανησυχία προκαλεί το γεγονός ότι το CO₂ χαρακτηρίζεται από μεγάλο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα. Ένα σημαντικό ποσοστό των εκπομπών μπορεί να παραμείνει ενεργό για δεκαετίες ή ακόμη και αιώνες, συνεχίζοντας να επηρεάζει το παγκόσμιο κλίμα. Οι Song et al. (2025) επισημαίνουν ότι η συνεχής αύξηση των συγκεντρώσεων CO₂ συνδέεται άμεσα με την άνοδο της θερμοκρασίας, την τήξη των πάγων, την αύξηση της στάθμης των θαλασσών και τη συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων.

Ο τομέας των μεταφορών και ειδικότερα η αεροπορία συνεισφέρουν σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές CO₂ λόγω της εξάρτησής τους από υγρά καύσιμα ορυκτής προέλευσης. Οι Dahal et al. (2021) αναφέρουν ότι η καύση αεροπορικών καυσίμων οδηγεί στην απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα, ενώ η συνεχής αύξηση της αεροπορικής ζήτησης αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω τις εκπομπές τα επόμενα χρόνια. Η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών CO₂ έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διεθνών στρατηγικών απανθρακοποίησης και τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα.

Σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση του προβλήματος διαδραματίζουν οι τεχνολογίες δέσμευσης και αξιοποίησης άνθρακα (CCUS). Μέσω των τεχνολογιών

αυτών, το CO₂ μπορεί να δεσμευθεί από βιομηχανικές πηγές ή απευθείας από την ατμόσφαιρα και να επαναχρησιμοποιηθεί για την παραγωγή καυσίμων και χημικών προϊόντων. Οι Okoye-Chine et al. (2024) τονίζουν ότι η αξιοποίηση του CO₂ μπορεί να μετατρέψει ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα σε ενεργειακό πόρο, συμβάλλοντας στη δημιουργία κυκλικών ενεργειακών συστημάτων.

Η ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας και συνθετικών e-fuels προσφέρει νέες δυνατότητες περιορισμού των εκπομπών CO₂. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η χρήση δεσμευμένου CO₂ ως πρώτης ύλης για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των καθαρών εκπομπών της αεροπορίας, ιδιαίτερα όταν η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Το CO₂ δεν αντιμετωπίζεται πλέον αποκλειστικά ως απόβλητο αλλά και ως κρίσιμος παράγοντας ενεργειακής μετάβασης. Οι Savva et al. (2025) αναφέρουν ότι η μετατροπή CO₂ σε χαμηλού άνθρακα μεθανόλη και άλλα συνθετικά καύσιμα μπορεί να αποτελέσει βασικό στοιχείο ενός βιώσιμου ενεργειακού μοντέλου.

2.2 Πηγές εκπομπών CO₂ στην αεροπορία

Η αεροπορία αποτελεί έναν από τους πλέον ενεργοβόρους τομείς μεταφορών και σημαντική πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), κυρίως λόγω της εξάρτησής της από καύσιμα ορυκτής προέλευσης υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Οι εκπομπές CO₂ προκύπτουν κυρίως από την καύση αεροπορικών καυσίμων στους κινητήρες των αεροσκαφών, ενώ επιπλέον εκπομπές σχετίζονται με τις επίγειες λειτουργίες αεροδρομίων, τη συντήρηση αεροσκαφών και την παραγωγή καυσίμων (European Union Aviation Safety Agency (EASA), 2024).

Πηγές εκπομπών CO ₂ στην αεροπορία
• 2–3% παγκόσμιων εκπομπών CO ₂
• 3.5–4% συνολικής κλιματικής επίδρασης
• αύξηση επιβατικής κίνησης ~3–4%/έτος

Η κύρια πηγή εκπομπών στην αεροπορία είναι η κατανάλωση καυσίμου κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα αεροσκάφη χρησιμοποιούν κυρίως καύσιμα τύπου Jet A-1, τα οποία αποτελούνται από μίγματα υδρογονανθράκων. Κατά την καύση τους, ο άνθρακας των καυσίμων αντιδρά με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, παράγοντας CO₂ και απελευθερώνοντας ενέργεια. Σύμφωνα με τους Raji et al. (2025), κάθε τόνος καυσίμου

Jet A-1 μπορεί να παράγει περισσότερους από τρεις τόνους διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που καταδεικνύει το υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα των αερομεταφορών.

Οι εκπομπές εξαρτώνται άμεσα από διάφορους παράγοντες, όπως η απόσταση πτήσης, ο τύπος του αεροσκάφους, η απόδοση των κινητήρων, το φορτίο και οι καιρικές συνθήκες. Οι μεγάλες διεθνείς πτήσεις καταναλώνουν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμου, ενώ παλαιότερα αεροσκάφη παρουσιάζουν χαμηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα συγκριτικά με σύγχρονα μοντέλα. Οι Guzman et al. (2025) αναφέρουν ότι οι νέες γενιές αεροσκαφών επιτυγχάνουν βελτιωμένη κατανάλωση καυσίμου μέσω αεροδυναμικών βελτιώσεων και αποδοτικότερων κινητήρων, χωρίς όμως να εξαλείφουν πλήρως τις εκπομπές CO₂.

Ο αεροπορικός τομέας ευθύνεται για περίπου 2–3% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών CO₂, ενώ όταν συνυπολογίζονται οι μη-CO₂ επιδράσεις (NO_x, contrails, υδρατμοί και αερολύματα), η συνολική συμβολή της αεροπορίας στην κλιματική αλλαγή εκτιμάται ότι προσεγγίζει το 3.5–4% της συνολικής ανθρωπογενούς επίδρασης στην υπερθέρμανση του πλανήτη (Song et al., 2025). Παράλληλα, η ζήτηση αερομεταφορών προβλέπεται να συνεχίσει να αυξάνεται με ρυθμούς 3–4% ετησίως, αυξάνοντας περαιτέρω τις πιέσεις απανθρακοποίησης.

Σημαντική πηγή εκπομπών αποτελεί επίσης η διαδικασία απογείωσης και ανόδου των αεροσκαφών, όπου απαιτείται μέγιστη ισχύς κινητήρων και αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Αντίστοιχα, οι καθυστερήσεις σε αεροδρόμια και η παραμονή αεροσκαφών σε τροχοδρόμηση με ενεργοποιημένους κινητήρες ενισχύουν επιπλέον τις εκπομπές. Οι Parhamfar (2024) και Federal Aviation Administration (2023) επισημαίνουν ότι η βελτίωση των αεροδρομιακών υποδομών και η εφαρμογή “πράσινων αεροδρομίων” μπορούν να περιορίσουν σημαντικά τις έμμεσες εκπομπές CO₂.

Πέρα από τις άμεσες εκπομπές κατά την πτήση, σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα παρουσιάζει και η αλυσίδα παραγωγής καυσίμων. Η εξόρυξη, διύλιση και μεταφορά συμβατικών αεροπορικών καυσίμων απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας και συνοδεύονται από επιπλέον εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι Benajes et al. (2024) αναφέρουν ότι η συνολική αξιολόγηση του κύκλου ζωής των καυσίμων είναι απαραίτητη για την αποτίμηση του πραγματικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος της αεροπορίας.

Εκτός από το CO₂, η αεροπορία εκπέμπει και άλλα αέρια και σωματίδια που επηρεάζουν το κλίμα, όπως οξείδια αζώτου (NO_x), υδρατμούς και αιωρούμενα σωματίδια. Οι εκπομπές αυτές συμβάλλουν στον σχηματισμό contrails και νεφών υψηλού υψομέτρου, τα οποία ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι Delbecq et al. (2025) υπογραμμίζουν ότι οι μη-CO₂ επιδράσεις της αεροπορίας μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη συνολική κλιματική επιβάρυνση του τομέα.

Η συνεχής αύξηση της παγκόσμιας αεροπορικής ζήτησης ενισχύει περαιτέρω τις εκπομπές. Σύμφωνα με τους Song et al. (2025), η επιβατική και εμπορευματική αεροπορική δραστηριότητα αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται τις επόμενες δεκαετίες, καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη βιώσιμων ενεργειακών λύσεων. Η πλήρης ηλεκτροδότηση της αεροπορίας θεωρείται προς το παρόν τεχνικά δύσκολη για μεγάλες αποστάσεις, λόγω των περιορισμών των σημερινών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.

Για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν τα Sustainable Aviation Fuels (SAF) και οι τεχνολογίες αξιοποίησης CO₂. Οι Undavalli et al. (2024) υποστηρίζουν ότι τα βιώσιμα καύσιμα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις καθαρές εκπομπές άνθρακα της αεροπορίας, χωρίς να απαιτούνται εκτεταμένες τροποποιήσεις στους κινητήρες και στις υπάρχουσες υποδομές.

2.3 Βασικές αρχές δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS)

Οι τεχνολογίες δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS) αποτελούν μία από τις σημαντικότερες στρατηγικές αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στη δέσμευση CO₂ από βιομηχανικές ή ενεργειακές πηγές, στην αξιοποίησή του ως πρώτης ύλης για παραγωγή προϊόντων και καυσίμων ή στην ασφαλή αποθήκευσή του σε γεωλογικούς σχηματισμούς, ώστε να αποτραπεί η απελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα.

Η βασική φιλοσοφία των CCUS είναι η μετατροπή του CO₂ από περιβαλλοντικό ρύπο σε αξιοποιήσιμο ενεργειακό και βιομηχανικό πόρο. Σύμφωνα με τους Eyitayo et al. (2024), τα συστήματα CCUS μπορούν να λειτουργήσουν ως γέφυρα μεταξύ συμβατικών ενεργειακών συστημάτων και ενός μέλλοντος χαμηλών εκπομπών

άνθρακα, ιδιαίτερα σε τομείς όπου η πλήρης απανθρακοποίηση είναι τεχνικά δύσκολη, όπως η αεροπορία και η βαριά βιομηχανία.

Η πρώτη φάση των CCUS είναι η δέσμευση CO₂. Η δέσμευση μπορεί να πραγματοποιηθεί πριν, κατά ή μετά την καύση καυσίμων. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι η μετακαυσασέρια δέσμευση (post-combustion capture), όπου το CO₂ απομακρύνεται από τα καυσάερια μέσω χημικών απορροφητών, μεμβρανών ή προσροφητικών υλικών. Παράλληλα, αναπτύσσονται τεχνολογίες άμεσης δέσμευσης από την ατμόσφαιρα (Direct Air Capture – DAC), οι οποίες επιτρέπουν την απομάκρυνση CO₂ απευθείας από τον αέρα. Οι Oloore et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα προηγμένα μεταλλικά οξείδια και οι νέοι καταλύτες ενισχύουν σημαντικά την αποδοτικότητα των διεργασιών δέσμευσης και μετατροπής CO₂.

Μετά τη δέσμευση, το CO₂ μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή καυσίμων, χημικών προϊόντων και συνθετικών υδρογονανθράκων. Η αξιοποίηση αυτή αποτελεί το στάδιο Carbon Utilization και θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη δημιουργία κυκλικών ενεργειακών συστημάτων. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) αναφέρουν ότι το CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασική πρώτη ύλη για παραγωγή βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων μέσω διεργασιών Power-to-Liquid και Fischer–Tropsch synthesis.

Η παραγωγή e-fuels βασίζεται συνήθως στον συνδυασμό δεσμευμένου CO₂ με πράσινο υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης νερού. Το παραγόμενο syngas μετατρέπεται σε συνθετικά καύσιμα χαμηλού άνθρακα, όπως e-kerosene και μεθανόλη. Οι Panzone et al. (2020) τονίζουν ότι οι διεργασίες αυτές μπορούν να επιτύχουν σχεδόν ουδέτερο ανθρακικό ισοζύγιο όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Εκτός από τη χημική αξιοποίηση, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι βιολογικές διεργασίες αξιοποίησης CO₂. Οι Ahmad και Ashraf (2025) αναφέρουν ότι οι μικροάλγες και άλλοι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί μπορούν να δεσμεύουν αποτελεσματικά CO₂ και να παράγουν βιομάζα κατάλληλη για παραγωγή biofuels. Παρόμοια, οι Panich et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η μεταβολική μηχανική μικροοργανισμών επιτρέπει τη βιοσύνθεση καυσίμων και χημικών προϊόντων απευθείας από CO₂.

Το τρίτο στάδιο των CCUS είναι η αποθήκευση άνθρακα (Carbon Storage). Όταν το CO₂ δεν αξιοποιείται άμεσα, μπορεί να αποθηκευτεί σε υπόγειους γεωλογικούς

σχηματισμούς, όπως εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου ή βαθιά αλατούχα υδροφόρα στρώματα. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στη μακροχρόνια απομόνωση του CO₂ από την ατμόσφαιρα. Παράλληλα, διερευνώνται τεχνολογίες ορυκτοποίησης, όπου το CO₂ μετατρέπεται σε σταθερές ανόργανες ενώσεις.

Παρά τις σημαντικές προοπτικές των CCUS, εξακολουθούν να υπάρχουν τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις. Το υψηλό ενεργειακό κόστος δέσμευσης CO₂, οι ανάγκες μεταφοράς και αποθήκευσης, καθώς και η περιορισμένη διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας αποτελούν βασικά εμπόδια για τη μαζική εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών. Οι Segovia-Hernandez (2025) και Liu et al. (2025) υπογραμμίζουν ότι η περαιτέρω ανάπτυξη των CCUS απαιτεί επενδύσεις, διεθνή συνεργασία και πολιτικές στήριξης.

2.4 Ορισμός και κατηγορίες βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας

Τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας (Sustainable Aviation Fuels – SAF) αποτελούν εναλλακτικά καύσιμα χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος που έχουν σχεδιαστεί ώστε να υποκαθιστούν μερικώς ή πλήρως τα συμβατικά αεροπορικά καύσιμα ορυκτής προέλευσης. Τα SAF παράγονται από ανανεώσιμες ή ανακυκλώσιμες πρώτες ύλες και στοχεύουν στη σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Η ανάπτυξη των συγκεκριμένων καυσίμων θεωρείται κρίσιμη για την απανθρακοποίηση της αεροπορίας, καθώς ο συγκεκριμένος τομέας παρουσιάζει περιορισμένες δυνατότητες άμεσης ηλεκτροδότησης λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων των πτήσεων μεγάλων αποστάσεων.

Σύμφωνα με τους Undavalli et al. (2024), τα SAF αποτελούν σήμερα τη σημαντικότερη τεχνολογική επιλογή για τη μείωση των εκπομπών CO₂ στις αερομεταφορές, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα υπάρχοντα αεροσκάφη χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις στους κινητήρες και στις υποδομές ανεφοδιασμού. Τα καύσιμα αυτά χαρακτηρίζονται ως “drop-in fuels”, επειδή είναι συμβατά με τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1 και μπορούν να αναμιχθούν με αυτά σε διαφορετικά ποσοστά.

Ο όρος SAF περιλαμβάνει διάφορες κατηγορίες καυσίμων που διαφέρουν ως προς τις πρώτες ύλες, τις τεχνολογίες παραγωγής και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες είναι τα βιοκαύσιμα αεροπορίας (biojet fuels), τα οποία παράγονται από βιομάζα, φυτικά έλαια, γεωργικά υπολείμματα, οργανικά

απόβλητα και μικροάλγες. Οι Lutz et al. (2024) αναφέρουν ότι οι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί και οι μικροάλγες αποτελούν ιδιαίτερα υποσχόμενες πρώτες ύλες λόγω της υψηλής ικανότητας δέσμευσης CO₂ και της παραγωγής λιπιδίων κατάλληλων για μετατροπή σε καύσιμα αεροπορίας.

Μία από τις πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες βιοκαυσίμων είναι η διαδικασία Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), όπου φυτικά έλαια και λιπαρές ύλες υδρογονούνται για την παραγωγή συνθετικών παραφινικών καυσίμων. Σύμφωνα με τους Raji et al. (2025), τα HEFA καύσιμα παρουσιάζουν υψηλή συμβατότητα με τους αεροπορικούς κινητήρες και σημαντική μείωση εκπομπών συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα.

Μια δεύτερη σημαντική κατηγορία είναι τα συνθετικά καύσιμα ή e-fuels, τα οποία παράγονται μέσω αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα και πράσινου υδρογόνου. Τα καύσιμα αυτά βασίζονται στις τεχνολογίες Power-to-Liquid (PtL), όπου το CO₂ μετατρέπεται σε συνθετικούς υδρογονάνθρακες μέσω διεργασιών όπως η Reverse Water Gas Shift (RWGS) και η σύνθεση Fischer–Tropsch. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα e-fuels μπορούν να προσφέρουν σχεδόν ουδέτερο ανθρακικό ισοζύγιο όταν η ηλεκτρική ενέργεια και το υδρογόνο προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές.

Σημαντική κατηγορία αποτελούν τα Alcohol-to-Jet (ATJ) καύσιμα, τα οποία παράγονται μέσω μετατροπής αλκοολών όπως αιθανόλη ή βουτανόλη σε υδρογονάνθρακες αεροπορικής χρήσης. Παράλληλα, οι τεχνολογίες Methanol-to-Jet (MTJ) επιτρέπουν τη μετατροπή μεθανόλης σε συνθετικά αεροπορικά καύσιμα χαμηλών εκπομπών άνθρακα (Savva et al., 2025).

Τα SAF διακρίνονται επίσης ανάλογα με την προέλευση του άνθρακα που χρησιμοποιείται στην παραγωγή τους. Ορισμένα καύσιμα βασίζονται σε βιογενές CO₂, ενώ άλλα αξιοποιούν διοξείδιο του άνθρακα που δεσμεύεται από βιομηχανικές διεργασίες ή απευθείας από την ατμόσφαιρα μέσω Direct Air Capture (DAC). Οι Ozkan et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η αξιοποίηση CO₂ για την παραγωγή e-SAF αποτελεί βασικό βήμα για τη δημιουργία κυκλικών ενεργειακών συστημάτων στην αεροπορία (ASTM International, 2024).

Παρά τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, τα SAF αντιμετωπίζουν ακόμη προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος παραγωγής, τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών

και τις ανάγκες ανανεώσιμης ενέργειας. Οι Liu et al. (2025) αναφέρουν ότι η μεγάλη κλίμακα παραγωγής SAF απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε ενεργειακές υποδομές, πράσινο υδρογόνο και τεχνολογίες δέσμευσης CO₂.

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των SAF εξαρτάται από ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Η χρήση πρώτων υλών που ανταγωνίζονται την παραγωγή τροφίμων ή προκαλούν αποψίλωση δασών μπορεί να μειώσει τα συνολικά περιβαλλοντικά οφέλη. Για τον λόγο αυτό, οι Raman et al. (2024) υπογραμμίζουν τη σημασία ανάπτυξης βιώσιμων αλυσίδων παραγωγής και αυστηρών κριτηρίων πιστοποίησης.

2.5 Συμβατικά καύσιμα Jet A-1 και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Το Jet A-1 αποτελεί το κυρίαρχο συμβατικό καύσιμο που χρησιμοποιείται στην παγκόσμια πολιτική αεροπορία και βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά σε ορυκτές πρώτες ύλες, κυρίως αργό πετρέλαιο. Πρόκειται για καύσιμο τύπου κηροζίνης υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, σχεδιασμένο ώστε να εξασφαλίζει ασφαλή και αποδοτική λειτουργία των αεροπορικών κινητήρων σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και συνθηκών πτήσης. Παρά τα τεχνικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, η χρήση του συνδέεται με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η βασική περιβαλλοντική επιβάρυνση του Jet A-1 σχετίζεται με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά την καύση του στους κινητήρες αεροσκαφών. Κατά τη διαδικασία καύσης, οι υδρογονάνθρακες του καυσίμου αντιδρούν με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, παράγοντας θερμική ενέργεια, CO₂ και υδρατμούς. Σύμφωνα με τους Raji et al. (2025), η καύση ενός κιλού Jet A-1 οδηγεί στην παραγωγή περίπου 3,16 kg CO₂, γεγονός που καθιστά την αεροπορία σημαντική πηγή ανθρωπογενών εκπομπών άνθρακα.

Η περιβαλλοντική επίδραση του Jet A-1 δεν περιορίζεται μόνο στις άμεσες εκπομπές CO₂. Η εξόρυξη, η διύλιση, η μεταφορά και η αποθήκευση του πετρελαίου απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας και συνοδεύονται από πρόσθετες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι Benajes et al. (2024) επισημαίνουν ότι το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα των συμβατικών καυσίμων πρέπει να αξιολογείται σε όλο τον κύκλο ζωής τους και όχι μόνο κατά τη φάση της καύσης.

Οι κινητήρες αεροσκαφών εκπέμπουν και άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως οξείδια αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα, άκαυστους υδρογονάνθρακες

και αιωρούμενα σωματίδια. Οι εκπομπές αυτές συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και επηρεάζουν αρνητικά τόσο το κλίμα όσο και την ανθρώπινη υγεία. Οι Delbecq et al. (2025) αναφέρουν ότι οι μη-CO₂ επιδράσεις της αεροπορίας, όπως ο σχηματισμός contrails και νεφών υψηλού υψομέτρου, μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη συνολική κλιματική επιβάρυνση του τομέα.

Η εξάρτηση της αεροπορίας από το Jet A-1 δημιουργεί επίσης ζητήματα ενεργειακής ασφάλειας και γεωπολιτικής εξάρτησης από τις αγορές πετρελαίου. Οι διακυμάνσεις στις τιμές του αργού πετρελαίου επηρεάζουν άμεσα το λειτουργικό κόστος των αεροπορικών εταιρειών και τη σταθερότητα του τομέα. Σύμφωνα με τους Dahal et al. (2021), η ανάγκη διαφοροποίησης των ενεργειακών πηγών της αεροπορίας αποτελεί βασικό κίνητρο ανάπτυξης εναλλακτικών καυσίμων χαμηλού άνθρακα. Το Jet A-1 συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ λόγω της συνεχούς αύξησης της αεροπορικής κίνησης. Οι Song et al. (2025) υποστηρίζουν ότι χωρίς την υιοθέτηση βιώσιμων καυσίμων και τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών, οι εκπομπές της αεροπορίας ενδέχεται να αυξηθούν δραματικά έως το 2050.

Η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του Jet A-1 έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη στρατηγικών βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας των αεροσκαφών. Οι σύγχρονοι κινητήρες εμφανίζουν μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και χαμηλότερες εκπομπές, ενώ βελτιώσεις στην αεροδυναμική και στα υλικά κατασκευής συμβάλλουν στη μείωση του συνολικού βάρους των αεροσκαφών. Ωστόσο, οι τεχνολογικές αυτές εξελίξεις δεν επαρκούν από μόνες τους για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας.

Για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται πλέον στα Sustainable Aviation Fuels (SAF) και στα συνθετικά καύσιμα που παράγονται μέσω αξιοποίησης CO₂ και πράσινου υδρογόνου. Οι Schemme et al. (2017) αναφέρουν ότι τα συνθετικά καύσιμα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις καθαρές εκπομπές άνθρακα σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1.

2.6 Διεθνείς πολιτικές και κανονισμοί για την απανθρακοποίηση της αεροπορίας

Η αυξανόμενη συμβολή της αεροπορίας στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έχει οδηγήσει διεθνείς οργανισμούς, κυβερνήσεις και θεσμικά όργανα στην ανάπτυξη πολιτικών και κανονισμών που στοχεύουν στην απανθρακοποίηση του τομέα. Η ανάγκη περιορισμού της κλιματικής αλλαγής και επίτευξης των στόχων της Συμφωνίας των Παρισίων έχει καταστήσει την αεροπορία βασικό πεδίο εφαρμογής στρατηγικών μείωσης εκπομπών CO₂, ανάπτυξης βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (SAF) και βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας.

Μία από τις σημαντικότερες διεθνείς συμφωνίες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής είναι η Συμφωνία των Παρισίων, η οποία υιοθετήθηκε το 2015 στο πλαίσιο της Σύμβασης-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC). Η συμφωνία θέτει ως βασικό στόχο τον περιορισμό της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από τους 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Παρότι η αεροπορία δεν εντάσσεται άμεσα σε όλους τους εθνικούς στόχους μείωσης εκπομπών, οι Song et al. (2025) επισημαίνουν ότι ο τομέας καλείται να συμβάλει ουσιαστικά στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050.

Κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση πολιτικών για την αεροπορία διαδραματίζει ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO). Ο ICAO ανέπτυξε το πρόγραμμα Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), το οποίο αποτελεί τον πρώτο παγκόσμιο μηχανισμό ελέγχου και αντιστάθμισης εκπομπών CO₂ στις διεθνείς αερομεταφορές. Το CORSIA επιδιώκει τη σταθεροποίηση των καθαρών εκπομπών της αεροπορίας μέσω μηχανισμών αντιστάθμισης άνθρακα και ενίσχυσης της χρήσης βιώσιμων καυσίμων. Σύμφωνα με τους Delbecq et al. (2025), το πρόγραμμα αυτό αποτελεί βασικό εργαλείο της διεθνούς στρατηγικής απανθρακοποίησης του αεροπορικού τομέα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναπτύξει ένα από τα πιο φιλόδοξα ρυθμιστικά πλαίσια για την απανθρακοποίηση των μεταφορών και της αεροπορίας. Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal), η ΕΕ στοχεύει στη μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 και στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Ένα από τα σημαντικότερα μέτρα είναι ο κανονισμός ReFuelEU Aviation, ο οποίος προβλέπει

σταδιακή αύξηση της υποχρεωτικής χρήσης SAF στις πτήσεις που αναχωρούν από ευρωπαϊκά αεροδρόμια (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2015)

Οι Raman et al. (2024) αναφέρουν ότι οι ευρωπαϊκές πολιτικές δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη προηγμένων βιοκαυσίμων και συνθετικών e-fuels μέσω αξιοποίησης CO₂ και πράσινου υδρογόνου. Παράλληλα, προωθούνται επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τεχνολογίες CCUS και πράσινες υποδομές αεροδρομίων.

Εκτός από τις ρυθμιστικές πολιτικές, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και τα διεθνή πρότυπα πιστοποίησης βιώσιμων καυσίμων. Οι τεχνολογίες SAF πρέπει να πληρούν αυστηρές προδιαγραφές ασφάλειας, ποιότητας και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας ώστε να εγκριθούν για χρήση στην αεροπορία. Οι Undavalli et al. (2024) επισημαίνουν ότι οι διεθνείς οργανισμοί αεροπορικής ασφάλειας συνεργάζονται στενά με τη βιομηχανία για την ανάπτυξη κοινών προτύπων και διαδικασιών πιστοποίησης.

Αρκετές χώρες εφαρμόζουν εθνικές στρατηγικές για την ενίσχυση της παραγωγής SAF μέσω οικονομικών κινήτρων, φορολογικών ελαφρύνσεων και επενδύσεων σε έρευνα και ανάπτυξη. Οι Ηνωμένες Πολιτείες, για παράδειγμα, έχουν ενισχύσει σημαντικά την παραγωγή βιώσιμων καυσίμων μέσω προγραμμάτων επιδότησης και υποστήριξης της πράσινης ενέργειας.

Ωστόσο, η εφαρμογή των διεθνών πολιτικών αντιμετωπίζει ακόμη σημαντικές προκλήσεις. Το υψηλό κόστος παραγωγής SAF, η περιορισμένη διαθεσιμότητα πράσινου υδρογόνου και οι ανάγκες ανάπτυξης νέων υποδομών αποτελούν βασικά εμπόδια για τη γρήγορη μετάβαση της αεροπορίας σε καύσιμα χαμηλού άνθρακα. Οι Liu et al. (2025) τονίζουν ότι η επίτευξη των στόχων απανθρακοποίησης απαιτεί στενή συνεργασία μεταξύ κυβερνήσεων, βιομηχανίας, ερευνητικών φορέων και ενεργειακού τομέα.

2.6.1 Συμφωνία των Παρισίων

Η Συμφωνία των Παρισίων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διεθνείς συμφωνίες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και διαμορφώνει το βασικό παγκόσμιο πλαίσιο για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Υιοθετήθηκε το 2015 στο πλαίσιο της 21ης Διάσκεψης των Μερών (COP21) της Σύμβασης-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) και

τέθηκε σε ισχύ το 2016. Κύριος στόχος της συμφωνίας είναι ο περιορισμός της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας σε επίπεδα αρκετά κάτω από τους 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, με παράλληλη προσπάθεια περιορισμού της αύξησης στον 1,5°C.

Η Συμφωνία των Παρισίων βασίζεται στην αρχή της συλλογικής αλλά διαφοροποιημένης ευθύνης, σύμφωνα με την οποία όλα τα κράτη συμμετέχουν στις προσπάθειες περιορισμού των εκπομπών, λαμβάνοντας υπόψη τις οικονομικές και τεχνολογικές δυνατότητές τους. Κάθε χώρα υποχρεούται να υποβάλλει Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές (Nationally Determined Contributions – NDCs), οι οποίες περιλαμβάνουν στόχους και πολιτικές μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η αεροπορία θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμος τομέας στο πλαίσιο της Συμφωνίας των Παρισίων λόγω της αυξανόμενης συμβολής της στις παγκόσμιες εκπομπές CO₂. Παρότι οι διεθνείς αερομεταφορές δεν εντάσσονται πλήρως στα εθνικά αποθέματα εκπομπών, οι Song et al. (2025) επισημαίνουν ότι η επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας απαιτεί ουσιαστική μείωση των εκπομπών του αεροπορικού τομέα μέσω τεχνολογικής και ενεργειακής μετάβασης.

Η Συμφωνία των Παρισίων έχει ενισχύσει σημαντικά την ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (SAF), τεχνολογιών αξιοποίησης CO₂ και πράσινου υδρογόνου. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) αναφέρουν ότι οι διεθνείς δεσμεύσεις για περιορισμό των εκπομπών έχουν επιταχύνει την έρευνα γύρω από τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται μέσω αξιοποίησης δεσμευμένου CO₂ και ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η Συμφωνία των Παρισίων λειτουργεί ως βασικός μοχλός επενδύσεων στην πράσινη ενέργεια και στις τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα. Οι Tak et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η ανάπτυξη πράσινου υδρογόνου και e-fuels συνδέεται άμεσα με τους διεθνείς στόχους απανθρακοποίησης που απορρέουν από τη Συμφωνία των Παρισίων. Η μετάβαση αυτή θεωρείται απαραίτητη ιδιαίτερα για κλάδους δύσκολης απανθρακοποίησης, όπως η αεροπορία.

Σημαντικό στοιχείο της συμφωνίας αποτελεί και η μακροπρόθεσμη επιδίωξη επίτευξης ισορροπίας μεταξύ ανθρωπογενών εκπομπών και απορροφήσεων άνθρακα κατά το δεύτερο μισό του 21ου αιώνα. Αυτό πρακτικά συνδέεται με την έννοια της κλιματικής ουδετερότητας ή net-zero emissions. Οι Liu et al. (2025) επισημαίνουν ότι

τα καύσιμα χαμηλού άνθρακα και οι τεχνολογίες CCUS αποτελούν βασικά εργαλεία για την επίτευξη των στόχων net-zero.

Παρόλα αυτά, η εφαρμογή της Συμφωνίας των Παρισίων αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις. Οι εθνικές δεσμεύσεις πολλών χωρών εξακολουθούν να θεωρούνται ανεπαρκείς για την επίτευξη του στόχου του 1,5°C, ενώ οι τεχνολογίες απανθρακοποίησης της αεροπορίας βρίσκονται ακόμη σε φάση ανάπτυξης και εμπορικής ωρίμανσης. Οι Delbecq et al. (2025) αναφέρουν ότι η αεροπορία θα χρειαστεί συνδυασμό μέτρων, όπως ενεργειακή αποδοτικότητα, SAF, υδρογόνο και τεχνολογίες αξιοποίησης CO₂, ώστε να ευθυγραμμιστεί με τους στόχους της Συμφωνίας.

Η Συμφωνία των Παρισίων ενίσχυσε τη διεθνή συνεργασία μεταξύ κρατών, βιομηχανίας και ερευνητικών φορέων για την ανάπτυξη κοινών στρατηγικών απανθρακοποίησης. Η συνεργασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αεροπορία, καθώς πρόκειται για παγκοσμιοποιημένο τομέα που απαιτεί ενιαία πρότυπα και διακρατικό συντονισμό.

2.6.2 ICAO και CORSIA

Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization – ICAO) αποτελεί εξειδικευμένο οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών και είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση και τον συντονισμό της διεθνούς πολιτικής αεροπορίας. Ο ICAO διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη στρατηγικών για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αεροπορίας και ιδιαίτερα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Στο πλαίσιο αυτό, ανέπτυξε το πρόγραμμα Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), το οποίο αποτελεί τον πρώτο παγκόσμιο μηχανισμό περιορισμού εκπομπών άνθρακα στις διεθνείς αερομεταφορές.

Το CORSIA εγκρίθηκε το 2016 και εφαρμόζεται σταδιακά από το 2021. Βασικός του στόχος είναι η σταθεροποίηση των καθαρών εκπομπών CO₂ από τη διεθνή αεροπορία μέσω μηχανισμών αντιστάθμισης άνθρακα και προώθησης βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (SAF). Το σύστημα απαιτεί από τις αεροπορικές εταιρείες να αντισταθμίζουν τις εκπομπές που υπερβαίνουν συγκεκριμένα επίπεδα αναφοράς, επενδύοντας σε πιστοποιημένα έργα μείωσης εκπομπών ή χρησιμοποιώντας καύσιμα

χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος (International Civil Aviation Organization (ICAO), 2023).

Σύμφωνα με τους Delbecq et al. (2025), το CORSIA αποτελεί σημαντικό βήμα προς τη διεθνή διακυβέρνηση των εκπομπών της αεροπορίας, καθώς δημιουργεί κοινό πλαίσιο παρακολούθησης, αναφοράς και επαλήθευσης εκπομπών CO₂. Παράλληλα, επιδιώκει να αποτρέψει την ύπαρξη διαφορετικών εθνικών κανονισμών που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν ανισότητες στον παγκόσμιο αεροπορικό ανταγωνισμό.

Η λειτουργία του CORSIA βασίζεται σε τρεις βασικούς άξονες: τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των αεροσκαφών, την ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων και την αντιστάθμιση εκπομπών μέσω επενδύσεων σε περιβαλλοντικά έργα. Οι Undavalli et al. (2024) επισημαίνουν ότι η χρήση SAF αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της στρατηγικής του ICAO, καθώς μπορεί να επιφέρει σημαντικές μειώσεις εκπομπών χωρίς να απαιτούνται ριζικές αλλαγές στους κινητήρες και στις αεροπορικές υποδομές.

Το CORSIA δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής των καυσίμων. Για να αναγνωριστεί ένα καύσιμο ως βιώσιμο στο πλαίσιο του προγράμματος, πρέπει να αποδεικνύεται σημαντική μείωση εκπομπών σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1. Οι Raman et al. (2024) αναφέρουν ότι η εφαρμογή αυστηρών κριτηρίων βιωσιμότητας είναι απαραίτητη ώστε να διασφαλιστεί ότι τα SAF προσφέρουν πραγματικά περιβαλλοντικά οφέλη.

Ο ICAO προωθεί την ανάπτυξη τεχνολογιών αξιοποίησης CO₂ και συνθετικών e-fuels μέσω διεθνών συνεργασιών και ερευνητικών προγραμμάτων. Οι Ozkan et al. (2025) τονίζουν ότι τα e-fuels που παράγονται από δεσμευμένο CO₂ και πράσινο υδρογόνο μπορούν να αποτελέσουν βασικό πυλώνα της στρατηγικής απανθρακοποίησης της διεθνούς αεροπορίας.

Ωστόσο, το CORSIA έχει δεχθεί και κριτική. Ορισμένοι ερευνητές θεωρούν ότι οι μηχανισμοί αντιστάθμισης εκπομπών δεν επαρκούν για την ουσιαστική μείωση των συνολικών εκπομπών του τομέα. Οι Song et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η πραγματική απανθρακοποίηση της αεροπορίας απαιτεί σημαντική μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και μαζική ανάπτυξη SAF και τεχνολογιών μηδενικού άνθρακα.

Προκλήσεις εξακολουθούν να υπάρχουν σχετικά με το κόστος παραγωγής βιώσιμων καυσίμων, τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών και τη δημιουργία διεθνών

υποδομών ανεφοδιασμού. Οι Liu et al. (2025) επισημαίνουν ότι η επιτυχία του CORSIA εξαρτάται από τη συνεργασία κυβερνήσεων, αεροπορικών εταιρειών, ενεργειακού τομέα και βιομηχανίας καυσίμων.

2.6.3 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και ReFuelEU Aviation

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) αποτελεί τη βασική στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και τη μετάβαση προς μία κλιματικά ουδέτερη οικονομία έως το 2050. Παρουσιάστηκε το 2019 από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και περιλαμβάνει ένα ευρύ σύνολο πολιτικών που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την προώθηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη βιώσιμη ανάπτυξη όλων των οικονομικών τομέων, συμπεριλαμβανομένης της αεροπορίας.

Η αεροπορία θεωρείται στρατηγικός τομέας για την επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, καθώς παρουσιάζει υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και αυξανόμενες εκπομπές CO₂. Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση ανέπτυξε την πρωτοβουλία ReFuelEU Aviation, η οποία στοχεύει στην προώθηση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (SAF) και στη μείωση της εξάρτησης του τομέα από τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1.

Ο βασικός στόχος του ReFuelEU Aviation είναι η σταδιακή αύξηση της υποχρεωτικής συμμετοχής SAF στα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα ευρωπαϊκά αεροδρόμια. Η πολιτική αυτή επιδιώκει να δημιουργήσει σταθερή ζήτηση για βιώσιμα καύσιμα, ενθαρρύνοντας παράλληλα επενδύσεις σε τεχνολογίες παραγωγής biofuels και e-fuels. Σύμφωνα με τους Raman et al. (2024), το ReFuelEU Aviation αποτελεί ένα από τα πιο φιλόδοξα ρυθμιστικά πλαίσια διεθνώς για την ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (European Commission, 2023).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα συνθετικά καύσιμα (e-SAF) που παράγονται μέσω αξιοποίησης CO₂ και πράσινου υδρογόνου. Οι Pio et al. (2025) αναφέρουν ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί έντονα την παραγωγή e-fuels από βιογενές CO₂ και ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, με στόχο τη δημιουργία κυκλικών ενεργειακών συστημάτων χαμηλού άνθρακα.

Πίνακας 1 :

Έτος	SAF (%)	Synthetic fuels (%)
2025	2	-
2030	6	1.2
2035	20	5
2040	34	10
2045	42	15
2050	70	35

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία συνδέεται στενά με το πακέτο “Fit for 55”, το οποίο προβλέπει μείωση των καθαρών εκπομπών της ΕΕ κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030. Στο πλαίσιο αυτό, ενισχύεται και το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU ETS), το οποίο περιλαμβάνει πλέον αυστηρότερους κανόνες για την αεροπορία. Οι αεροπορικές εταιρείες καλούνται να μειώσουν τις εκπομπές τους ή να αγοράσουν δικαιώματα άνθρακα, αυξάνοντας τα κίνητρα χρήσης SAF.

Το κανονιστικό πλαίσιο ReFuelEU Aviation καθορίζει σταδιακά αυξανόμενα ποσοστά υποχρεωτικής ανάμιξης SAF. Συγκεκριμένα, απαιτείται 2% SAF το 2025, 6% το 2030, 20% το 2035, 34% το 2040, 42% το 2045 και 70% έως το 2050. Παράλληλα, τα συνθετικά καύσιμα (e-fuels) αποκτούν ειδικούς υποστόχους που αυξάνονται σταδιακά από 1.2% το 2030 έως 35% το 2050.

Οι Delbecq et al. (2025) επισημαίνουν ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση επιδιώκει έναν συνδυασμό τεχνολογικών και ρυθμιστικών μέτρων, όπως ενεργειακή αποδοτικότητα, πράσινα αεροδρόμια, ανάπτυξη υδρογόνου και αξιοποίηση CO₂ για παραγωγή καυσίμων. Η στρατηγική αυτή θεωρείται απαραίτητη για την επίτευξη μακροπρόθεσμης κλιματικής ουδετερότητας.

Η εφαρμογή του ReFuelEU Aviation συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Το υψηλό κόστος παραγωγής SAF, η περιορισμένη διαθεσιμότητα πράσινου υδρογόνου και η ανάγκη ανάπτυξης νέων ενεργειακών υποδομών αποτελούν βασικά εμπόδια για την ταχεία διείσδυση των βιώσιμων καυσίμων στην αγορά. Οι Segovia-Hernandez (2025) και Liu et al. (2025) τονίζουν ότι απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις και πολιτικές στήριξης ώστε να καταστεί εφικτή η μεγάλης κλίμακας παραγωγή e-fuels.

ReFuelEU Aviation
2025 → 2% SAF
2030 → 6%
2035 → 20%
2040 → 34%
2045 → 42%
2050 → 70% SAF + 35% synthetic fuels

Παρά τις δυσκολίες, η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και το ReFuelEU Aviation θεωρούνται καθοριστικής σημασίας για τη μελλοντική μετάβαση της αεροπορίας σε ένα πιο βιώσιμο μοντέλο λειτουργίας. Η προώθηση βιώσιμων καυσίμων, τεχνολογιών CCUS και πράσινης ενέργειας δημιουργεί τις προϋποθέσεις για σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ και για την ανάπτυξη ενός κλιματικά ουδέτερου αεροπορικού τομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δέσμευση και πηγές CO₂ για παραγωγή βιώσιμων καυσίμων

3.1 Βιογενείς και βιομηχανικές πηγές CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πρώτες ύλες για την παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας και συνθετικών e-fuels. Η αξιοποίησή του μέσω τεχνολογιών Carbon Capture and Utilization (CCU) επιτρέπει τη μετατροπή ενός αερίου του θερμοκηπίου σε πολύτιμο ενεργειακό πόρο, συμβάλλοντας στην κυκλική οικονομία και στη μείωση των καθαρών εκπομπών άνθρακα. Οι πηγές CO₂ που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες αυτές διακρίνονται κυρίως σε βιογενείς και βιομηχανικές, καθεμία από τις οποίες παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και περιορισμούς.

Οι βιογενείς πηγές CO₂ προέρχονται από φυσικές ή βιολογικές διεργασίες που σχετίζονται με τη βιομάζα και τον βιολογικό κύκλο του άνθρακα. Παραδείγματα αποτελούν οι μονάδες βιοενέργειας, οι διεργασίες ζύμωσης στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών, οι εγκαταστάσεις βιοαερίου, καθώς και οι μονάδες επεξεργασίας βιομάζας. Το βασικό πλεονέκτημα των βιογενών εκπομπών είναι ότι ο άνθρακας που απελευθερώνεται είχε προηγουμένως δεσμευτεί από την ατμόσφαιρα μέσω της

φωτοσύνθεσης. Ως αποτέλεσμα, η αξιοποίηση του συγκεκριμένου CO₂ θεωρείται περισσότερο συμβατή με την έννοια της ανθρακικής ουδετερότητας.

Σύμφωνα με τους Ahmad και Ashraf (2025), οι μικροάλγες αποτελούν μία από τις πλέον υποσχόμενες βιογενείς πηγές αξιοποίησης CO₂, καθώς παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα φωτοσυνθετικής δέσμευσης άνθρακα και μπορούν παράλληλα να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Η χρήση μικροαλγών επιτρέπει την άμεση ενσωμάτωση του δεσμευμένου CO₂ σε βιομάζα πλούσια σε λιπίδια, τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας.

Οι Panich et al. (2025) αναφέρουν ότι μικροβιακά συστήματα όπως το *Cupriavidus necator* μπορούν να αξιοποιήσουν CO₂ ως πηγή άνθρακα για τη βιοσύνθεση καυσίμων και χημικών ενώσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας. Οι βιοτεχνολογικές αυτές προσεγγίσεις θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές για την ανάπτυξη βιοδιυλιστηρίων χαμηλού άνθρακα.

Εκτός από τις βιογενείς πηγές, ιδιαίτερα σημαντικές είναι και οι βιομηχανικές πηγές CO₂. Οι εκπομπές αυτές προέρχονται κυρίως από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, τσιμεντοβιομηχανίες, χαλυβουργίες, διυλιστήρια και χημικές βιομηχανίες. Οι εγκαταστάσεις αυτές παράγουν μεγάλες ποσότητες CO₂ σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις, γεγονός που καθιστά τεχνικά ευκολότερη και οικονομικότερη τη δέσμευση του αερίου.

Οι Okoye-Chine et al. (2024) υποστηρίζουν ότι οι βιομηχανικές πηγές αποτελούν σήμερα την κυριότερη πηγή CO₂ για εφαρμογές CCUS, καθώς παρέχουν συνεχή και μεγάλης κλίμακας ροή εκπομπών. Το δεσμευμένο CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μεθανόλης, συνθετικών καυσίμων Fischer–Tropsch και άλλων υδρογονανθράκων κατάλληλων για αεροπορική χρήση.

Σημαντική εφαρμογή αποτελεί και η αξιοποίηση βιογενούς CO₂ από βιομηχανίες χαρτοπολτού και βιοενέργειας. Οι Pio et al. (2025) αναφέρουν ότι το CO₂ που δεσμεύεται από μονάδες χαρτοβιομηχανίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή electro-SAF (eSAF) μέσω συνδυασμού με πράσινο υδρογόνο. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα βιώσιμη, καθώς συνδυάζει βιογενή άνθρακα με ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια.

Οι διαφορετικές πηγές CO₂ παρουσιάζουν και προκλήσεις. Οι βιογενείς πηγές συχνά χαρακτηρίζονται από μικρότερη κλίμακα και εποχικές διακυμάνσεις, ενώ οι βιομηχανικές εκπομπές ενδέχεται να συνδέονται με συνεχιζόμενη χρήση ορυκτών καυσίμων. Οι Eyitayo et al. (2024) επισημαίνουν ότι η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των τεχνολογιών CCUS εξαρτάται από την προέλευση του CO₂, την κατανάλωση ενέργειας και την τελική χρήση του άνθρακα.

Η καθαρότητα του δεσμευμένου CO₂ αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων. Ορισμένες βιομηχανικές εκπομπές περιέχουν προσμίξεις, όπως οξείδια αζώτου ή θείου, που απαιτούν επιπλέον στάδια καθαρισμού πριν από τη χημική αξιοποίηση. Οι Kim et al. (2025) τονίζουν ότι η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών διαχωρισμού και καθαρισμού CO₂ αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποδοτική παραγωγή e-fuels.

3.2 Άμεση δέσμευση CO₂ από την ατμόσφαιρα (Direct Air Capture – DAC)

Η τεχνολογία Άμεσης Δέσμευσης CO₂ από την Ατμόσφαιρα (Direct Air Capture – DAC) αποτελεί μία από τις πλέον καινοτόμες προσεγγίσεις στον τομέα της διαχείρισης άνθρακα και της απανθρακοποίησης. Η βασική αρχή της τεχνολογίας DAC είναι η απομάκρυνση διοξειδίου του άνθρακα απευθείας από τον ατμοσφαιρικό αέρα μέσω φυσικοχημικών διεργασιών και η μετέπειτα αξιοποίησή του ή αποθήκευσή του. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, καθώς επιτρέπει τη μείωση της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα ανεξάρτητα από την πηγή εκπομπής.

Direct Air Capture (DAC)
• 0.5–2 MWh/tCO ₂
• 5–9 GJ/tCO ₂
• κόστος 100–600 €/tCO ₂

Η λειτουργία των συστημάτων DAC βασίζεται συνήθως στη χρήση υγρών διαλυμάτων ή στερεών προσροφητικών υλικών που δεσμεύουν επιλεκτικά το CO₂ από τον αέρα. Αφού ολοκληρωθεί η δέσμευση, το CO₂ απελευθερώνεται μέσω θέρμανσης ή μεταβολής πίεσης και συλλέγεται σε συμπυκνωμένη μορφή για περαιτέρω χρήση ή γεωλογική αποθήκευση. Οι Okoye-Chine et al. (2024) αναφέρουν ότι οι τεχνολογίες DAC μπορούν να συνδυαστούν αποτελεσματικά με συστήματα παραγωγής συνθετικών καυσίμων και Power-to-Liquid διεργασίες.

Η σημασία του DAC για την αεροπορία είναι ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς το δεσμευμένο CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων αεροπορίας (e-SAF). Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) επισημαίνουν ότι το DAC παρέχει μία σχεδόν ανεξάντλητη πηγή άνθρακα για την παραγωγή e-fuels, χωρίς να εξαρτάται από συγκεκριμένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή σημειακές πηγές εκπομπών.

Η διαδικασία παραγωγής e-fuels μέσω DAC περιλαμβάνει συνήθως τη δέσμευση CO₂, την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και τη σύνθεση υδρογονανθράκων μέσω διεργασιών όπως η Fischer–Tropsch. Οι Panzone et al. (2020) αναφέρουν ότι η ενσωμάτωση DAC σε συστήματα Power-to-Liquid μπορεί να οδηγήσει σε σχεδόν ουδέτερο ανθρακικό ισοζύγιο, εφόσον η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας DAC είναι η γεωγραφική ευελιξία της. Οι εγκαταστάσεις DAC μπορούν να τοποθετηθούν σε περιοχές με υψηλή διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας, όπως περιοχές με έντονη ηλιακή ή αιολική δραστηριότητα. Οι Ozkan et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η αποκεντρωμένη παραγωγή e-fuels μέσω DAC μπορεί να ενισχύσει τη βιωσιμότητα της αεροπορίας και να μειώσει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.

Η τεχνολογία DAC συμβάλλει στην ανάπτυξη κυκλικών συστημάτων άνθρακα. Το CO₂ που απελευθερώνεται κατά την καύση των συνθετικών καυσίμων μπορεί θεωρητικά να επαναδεσμευτεί από την ατμόσφαιρα και να χρησιμοποιηθεί εκ νέου για παραγωγή καυσίμων. Οι Schemme et al. (2017) τονίζουν ότι τα συστήματα αυτά μπορούν να δημιουργήσουν σχεδόν κλειστούς κύκλους άνθρακα στις μεταφορές.

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες της τεχνολογίας, το DAC αντιμετωπίζει ακόμη σοβαρές προκλήσεις. Η χαμηλή συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα καθιστά τη διαδικασία ενεργειακά απαιτητική και αυξάνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας. Οι Segovia-Hernandez (2025) αναφέρουν ότι η ενεργειακή κατανάλωση παραμένει ένα από τα βασικότερα εμπόδια για τη μεγάλης κλίμακας εφαρμογή της τεχνολογίας.

Η αποτελεσματικότητα του DAC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα φθηνής ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και πράσινου υδρογόνου. Οι Anand et al. (2025) και Elazab et al. (2024) υποστηρίζουν ότι η ταχεία ανάπτυξη της πράσινης υδρογονοοικονομίας αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για τη βιώσιμη

εφαρμογή συστημάτων DAC και παραγωγής e-fuels. Η χρήση τεχνολογιών Direct Air Capture προσφέρει θεωρητικά μεγαλύτερη κλιματική ευελιξία και δυνατότητα επίτευξης αρνητικών εκπομπών, όμως στις σημερινές συνθήκες εμφανίζει σημαντικά υψηλότερο κόστος και ενεργειακές απαιτήσεις συγκριτικά με την αξιοποίηση συμπυκνωμένων βιογενών ρευμάτων CO₂.

3.3 Δέσμευση CO₂ από βιομηχανικές εγκαταστάσεις

Η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από βιομηχανικές εγκαταστάσεις αποτελεί μία από τις βασικότερες τεχνολογικές προσεγγίσεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την υποστήριξη της μετάβασης προς οικονομία χαμηλού άνθρακα. Οι βιομηχανικοί τομείς, όπως οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, τα διυλιστήρια, οι τσιμεντοβιομηχανίες, οι χαλυβουργίες και οι χημικές βιομηχανίες, συγκαταλέγονται στις μεγαλύτερες πηγές ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ παγκοσμίως. Η αξιοποίηση τεχνολογιών Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) επιτρέπει τη συλλογή του παραγόμενου CO₂ πριν αυτό απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.

Η βασική αρχή της δέσμευσης CO₂ από βιομηχανικές εγκαταστάσεις είναι ο διαχωρισμός του αερίου από τα καυσαέρια ή από τις διεργασίες παραγωγής. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τη μετακαύσιμη δέσμευση (post-combustion capture), την προ-καύσιμη δέσμευση (pre-combustion capture) και την καύση σε καθαρό οξυγόνο (oxy-fuel combustion). Σύμφωνα με τους Eyitayo et al. (2024), οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση των εκπομπών βαριάς βιομηχανίας και στη δημιουργία συστημάτων κυκλικού άνθρακα.

Η μετακαύσιμη δέσμευση αποτελεί σήμερα τη συνηθέστερη τεχνολογία και βασίζεται κυρίως στη χρήση χημικών διαλυτών, όπως αμίνες, για την απορρόφηση CO₂ από τα καυσαέρια. Το δεσμευμένο CO₂ στη συνέχεια απελευθερώνεται μέσω θερμικής επεξεργασίας και συλλέγεται σε συμπιεσμένη μορφή. Οι Oloore et al. (2025) αναφέρουν ότι η ανάπτυξη νέων καταλυτών και προηγμένων υλικών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα των συστημάτων δέσμευσης.

Η σημασία της δέσμευσης CO₂ για την παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Το CO₂ που συλλέγεται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για παραγωγή μεθανόλης, συνθετικών καυσίμων Fischer–Tropsch και e-fuels. Οι Blay-Roger et al. (2024) υποστηρίζουν ότι η αξιοποίηση βιομηχανικού CO₂ σε συνδυασμό με πράσινο υδρογόνο

αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές διαδρομές για τη σύνθεση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας.

Η τεχνολογία Reverse Water Gas Shift (RWGS) επιτρέπει τη μετατροπή του CO₂ σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσο προϊόν για σύνθεση υδρογονανθράκων. Οι Choi et al. (2024) αναφέρουν ότι οι καταλύτες χαλκού παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες βελτίωσης της αποδοτικότητας των διεργασιών RWGS για παραγωγή e-fuels.

Εκτός από την αξιοποίηση, το δεσμευμένο CO₂ μπορεί και να αποθηκευτεί μόνιμα σε γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου και πετρελαίου ή βαθιά αλατούχα υδροφόρα στρώματα. Ωστόσο, οι περισσότερες σύγχρονες στρατηγικές δίνουν έμφαση στην αξιοποίηση του άνθρακα και όχι μόνο στην αποθήκευση, καθώς η μετατροπή του σε καύσιμα δημιουργεί πρόσθετη οικονομική αξία.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η δέσμευση CO₂ από βιομηχανικές εγκαταστάσεις αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις. Το υψηλό ενεργειακό κόστος, η ανάγκη εγκατάστασης νέων υποδομών και οι απαιτήσεις μεταφοράς και αποθήκευσης του CO₂ περιορίζουν ακόμη τη μαζική εφαρμογή των τεχνολογιών CCUS. Οι Segovia-Hernandez (2025) επισημαίνουν ότι η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα φθηνής ανανεώσιμης ενέργειας.

Η πραγματική περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών δέσμευσης εξαρτάται από την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται. Αν η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, οι συνολικές καθαρές μειώσεις εκπομπών μπορεί να είναι περιορισμένες. Οι Liu et al. (2025) υπογραμμίζουν ότι η ενσωμάτωση CCUS με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι απαραίτητη για την επίτευξη ουσιαστικής απανθρακοποίησης.

3.4 Ενεργειακές απαιτήσεις και τεχνοοικονομικές προκλήσεις

Η παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας μέσω αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και τεχνολογιών Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες για την απανθρακοποίηση της αεροπορίας. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών συνοδεύεται από υψηλές ενεργειακές

απαιτήσεις και σοβαρές τεχνοοικονομικές προκλήσεις, οι οποίες επηρεάζουν τη βιωσιμότητα και τη δυνατότητα μεγάλης κλίμακας εφαρμογής τους.

Μία από τις βασικότερες ενεργειακές απαιτήσεις σχετίζεται με τη δέσμευση και τη μετατροπή του CO₂. Η άμεση δέσμευση από την ατμόσφαιρα (Direct Air Capture – DAC) απαιτεί μεγάλες ποσότητες θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης CO₂ στον αέρα. Οι Segovia-Hernandez (2025) αναφέρουν ότι η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί σήμερα τον σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα για την οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογιών DAC και Power-to-Liquid.

Οι τεχνολογίες άμεσης δέσμευσης CO₂ από την ατμόσφαιρα χαρακτηρίζονται από υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης CO₂ στον αέρα (~420 ppm). Τυπικά, οι απαιτήσεις θερμικής ενέργειας κυμαίνονται μεταξύ 5–9 GJ ανά τόνο δεσμευμένου CO₂, ενώ οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνονται περίπου μεταξύ 0.5–2 MWh/tCO₂. Αυτές οι απαιτήσεις επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το κόστος παραγωγής e-fuels.

Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού απαιτεί τεράστιες ποσότητες ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο αποτελεί βασική πρώτη ύλη για τη σύνθεση e-fuels και συνθετικών καυσίμων αεροπορίας μέσω διεργασιών όπως η Fischer–Tropsch και η παραγωγή μεθανόλης. Οι Anand et al. (2025) επισημαίνουν ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα της ηλεκτρόλυσης επηρεάζει άμεσα το συνολικό ενεργειακό και οικονομικό αποτύπωμα των βιώσιμων καυσίμων.

Η μετατροπή του CO₂ σε συνθετικούς υδρογονάνθρακες απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες, πιέσεις και προηγμένα καταλυτικά συστήματα. Οι Choi et al. (2024) αναφέρουν ότι οι διεργασίες Reverse Water Gas Shift (RWGS) και Fischer–Tropsch παρουσιάζουν σημαντικές ενεργειακές απώλειες, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος παραγωγής των e-fuels.

Σημαντική πρόκληση αποτελεί επίσης η ανάγκη διαθεσιμότητας μεγάλων ποσοτήτων ανανεώσιμης ενέργειας. Οι Ozkan et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η μαζική παραγωγή συνθετικών καυσίμων αεροπορίας θα απαιτήσει τεράστια ανάπτυξη ηλιακών, αιολικών και άλλων ανανεώσιμων ενεργειακών υποδομών. Χωρίς καθαρή ηλεκτρική ενέργεια, τα συνολικά περιβαλλοντικά οφέλη των τεχνολογιών CCUS και e-fuels μειώνονται σημαντικά.

Πίνακας 2: Σύγκριση τεχνολογιών δέσμευσης CO₂

Τεχνολογία δέσμευσης	Πηγή CO ₂	Συγκέντρωση CO ₂	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Ενεργειακές απαιτήσεις	Τεχνολογική ωριμότητα
Direct Air Capture (DAC)	Ατμόσφαιρα	~0.04 % (~420 ppm)	Δυνατότητα αρνητικών εκπομπών, ανεξαρτησία τοποθεσίας	Υψηλό κόστος, πολύ ενεργοβόρο	0.5–2 MWh/tC O ₂ + 5–9 GJ/tCO ₂	Αναπτυσσόμενη
Βιογενές CO ₂	Βιομάζα, βιοαέριο, ζυμώσεις	10–99%	Χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα	Περιορισμένη διαθεσιμότητα	Μέτριες	Μεσαία–υψηλή
Βιομηχανικό CO ₂	Τσιμέντο, χάλυβας, διυλιστήρια	4–30%	Συμπυκνωμένες ροές, χαμηλότερο κόστος capture	Μη βιογενής προέλευση	Χαμηλές–μέτριες	Υψηλή
Post-combustion capture	Καυσαέρια μονάδων	4–15%	Εύκολη ενσωμάτωση σε υπάρχουσες μονάδες	Energy penalty	Υψηλές	Ωριμη
Pre-combustion capture	Παραγωγή syngas	15–40%	Υψηλή καθαρότητα CO ₂	Πολύπλοκη ενσωμάτωση	Μέτριες	Μεσαία

Από οικονομική άποψη, το κόστος παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας παραμένει σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1. Οι Schemme et al. (2017) επισημαίνουν ότι τα συνθετικά καύσιμα Power-to-Liquid εμφανίζουν υψηλό κόστος λόγω των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια, πράσινο υδρογόνο και συστήματα δέσμευσης CO₂. Αντίστοιχα, οι Panzone et al. (2020) αναφέρουν ότι η οικονομική βιωσιμότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μείωση του κόστους ανανεώσιμης ενέργειας και την ανάπτυξη αποδοτικότερων καταλυτών.

Η δημιουργία υποδομών παραγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης CO₂ και υδρογόνου απαιτεί σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου. Οι Liu et al. (2025) τονίζουν ότι η μετάβαση προς καύσιμα χαμηλού άνθρακα προϋποθέτει εκτεταμένο εκσυγχρονισμό των ενεργειακών και βιομηχανικών υποδομών.

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα αφορά τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών και τη γεωγραφική κατανομή των ανανεώσιμων πόρων. Οι περιοχές με υψηλό δυναμικό ανανεώσιμης ενέργειας ενδέχεται να μην συμπίπτουν με τις περιοχές υψηλής ζήτησης καυσίμων αεροπορίας. Αυτό δημιουργεί πρόσθετες ανάγκες μεταφοράς και διεθνούς ενεργειακής συνεργασίας.

Παρά τις προκλήσεις, η συνεχής τεχνολογική πρόοδος αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος των τεχνολογιών CCUS και e-fuels. Οι Oloore et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η ανάπτυξη νέων καταλυτικών υλικών και προηγμένων διεργασιών μετατροπής CO₂ μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα παραγωγής καυσίμων χαμηλού άνθρακα.

Οι κρατικές πολιτικές και τα ρυθμιστικά πλαίσια διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην οικονομική ανάπτυξη των βιώσιμων καυσίμων. Η εφαρμογή φορολογικών κινήτρων, επιδοτήσεων και μηχανισμών τιμολόγησης άνθρακα μπορεί να βελτιώσει την ανταγωνιστικότητα των e-fuels έναντι των συμβατικών καυσίμων. Οι Delbecq et al. (2025) αναφέρουν ότι οι διεθνείς πολιτικές απανθρακοποίησης αποτελούν βασικό μοχλό επιτάχυνσης των επενδύσεων σε τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα.

3.5 Ενσωμάτωση τεχνολογιών CCUS στην αεροπορία

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) στην αεροπορία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στον αεροπορικό τομέα. Οι τεχνολογίες CCUS επιτρέπουν τη δέσμευση, αξιοποίηση και αποθήκευση CO₂, μετατρέποντας έναν σημαντικό ρύπο σε πολύτιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας και άλλων ενεργειακών προϊόντων.

Η εφαρμογή CCUS στην αεροπορία επικεντρώνεται κυρίως στην παραγωγή συνθετικών καυσίμων αεροπορίας (e-SAF) μέσω αξιοποίησης δεσμευμένου CO₂ και πράσινου υδρογόνου. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) αναφέρουν ότι οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να δημιουργήσουν κυκλικά συστήματα άνθρακα, όπου το CO₂ που παράγεται κατά την καύση των καυσίμων επαναχρησιμοποιείται για την παραγωγή νέων καυσίμων.

Βασικό στοιχείο της ενσωμάτωσης CCUS είναι η σύνδεση των τεχνολογιών δέσμευσης CO₂ με διεργασίες Power-to-Liquid (PtL). Στις διεργασίες αυτές, το CO₂

συνδυάζεται με πράσινο υδρογόνο και μετατρέπεται σε συνθετικούς υδρογονάνθρακες μέσω χημικών διεργασιών όπως η Reverse Water Gas Shift και η σύνθεση Fischer–Tropsch. Οι Panzone et al. (2020) υποστηρίζουν ότι οι τεχνολογίες PtL αποτελούν βασικό πυλώνα της μελλοντικής παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας.

Η αεροπορία θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλος τομέας για εφαρμογή CCUS, καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις των αεροσκαφών καθιστούν δύσκολη την πλήρη ηλεκτροδότηση των πτήσεων μεγάλων αποστάσεων. Οι Undavalli et al. (2024) επισημαίνουν ότι τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας παραμένουν η πιο ρεαλιστική βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη λύση απανθρακοποίησης του τομέα.

Σημαντικό πλεονέκτημα της ενσωμάτωσης CCUS είναι η δυνατότητα αξιοποίησης των υφιστάμενων αεροπορικών υποδομών. Τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται μέσω αξιοποίησης CO₂ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους υπάρχοντες κινητήρες και συστήματα ανεφοδιασμού χωρίς σημαντικές τεχνικές τροποποιήσεις. Οι Raji et al. (2025) αναφέρουν ότι τα e-fuels εμφανίζουν φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παρόμοια με τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1.

Οι τεχνολογίες CCUS μπορούν να εφαρμοστούν και στις ίδιες τις αεροπορικές υποδομές. Τα αεροδρόμια μπορούν να μετατραπούν σε ενεργειακούς κόμβους παραγωγής και διαχείρισης βιώσιμων καυσίμων μέσω ενσωμάτωσης συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας, δέσμευσης CO₂ και παραγωγής υδρογόνου. Οι Parhamfar (2024) και Delbecq et al. (2025) τονίζουν ότι τα “πράσινα αεροδρόμια” θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη μελλοντική ενεργειακή μετάβαση της αεροπορίας.

Οι τεχνολογίες CCUS μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης της αεροπορίας από ορυκτά καύσιμα και διεθνείς αγορές πετρελαίου. Η αποκεντρωμένη παραγωγή e-fuels από CO₂ και ανανεώσιμη ενέργεια δημιουργεί δυνατότητες ενεργειακής ασφάλειας και διαφοροποίησης ενεργειακών πηγών.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση CCUS στην αεροπορία συνοδεύεται και από σημαντικές προκλήσεις. Το υψηλό κόστος παραγωγής e-fuels, οι ενεργειακές απαιτήσεις των διεργασιών δέσμευσης CO₂ και η περιορισμένη διαθεσιμότητα πράσινου υδρογόνου αποτελούν βασικά εμπόδια για τη μαζική εφαρμογή των τεχνολογιών. Οι Segovia-Hernandez (2025) επισημαίνουν ότι απαιτούνται σημαντικές

τεχνολογικές βελτιώσεις και οικονομικά κίνητρα για τη μείωση του κόστους παραγωγής.

Η επιτυχής εφαρμογή CCUS προϋποθέτει ισχυρό ρυθμιστικό πλαίσιο και διεθνή συνεργασία. Οι πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το πρόγραμμα CORSIA του ICAO και οι διεθνείς στρατηγικές απανθρακοποίησης λειτουργούν ως βασικοί μηχανισμοί προώθησης βιώσιμων καυσίμων και τεχνολογιών χαμηλού άνθρακα.

3.6 Κυκλική οικονομία και ανθρακική ουδετερότητα

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας αποτελεί βασικό στοιχείο της σύγχρονης στρατηγικής βιώσιμης ανάπτυξης και συνδέεται άμεσα με την επίτευξη ανθρακικής ουδετερότητας στην αεροπορία και στον ενεργειακό τομέα. Σε αντίθεση με το γραμμικό μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, όπου οι πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται και απορρίπτονται, η κυκλική οικονομία επιδιώκει τη συνεχή επαναχρησιμοποίηση πόρων, υλικών και ενέργειας, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Στο πλαίσιο της παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, η κυκλική οικονομία εκφράζεται κυρίως μέσω της αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα ως πρώτης ύλης για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων. Αντί το CO₂ να θεωρείται αποκλειστικά απόβλητο ή ρύπος, αντιμετωπίζεται ως πολύτιμος πόρος που μπορεί να επαναεισαχθεί στον ενεργειακό κύκλο. Οι Ozkan et al. (2025) υποστηρίζουν ότι τα e-fuels που παράγονται από δεσμευμένο CO₂ και πράσινο υδρογόνο αποτελούν βασικό παράδειγμα εφαρμογής κυκλικών ενεργειακών συστημάτων.

Η ανθρακική ουδετερότητα (carbon neutrality ή net-zero emissions) αναφέρεται στην επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των εκπομπών CO₂ και της απομάκρυνσής τους από την ατμόσφαιρα. Στην περίπτωση των βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, ο άνθρακας που απελευθερώνεται κατά την καύση των καυσίμων μπορεί θεωρητικά να επαναδεσμευτεί και να χρησιμοποιηθεί εκ νέου για παραγωγή καυσίμων, δημιουργώντας έναν σχεδόν κλειστό κύκλο άνθρακα. Οι Schemme et al. (2017) αναφέρουν ότι οι τεχνολογίες Power-to-Fuel μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη μεταφορών χαμηλού άνθρακα και κλιματικής ουδετερότητας.

Η κυκλική οικονομία συνδέεται επίσης με τη χρήση βιογενών πηγών άνθρακα, όπως μικροάλγες, γεωργικά απόβλητα και βιομάζα. Οι Ahmad και Ashraf (2025)

αναφέρουν ότι οι μικροάλγες μπορούν να δεσμεύουν μεγάλες ποσότητες CO₂ μέσω φωτοσύνθεσης και να χρησιμοποιούνται παράλληλα για παραγωγή βιοκαυσίμων και άλλων βιοπροϊόντων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση φυσικών πόρων και μείωση των καθαρών εκπομπών άνθρακα.

Οι τεχνολογίες CCUS αποτελούν βασικό μηχανισμό υποστήριξης της κυκλικής οικονομίας. Μέσω της δέσμευσης και αξιοποίησης CO₂ από βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή από την ατμόσφαιρα, δημιουργούνται νέες δυνατότητες παραγωγής συνθετικών καυσίμων, χημικών προϊόντων και πρώτων υλών. Οι Okoye-Chine et al. (2024) επισημαίνουν ότι η μετατροπή CO₂ σε καύσιμα μπορεί να συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτούς πόρους και στη δημιουργία βιώσιμων ενεργειακών αλυσίδων.

Σημαντικό ρόλο στην επίτευξη ανθρακικής ουδετερότητας διαδραματίζει και το πράσινο υδρογόνο. Οι Roque et al. (2024) και Tasleem και Alsharaeh (2025) αναφέρουν ότι το υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί βασικό στοιχείο για την παραγωγή e-fuels χαμηλού άνθρακα και τη μετάβαση προς κυκλικά ενεργειακά συστήματα.

Η εφαρμογή κυκλικής οικονομίας στην αεροπορία αντιμετωπίζει ακόμη σημαντικές προκλήσεις. Η μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση των τεχνολογιών CCUS και παραγωγής e-fuels, το υψηλό κόστος ανανεώσιμης ενέργειας και οι περιορισμένες υποδομές αποτελούν βασικά εμπόδια για την ευρεία εφαρμογή κυκλικών συστημάτων άνθρακα. Οι Liu et al. (2025) υπογραμμίζουν ότι η επίτευξη net-zero στην αεροπορία απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικής καινοτομίας, πολιτικών στήριξης και διεθνούς συνεργασίας.

Η πραγματική βιωσιμότητα των κυκλικών συστημάτων εξαρτάται από την προέλευση της ενέργειας και των πρώτων υλών. Αν οι τεχνολογίες παραγωγής καυσίμων βασίζονται σε ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, το συνολικό περιβαλλοντικό όφελος μειώνεται σημαντικά.

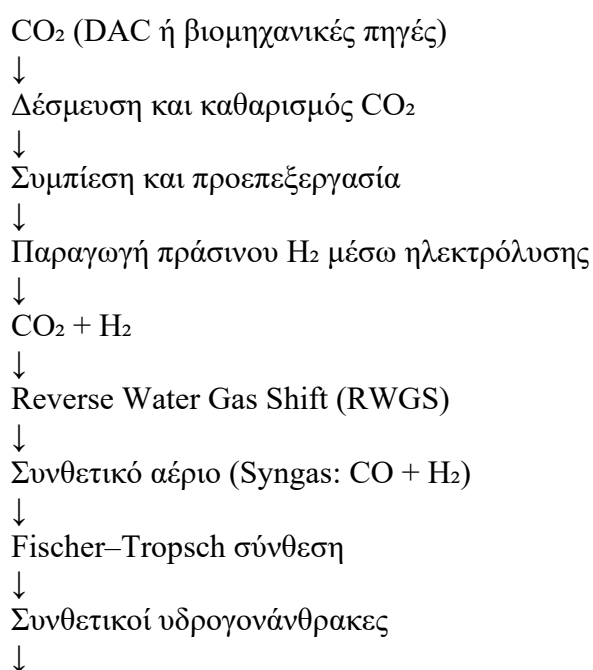
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παραγωγή e-fuels μέσω αξιοποίησης CO₂

4.1 Η έννοια των ηλεκτροκαυσίμων (e-fuels)

Τα ηλεκτροκαύσιμα (e-fuels ή electrofuels) αποτελούν μία από τις πλέον καινοτόμες τεχνολογίες για την παραγωγή καυσίμων χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος και τη μετάβαση προς βιώσιμα ενεργειακά συστήματα. Πρόκειται για συνθετικά καύσιμα που παράγονται μέσω αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και πράσινου υδρογόνου, το οποίο παράγεται από ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα e-fuels θεωρούνται βασικός πυλώνας της απανθρακοποίησης των αερομεταφορών, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους υφιστάμενους κινητήρες αεροσκαφών χωρίς σημαντικές τεχνικές τροποποιήσεις.

Η βασική φιλοσοφία των ηλεκτροκαυσίμων στηρίζεται στη δημιουργία ενός κυκλικού συστήματος άνθρακα. Το CO₂ που εκπέμπεται κατά την καύση των καυσίμων δεσμεύεται εκ νέου από την ατμόσφαιρα ή από βιομηχανικές πηγές και επαναχρησιμοποιείται για την παραγωγή νέων καυσίμων. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι καθαρές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και ενισχύεται η ανθρακική ουδετερότητα. Οι Schemme et al. (2017) υποστηρίζουν ότι τα Power-to-Fuel συστήματα μπορούν να αποτελέσουν βασικό εργαλείο βιώσιμων μεταφορών και κυκλικής ενεργειακής οικονομίας.

Σχήμα 4.1. Γενική διαδρομή παραγωγής e-SAF από αξιοποίηση CO₂



Hydrocracking / Upgrading / Isomerization

↓

e-Kerosene (e-SAF)

↓

Ανάμιξη με Jet A-1

↓

Χρήση σε αεροσκάφη

Η παραγωγή e-fuels περιλαμβάνει συνήθως τρία βασικά στάδια: τη δέσμευση CO₂, την παραγωγή πράσινου υδρογόνου και τη σύνθεση συνθετικών υδρογονανθράκων μέσω καταλυτικών διεργασιών. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) αναφέρουν ότι τα e-fuels αποτελούν μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές λύσεις για την απανθρακοποίηση της αεροπορίας, ιδιαίτερα στις πτήσεις μεγάλων αποστάσεων όπου η ηλεκτροκίνηση παραμένει τεχνολογικά περιορισμένη.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ηλεκτροκαυσίμων είναι η συμβατότητά τους με τις υπάρχουσες αεροπορικές υποδομές. Τα e-fuels παρουσιάζουν φυσικοχημικά χαρακτηριστικά παρόμοια με τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υφιστάμενους κινητήρες, συστήματα αποθήκευσης και δίκτυα ανεφοδιασμού. Οι Raji et al. (2025) αναφέρουν ότι τα συνθετικά καύσιμα εμφανίζουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μπορούν να διατηρήσουν τις απαιτήσεις απόδοσης των αεροπορικών κινητήρων.

Παράλληλα, τα ηλεκτροκαύσιμα προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες αποθήκευσης και μεταφοράς ανανεώσιμης ενέργειας. Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο και στη συνέχεια σε υγρά καύσιμα, επιτρέποντας τη μακροχρόνια ενεργειακή αποθήκευση. Οι Segovia-Hernandez (2025) επισημαίνουν ότι τα e-fuels λειτουργούν ως “γέφυρα” μεταξύ του ηλεκτρικού και του ενεργειακού τομέα μεταφορών.

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των ηλεκτροκαυσίμων διαδραματίζει και η τεχνολογία Fischer–Tropsch. Μέσω της διεργασίας αυτής, συνθετικό αέριο (syngas), που αποτελείται κυρίως από CO και H₂, μετατρέπεται σε υγρούς υδρογονάνθρακες κατάλληλους για αεροπορική χρήση. Οι Blay-Roger et al. (2024) αναφέρουν ότι οι σύγχρονες καταλυτικές διεργασίες Fischer–Tropsch επιτρέπουν τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της επιλεκτικότητας παραγωγής e-fuels.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η παραγωγή ηλεκτροκαυσίμων συνοδεύεται από υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και αυξημένο κόστος. Η παραγωγή

πράσινου υδρογόνου, η δέσμευση CO₂ και οι διεργασίες σύνθεσης καυσίμων απαιτούν μεγάλες ποσότητες ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Ozkan et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η μαζική παραγωγή e-fuels εξαρτάται άμεσα από την ανάπτυξη φθηνών και αξιόπιστων ανανεώσιμων ενεργειακών συστημάτων.

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των e-fuels εξαρτάται από την προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας και του CO₂. Αν η παραγωγή βασίζεται σε ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, οι συνολικές εκπομπές μπορεί να παραμείνουν υψηλές. Οι Liu et al. (2025) τονίζουν ότι η πλήρης απανθρακοποίηση των e-fuels προϋποθέτει τη χρήση ανανεώσιμης ενέργειας σε όλα τα στάδια παραγωγής.

4.2 Παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης

Το πράσινο υδρογόνο θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα καύσιμα του μέλλοντος και βασικός παράγοντας για την ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας και ηλεκτροκαυσίμων (e-fuels). Παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, χωρίς άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στη δημιουργία ενεργειακών συστημάτων χαμηλού άνθρακα και στην υποστήριξη της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης.

Η ηλεκτρόλυση αποτελεί ηλεκτροχημική διεργασία κατά την οποία το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω ηλεκτρικού ρεύματος. Η συνολική αντίδραση μπορεί να περιγραφεί ως εξής: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$

Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα ως καύσιμο είτε ως πρώτη ύλη για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων μέσω αντίδρασης με CO₂. Οι Anand et al. (2025) αναφέρουν ότι το πράσινο υδρογόνο αποτελεί βασικό στοιχείο για τη μελλοντική απανθρακοποίηση της αεροπορίας, της βιομηχανίας και των μεταφορών.

Η σημασία του πράσινου υδρογόνου για τα e-fuels είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Το υδρογόνο συνδυάζεται με δεσμευμένο CO₂ μέσω διεργασιών όπως η Fischer–Tropsch και η σύνθεση μεθανόλης για την παραγωγή συνθετικών υδρογονανθράκων. Οι Panzone et al. (2020) υποστηρίζουν ότι χωρίς πράσινο υδρογόνο δεν είναι δυνατή η παραγωγή πραγματικά βιώσιμων ηλεκτροκαυσίμων.

Το βασικό πλεονέκτημα του πράσινου υδρογόνου είναι ότι δεν παράγει άμεσες εκπομπές CO₂ κατά την παραγωγή του, εφόσον χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια

από ανανεώσιμες πηγές. Οι Elazab et al. (2024) αναφέρουν ότι η χρήση ηλιακής, αιολικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας καθιστά το πράσινο υδρογόνο μία από τις πιο καθαρές μορφές ενέργειας.

Το πράσινο υδρογόνο μπορεί να λειτουργήσει ως μέσο αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας. Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή υδρογόνου, το οποίο αποθηκεύεται και αξιοποιείται αργότερα. Οι Roque et al. (2024) επισημαίνουν ότι το υδρογόνο συμβάλλει στη σταθεροποίηση των ενεργειακών δικτύων και στη διαχείριση της διακοπτόμενης παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας.

Το πράσινο υδρογόνο παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες εφαρμογής στην αεροπορία. Εκτός από τη χρήση του για παραγωγή e-fuels, εξετάζεται και ως άμεσο καύσιμο σε μελλοντικά αεροσκάφη υδρογόνου. Οι Tak et al. (2025) αναφέρουν ότι το υδρογόνο μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην απανθρακοποίηση των αερομεταφορών, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με βιώσιμα καύσιμα.

Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις. Η ηλεκτρόλυση απαιτεί μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που αυξάνει το κόστος παραγωγής. Οι Tasleem και Alsharaeh (2025) επισημαίνουν ότι το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει την ανταγωνιστικότητα του πράσινου υδρογόνου.

Η αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας ανά όγκο και των απαιτήσεων συμπίεσης ή υγροποίησης. Οι Wei et al. (2025) αναφέρουν ότι η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη μαζική αξιοποίηση υδρογόνου στην αεροπορία.

Οι διεθνείς επενδύσεις και πολιτικές στήριξης του υδρογόνου αυξάνονται σημαντικά. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, οι Ηνωμένες Πολιτείες και άλλες χώρες επενδύουν σε μεγάλης κλίμακας έργα παραγωγής πράσινου υδρογόνου και ανάπτυξης τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης.

4.2.1 Τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης

Οι τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης αποτελούν τον βασικό μηχανισμό παραγωγής πράσινου υδρογόνου και διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη ηλεκτροκαυσίμων και βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Η επιλογή της κατάλληλης

τεχνολογίας επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή αποδοτικότητα, το κόστος παραγωγής και τη βιωσιμότητα των συστημάτων υδρογόνου.

Οι κυριότερες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης είναι η αλκαλική ηλεκτρόλυση (Alkaline Electrolysis – AEL), η ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane – PEM) και η ηλεκτρόλυση στερεού οξειδίου (Solid Oxide Electrolysis – SOEC). Κάθε τεχνολογία παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά και πεδία εφαρμογής.

Πίνακας 3

Τεχνολογία	Απόδοση
Alkaline	62–70%
PEM	65–80%
SOEC	75–85%

Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης παρουσιάζει σήμερα αποδόσεις που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 60–80%, ανάλογα με την τεχνολογία. Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες εμφανίζουν αποδόσεις περίπου 62–70%, οι PEM ηλεκτρολύτες 65–80%, ενώ οι SOEC τεχνολογίες δυνητικά μπορούν να ξεπεράσουν το 80% υπό βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (Anand et al., 2025).

Η αλκαλική ηλεκτρόλυση αποτελεί την παλαιότερη και πιο ώριμη τεχνολογία. Χρησιμοποιεί αλκαλικό ηλεκτρολύτη, συνήθως υδροξείδιο του καλίου ή του νατρίου, και λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Οι Anand et al. (2025) αναφέρουν ότι η τεχνολογία AEL χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο κόστος και υψηλή αξιοπιστία, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα διαδεδομένη σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Η ηλεκτρόλυση PEM χρησιμοποιεί στερεή πολυμερική μεμβράνη για τη μεταφορά πρωτονίων και παρουσιάζει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και ταχύτερη απόκριση στις μεταβολές ισχύος. Οι Elazab et al. (2024) επισημαίνουν ότι τα συστήματα PEM είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά υπό μεταβαλλόμενη ηλεκτρική τροφοδοσία.

Η τεχνολογία SOEC λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και παρουσιάζει τη δυνατότητα επίτευξης πολύ υψηλής αποδοτικότητας μέσω αξιοποίησης θερμικής ενέργειας. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμη σε φάση τεχνολογικής ανάπτυξης και αντιμετωπίζει ζητήματα αντοχής υλικών και διάρκειας ζωής συστημάτων.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ηλεκτρόλυσης επικεντρώνονται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, στη βελτίωση καταλυτών και στη μείωση του κόστους παραγωγής. Οι Roque et al. (2024) αναφέρουν ότι η ανάπτυξη νέων υλικών και ηλεκτροκαταλυτών μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την αποδοτικότητα παραγωγής πράσινου υδρογόνου.

4.2.2 Ρόλος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν βασικό παράγοντα για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου και ηλεκτροκαυσίμων χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος. Η βιωσιμότητα των e-fuels εξαρτάται άμεσα από την προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στις διεργασίες ηλεκτρόλυσης και μετατροπής CO₂.

Η ηλιακή και η αιολική ενέργεια θεωρούνται οι σημαντικότερες πηγές για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου. Οι Anand et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η συνεχής μείωση του κόστους φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών καθιστά πλέον εφικτή τη μεγάλης κλίμακας παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν επίσης στη μείωση των συνολικών εκπομπών των e-fuels. Αν η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, το περιβαλλοντικό όφελος των ηλεκτροκαυσίμων μειώνεται σημαντικά. Οι Liu et al. (2025) αναφέρουν ότι η πλήρης απανθρακοποίηση της αεροπορίας προϋποθέτει χρήση καθαρής ενέργειας σε όλα τα στάδια παραγωγής καυσίμων.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επιτρέπουν τη δημιουργία αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων και την αξιοποίηση περιοχών με υψηλό δυναμικό ηλιακής ή αιολικής ενέργειας. Οι Ozkan et al. (2025) υποστηρίζουν ότι πολλές χώρες μπορούν να εξελιχθούν σε εξαγωγείς πράσινου υδρογόνου και e-fuels μέσω αξιοποίησης των ανανεώσιμων πόρων τους.

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί επίσης σημαντικό πεδίο εφαρμογής των e-fuels. Η περίσσεια παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να μετατρέπεται σε υδρογόνο και συνθετικά καύσιμα, επιτρέποντας την αποθήκευση ενέργειας μεγάλης διάρκειας και τη σταθεροποίηση των ενεργειακών δικτύων.

Πίνακας 4: Σύγκριση τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης

Τεχνολογία	Απόδοση	Θερμοκρασία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Alkaline	62–70%	60–90°C	Χαμηλό κόστος	Χαμηλή ευελιξία
PEM	65–80%	50–80°C	Γρήγορη απόκριση	Υψηλό CAPEX
SOEC	75–85%	700–900°C	Υψηλή απόδοση	Χαμηλή ωριμότητα

Η διακοπτόμενη φύση των ανανεώσιμων πηγών δημιουργεί προκλήσεις στη συνεχή λειτουργία των ηλεκτρολυτών. Οι Segovia-Hernandez (2025) επισημαίνουν ότι απαιτούνται εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας και αποθήκευσης για τη βέλτιστη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στις διεργασίες παραγωγής e-fuels.

4.3 Αντίδραση Reverse Water Gas Shift (RWGS)

Η αντίδραση Reverse Water Gas Shift (RWGS) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες χημικές διεργασίες στην παραγωγή ηλεκτροκαυσίμων (e-fuels) και στη μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε συνθετικά καύσιμα αεροπορίας. Η διεργασία αυτή επιτρέπει τη μετατροπή του CO₂ σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το οποίο αποτελεί βασικό συστατικό του συνθετικού αερίου (syngas) που χρησιμοποιείται στις διεργασίες Fischer–Tropsch και στην παραγωγή e-kerosene.

Η βασική χημική αντίδραση της RWGS περιγράφεται ως εξής: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$. Η αντίδραση πραγματοποιείται παρουσία καταλυτών και σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως μεταξύ 600–900°C. Η παραγωγή του απαραίτητου υδρογόνου προέρχεται κυρίως από ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γεγονός που επιτρέπει τη δημιουργία καυσίμων χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος. Οι Choi et al. (2024) αναφέρουν ότι η RWGS αποτελεί βασικό ενδιάμεσο στάδιο στις τεχνολογίες παραγωγής e-fuels και Power-to-Liquid.

Η κύρια τεχνολογική πρόκληση έγκειται στην ελαχιστοποίηση ανταγωνιστικών αντιδράσεων, όπως η μεθανοποίηση, ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή CO για

μεταγενέστερη σύνθεση syngas. Βασική αντίδραση: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$

Η σημασία της RWGS έγκειται στο γεγονός ότι το CO_2 είναι σχετικά σταθερό μόριο και δύσκολα μετατρέπεται απευθείας σε υδρογονάνθρακες. Μέσω της RWGS, το CO_2 μετατρέπεται σε CO , το οποίο παρουσιάζει μεγαλύτερη χημική δραστηριότητα και μπορεί να αξιοποιηθεί ευκολότερα σε καταλυτικές διεργασίες σύνθεσης καυσίμων. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) επισημαίνουν ότι η RWGS λειτουργεί ως “γέφυρα” μεταξύ της δέσμευσης CO_2 και της σύνθεσης συνθετικών καυσίμων.

Η επιλογή κατάλληλων καταλυτών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αποδοτικότητα της διεργασίας. Οι καταλύτες με βάση τον χαλκό, το νικέλιο, τον σίδηρο και πολύτιμα μέταλλα χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της ικανότητάς τους να βελτιώνουν την ταχύτητα αντίδρασης και την επιλεκτικότητα προς παραγωγή CO . Οι Choi et al. (2024) υποστηρίζουν ότι οι καταλύτες χαλκού παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σύγκριση με παλαιότερα καταλυτικά συστήματα.

Πίνακας 5

Παράμετρος	Περιγραφή / Τιμές	Σημασία για τη διεργασία
Τύπος αντίδρασης	Ενδόθερμη αντίδραση	Απαιτεί εξωτερική παροχή θερμότητας για τη διατήρηση υψηλών ρυθμών μετατροπής
Μεταβολή ενθαλπίας (ΔH°)	$\approx +41.2 \text{ kJ/mol}$	Η θετική ενθαλπία ευνοεί τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες
Θερμοδυναμική συμπεριφορά	Ευνοείται σε υψηλές θερμοκρασίες	Μετατοπίζεται η ισορροπία προς παραγωγή CO
Θερμοκρασία λειτουργίας	$600\text{--}900^\circ\text{C}$	Υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τη μετατροπή CO_2 και την επιλεκτικότητα προς CO
Αναλογία H_2/CO_2	Αυξημένες τιμές H_2/CO_2 βελτιώνουν τη μετατροπή	Η περίσσεια υδρογόνου μετατοπίζει την ισορροπία προς τα προϊόντα
Επιθυμητός λόγος syngas (H_2/CO)	≈ 2	Κατάλληλος λόγος για μεταγενέστερη σύνθεση μέσω Fischer–Tropsch
Καταλύτες Cu-based	Cu και Cu-supported catalysts	Υψηλή δραστηριότητα σε μέτριες θερμοκρασίες
Καταλύτες Fe-based	Fe catalysts	Κατάλληλοι για ολοκληρωμένα συστήματα RWGS–FT

Καταλύτες Ni-based	Ni catalysts	Υψηλή δραστηριότητα αλλά αυξημένος κίνδυνος μεθανοποίησης
CeO₂-supported catalysts	Καταλύτες με υποστήριξη CeO ₂	Βελτιώνουν τη σταθερότητα και τη δημιουργία ενεργών θέσεων οξυγόνου
Mixed metal oxides	Πολυμεταλλικά οξείδια	Βελτιωμένη επιλεκτικότητα και θερμική αντοχή

Η τεχνολογία RWGS συνδέεται άμεσα με τη μείωση εκπομπών άνθρακα και την κυκλική οικονομία. Το CO₂ που χρησιμοποιείται μπορεί να προέρχεται είτε από βιομηχανικές πηγές είτε από άμεση δέσμευση από την ατμόσφαιρα (DAC). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας κλειστός κύκλος άνθρακα, όπου το CO₂ επαναχρησιμοποιείται για παραγωγή καυσίμων αντί να απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Κάτι που βοηθάει ιδιαίτερα την RWGS είναι η συμβατότητά της με τις τεχνολογίες Fischer–Tropsch και παραγωγής μεθανόλης. Το παραγόμενο syngas μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για σύνθεση υγρών καυσίμων αεροπορίας, προσφέροντας σημαντική ευελιξία στις διεργασίες παραγωγής e-fuels. Οι Panzone et al. (2020) αναφέρουν ότι οι συνδυασμένες διεργασίες RWGS και Fischer–Tropsch αποτελούν σήμερα τη σημαντικότερη τεχνολογική πλατφόρμα παραγωγής συνθετικών καυσίμων αεροπορίας.

Η RWGS παρουσιάζει και σημαντικές προκλήσεις. Η αντίδραση απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες και σημαντικές ποσότητες ενέργειας, γεγονός που επηρεάζει το συνολικό κόστος παραγωγής. Επιπλέον, η παρουσία ανεπιθύμητων παραπροϊόντων μπορεί να μειώσει την αποδοτικότητα της διεργασίας. Οι Segovia-Hernandez (2025) τονίζουν ότι η βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας και η ανάπτυξη νέων καταλυτών αποτελούν βασικούς στόχους της σύγχρονης έρευνας.

Η προέλευση του υδρογόνου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη βιωσιμότητα της διεργασίας. Αν το υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα, μειώνεται σημαντικά το περιβαλλοντικό όφελος της παραγωγής e-fuels. Οι Anand et al. (2025) αναφέρουν ότι η χρήση πράσινου υδρογόνου είναι απαραίτητη για την επίτευξη πραγματικά βιώσιμων συνθετικών καυσίμων. Η αντίδραση Reverse Water Gas Shift (RWGS) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διεργασίες αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα για παραγωγή συνθετικών καυσίμων αεροπορίας, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή του CO₂ σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το οποίο αποτελεί βασικό συστατικό του συνθετικού

αερίου (syngas). Το παραγόμενο syngas χρησιμοποιείται στη συνέχεια σε διεργασίες σύνθεσης καυσίμων, κυρίως μέσω Fischer–Tropsch, καθιστώντας τη RWGS κρίσιμο ενδιάμεσο βήμα στις διαδρομές Power-to-Liquid (Panzone et al., 2020).

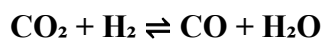
Η βασική χημική αντίδραση περιγράφεται ως: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ $\Delta H^\circ = +41.2 \text{ kJ/mol}$. Η θετική ενθαλπία της αντίδρασης υποδεικνύει τον ενδόθερμο χαρακτήρα της διεργασίας. Ως αποτέλεσμα, υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν θερμοδυναμικά την παραγωγή CO μέσω μετατόπισης της ισορροπίας προς τα προϊόντα. Συνήθως, οι βιομηχανικές εφαρμογές λειτουργούν σε θερμοκρασιακό εύρος 600–900°C, ενώ η πίεση διατηρείται χαμηλή έως μέτρια ώστε να ευνοείται η απόδοση της αντίδρασης (Choi et al., 2024).

Η αναλογία H_2/CO_2 επηρεάζει καθοριστικά την απόδοση και την εκλεκτικότητα της RWGS. Αυξημένες αναλογίες υδρογόνου οδηγούν σε υψηλότερους βαθμούς μετατροπής του CO_2 , αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις παραγωγής πράσινου υδρογόνου. Συνήθως χρησιμοποιούνται λόγοι H_2/CO_2 μεγαλύτεροι από τη στοιχειομετρική αναλογία, ώστε να μετατοπιστεί η ισορροπία προς παραγωγή CO (Ramos-Fernandez et al., 2025).

Η επιλογή καταλύτη αποτελεί κρίσιμο παράγοντα λειτουργίας. Οι καταλύτες χαλκού (Cu-based catalysts) εμφανίζουν υψηλή εκλεκτικότητα προς CO σε σχετικά χαμηλότερες θερμοκρασίες, ενώ οι καταλύτες σιδήρου (Fe) προσφέρουν χαμηλότερο κόστος και καλή θερμική σταθερότητα. Οι καταλύτες νικελίου (Ni) παρουσιάζουν υψηλή δραστηριότητα αλλά συχνά συνοδεύονται από αυξημένο σχηματισμό μεθανίου μέσω παράπλευρων αντιδράσεων. Τα τελευταία χρόνια, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν καταλύτες υποστηριζόμενοι σε οξείδια δημητρίου (CeO_2 -supported catalysts), λόγω βελτιωμένης κινητικότητας οξυγόνου και αυξημένης σταθερότητας (Oloore et al., 2025).

Η RWGS συνδέεται άμεσα με την παραγωγή syngas κατάλληλης σύστασης για επόμενα στάδια σύνθεσης καυσίμων. Η προσαρμογή του λόγου H_2/CO αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα, καθώς διαφορετικές downstream διεργασίες απαιτούν διαφορετικές συνθέσεις συνθετικού αερίου. Για εφαρμογές Fischer–Tropsch, συνήθως επιδιώκεται λόγος H_2/CO περίπου 2, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή παραγωγή υγρών υδρογονανθράκων (Blay-Roger et al., 2024).

Η αντίδραση Reverse Water Gas Shift αποτελεί κρίσιμο στάδιο στις διαδρομές Power-to-Liquid, καθώς μετατρέπει το CO₂ σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή συνθετικού αερίου (syngas) κατάλληλου για σύνθεση Fischer–Tropsch. Η βασική αντίδραση περιγράφεται ως:



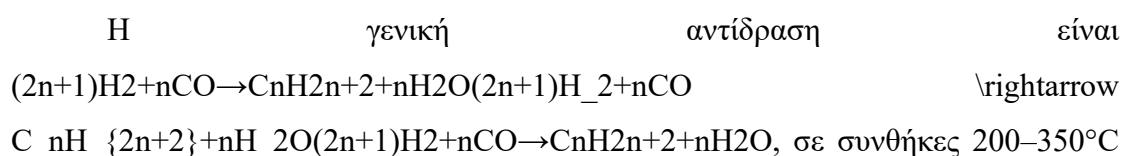
Η αντίδραση είναι ενδόθερμη ($\Delta H^\circ = +41,2 \text{ kJ/mol}$), γεγονός που σημαίνει ότι ευνοείται θερμοδυναμικά σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως μεταξύ 600–900°C. Η αναλογία H₂/CO₂ επηρεάζει σημαντικά την απόδοση μετατροπής, ενώ για τις επόμενες διεργασίες Fischer–Tropsch επιδιώκεται συνήθως λόγος H₂/CO περίπου ίσος με 2 (Choi et al., 2024; Ramos-Fernandez et al., 2025).

Οι συνηθέστεροι καταλύτες περιλαμβάνουν συστήματα Cu, Fe, Ni, CeO₂-supported catalysts και μικτά μεταλλικά οξείδια, τα οποία επιδιώκουν υψηλή εκλεκτικότητα προς CO και περιορισμό ανεπιθύμητων αντιδράσεων μεθανίωσης. Βασική τεχνολογική πρόκληση αποτελεί η υψηλή ενεργειακή απαίτηση της διεργασίας, η οποία επηρεάζει άμεσα το συνολικό κόστος παραγωγής e-SAF (Choi et al., 2024).

4.4 Σύνθεση Fischer–Tropsch για παραγωγή συνθετικών καυσίμων

Η σύνθεση Fischer–Tropsch (FT) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διεργασίες παραγωγής συνθετικών καυσίμων και χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας μέσω αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα και πράσινου υδρογόνου. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη μετατροπή συνθετικού αερίου (syngas), το οποίο αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογόνο (H₂), σε υγρούς υδρογονάνθρακες κατάλληλους για χρήση ως καύσιμα αεροπορίας.

Η διεργασία αναπτύχθηκε αρχικά στις αρχές του 20ού αιώνα από τους Franz Fischer και Hans Tropsch και σήμερα θεωρείται βασικός πυλώνας των τεχνολογιών Power-to-Liquid και παραγωγής e-fuels. Η βασική αντίδραση Fischer–Tropsch περιλαμβάνει τη σύνθεση μακρών ανθρακικών αλυσίδων μέσω καταλυτικής αντίδρασης CO και H₂ υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία.



και 10–40 bar, με καταλύτες: Co → υψηλή επιλεκτικότητα paraffins, Fe → καλύτερο για CO₂-derived syngas, Ru (λιγότερο συχνά). Η διαδικασία Fischer–Tropsch παράγει ευρύ φάσμα υδρογονανθράκων σύμφωνα με την κατανομή Anderson–Schulz–Flory, γεγονός που καθιστά αναγκαίες διεργασίες hydrocracking και upgrading για την αύξηση του κλάσματος κηροζίνης.

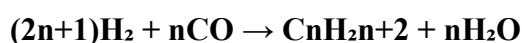
Οι Panzone et al. (2020) αναφέρουν ότι η σύνθεση FT αποτελεί μία από τις πιο ώριμες και τεχνολογικά ανεπτυγμένες μεθόδους μετατροπής CO₂ σε συνθετικά καύσιμα. Μέσω της διεργασίας αυτής μπορούν να παραχθούν καύσιμα τύπου diesel, βενζίνη, κηροζίνη και ειδικά αεροπορικά καύσιμα.

Η παραγωγή συνθετικού αερίου αποτελεί βασικό στάδιο πριν από τη σύνθεση FT. Το CO παράγεται συνήθως μέσω αντίδρασης Reverse Water Gas Shift (RWGS), όπου το CO₂ αντιδρά με πράσινο υδρογόνο. Το παραγόμενο syngas εισέρχεται στη μονάδα Fischer–Tropsch, όπου καταλύτες όπως σίδηρος και κοβάλτιο επιταχύνουν τη σύνθεση υδρογονανθράκων. Οι Blay-Roger et al. (2024) επισημαίνουν ότι οι σύγχρονες καταλυτικές τεχνολογίες επιτρέπουν αυξημένη επιλεκτικότητα και καλύτερο έλεγχο της παραγωγής καυσίμων.

Η σύνθεση Fischer–Tropsch παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα για την αεροπορία. Τα παραγόμενα καύσιμα εμφανίζουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους υφιστάμενους αεροπορικούς κινητήρες χωρίς σημαντικές τεχνικές αλλαγές. Οι Undavalli et al. (2024) αναφέρουν ότι τα συνθετικά καύσιμα FT παρουσιάζουν πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και αρωματικούς υδρογονάνθρακες, γεγονός που μειώνει τις εκπομπές ρύπων και σωματιδίων.

Η FT συμβάλλει στη δημιουργία κυκλικών συστημάτων άνθρακα. Το CO₂ που παράγεται από την καύση των καυσίμων μπορεί να δεσμεύεται και να χρησιμοποιείται εκ νέου για παραγωγή syngas και νέων καυσίμων. Οι Ozkan et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η σύνθεση FT αποτελεί κεντρικό στοιχείο της μελλοντικής κυκλικής οικονομίας άνθρακα στην αεροπορία.

Η σύνθεση Fischer–Tropsch βασίζεται στην καταλυτική μετατροπή του syngas σε υγρούς υδρογονάνθρακες σύμφωνα με τη γενική αντίδραση:



Οι πλέον διαδεδομένοι καταλύτες είναι το κοβάλτιο (Co) και ο σίδηρος (Fe). Οι καταλύτες κοβαλτίου παρουσιάζουν υψηλή εκλεκτικότητα προς παραφινικούς υδρογονάνθρακες και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, ενώ οι καταλύτες σιδήρου είναι οικονομικότεροι και κατάλληλοι για syngas με υψηλότερη περιεκτικότητα σε CO₂ (Blay-Roger et al., 2024).

Η διεργασία παράγει ευρύ φάσμα υδρογονανθράκων, από ελαφρά αέρια έως βαριά κηρώδη προϊόντα. Για την παραγωγή καυσίμου αεροπορίας απαιτούνται επιπλέον στάδια upgrading, όπως υδροπυρόλυση (hydrocracking) και ισομερίωση, ώστε να παραχθούν κλάσματα κατάλληλα για χρήση ως συνθετική κηροζίνη (FT-SPK). Η ποιότητα του τελικού καυσίμου εξαρτάται σημαντικά από τον έλεγχο του λόγου H₂/CO, τη θερμοκρασία λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά του καταλύτη (Panzone et al., 2020; Blay-Roger et al., 2024).

Η διεργασία συνοδεύεται από σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, η λειτουργία αντιδραστήρων υψηλής θερμοκρασίας και η συμπίεση αερίων αυξάνουν το συνολικό ενεργειακό κόστος. Οι Segovia-Hernandez (2025) τονίζουν ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα της FT αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την οικονομική βιωσιμότητα των e-fuels.

Το κόστος των καταλυτών και η ανάγκη πολύπλοκων βιομηχανικών εγκαταστάσεων περιορίζουν ακόμη τη μεγάλης κλίμακας εφαρμογή της τεχνολογίας. Οι Liu et al. (2025) αναφέρουν ότι απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις σε ανανεώσιμη ενέργεια και υποδομές παραγωγής υδρογόνου ώστε να καταστεί ανταγωνιστική η παραγωγή συνθετικών καυσίμων.

Η χρήση CO₂ από βιογενείς πηγές ή Direct Air Capture μπορεί να οδηγήσει σε σχεδόν ουδέτερο ανθρακικό ισοζύγιο, ενώ η χρήση CO₂ από ορυκτές πηγές περιορίζει τα συνολικά περιβαλλοντικά οφέλη. Η σύνθεση Fischer–Tropsch θεωρείται σήμερα μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για τη μελλοντική παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Η συνεχής πρόοδος στην καταλυτική χημεία, στις τεχνολογίες CCUS και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά τη συμβολή της στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση.

Η σύνθεση Fischer–Tropsch (FT) αποτελεί μία από τις πιο ώριμες τεχνολογίες παραγωγής συνθετικών υδρογονανθράκων και θεωρείται βασικός πυλώνας των διαδρομών παραγωγής e-fuels και βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων από CO₂. Η

διεργασία μετατρέπει συνθετικό αέριο (syngas), αποτελούμενο κυρίως από CO και H₂, σε ευρύ φάσμα υδρογονανθράκων μέσω καταλυτικών αντιδράσεων πολυμερισμού άνθρακα (Panzone et al., 2020).

Η γενική αντίδραση μπορεί να εκφραστεί ως: $(2n+1)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$. Η σύνθεση FT είναι εξώθερμη διεργασία και λειτουργεί συνήθως σε θερμοκρασίες 200–350°C και πιέσεις 10–40 bar. Η επιλογή συνθηκών λειτουργίας επηρεάζει σημαντικά την κατανομή προϊόντων και τη σύνθεση τελικών καυσίμων.

Οι δύο κυρίαρχες κατηγορίες καταλυτών είναι οι καταλύτες κοβαλτίου (Co-based catalysts) και σιδήρου (Fe-based catalysts). Οι καταλύτες κοβαλτίου εμφανίζουν υψηλή δραστηριότητα, μεγάλη διάρκεια ζωής και αυξημένη εκλεκτικότητα προς παραφινικούς υδρογονάνθρακες, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλους για παραγωγή αεροπορικών καυσίμων. Αντίθετα, οι καταλύτες σιδήρου παρουσιάζουν χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη ανοχή σε μεταβολές σύνθεσης syngas, ενώ επιτρέπουν ταυτόχρονη δραστηριότητα water-gas shift (Blay-Roger et al., 2024).

Ιδιαίτερα κρίσιμος παράγοντας αποτελεί ο έλεγχος του λόγου H₂/CO. Για μεγιστοποίηση παραγωγής υγρών καυσίμων, συνήθως απαιτείται λόγος κοντά στο 2. Αποκλίσεις από αυτή την τιμή μπορούν να οδηγήσουν είτε σε χαμηλή μετατροπή είτε σε μετατόπιση της κατανομής προϊόντων προς ανεπιθύμητα αέρια προϊόντα ή ελαφρούς υδρογονάνθρακες (Ramos-Fernandez et al., 2025).

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της FT είναι ότι δεν παράγει αποκλειστικά jet fuel αλλά ευρύ φάσμα υδρογονανθράκων, από αέρια προϊόντα και νάφθα έως βαρείς κηρούς (waxes). Η κατανομή προϊόντων ακολουθεί συνήθως την κατανομή Anderson–Schulz–Flory, γεγονός που σημαίνει ότι απαιτούνται επιπλέον διεργασίες αναβάθμισης προϊόντων. Για παραγωγή αεροπορικών καυσίμων, απαιτούνται στάδια upgrading, hydrocracking και ισομερίωσης ώστε οι παραγόμενοι βαρείς υδρογονάνθρακες να μετατραπούν σε κλάσματα κατάλληλα για χρήση ως jet fuel. Η διεργασία αυτή οδηγεί στην παραγωγή FT-SPK (Fischer–Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene), η οποία έχει ήδη εγκριθεί για ανάμιξη με συμβατικά καύσιμα αεροπορίας (Undavalli et al., 2024).

Σε σύγκριση με άλλες διαδρομές SAF, όπως HEFA, ATJ ή MTJ, η FT εμφανίζει υψηλότερες κεφαλαιουχικές απαιτήσεις και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα διεργασιών, αλλά προσφέρει υψηλή ευελιξία πρώτων υλών και δυνατότητα χρήσης CO₂ ως πηγής

άνθρακα. Επιπλέον, η συμβατότητα των FT-SPK καυσίμων με υπάρχουσες υποδομές αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για βραχυπρόθεσμη εφαρμογή.

4.5 Παραγωγή e-kerosene από CO₂ και H₂

Το e-kerosene αποτελεί συνθετικό καύσιμο αεροπορίας που παράγεται μέσω αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και πράσινου υδρογόνου (H₂), αποτελώντας μία από τις σημαντικότερες λύσεις για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα στις αερομεταφορές. Η παραγωγή του βασίζεται σε τεχνολογίες Power-to-Liquid και συνδυάζει διεργασίες δέσμευσης CO₂, παραγωγής υδρογόνου και σύνθεσης συνθετικών υδρογονανθράκων.

Η διαδικασία παραγωγής ξεκινά με τη δέσμευση CO₂ είτε από βιομηχανικές πηγές είτε μέσω Direct Air Capture (DAC). Παράλληλα, παράγεται πράσινο υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης νερού με χρήση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, μέσω αντιδράσεων RWGS και Fischer–Tropsch, το CO₂ και το H₂ μετατρέπονται σε συνθετική κηροζίνη κατάλληλη για χρήση σε αεροσκάφη.

Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) αναφέρουν ότι το e-kerosene θεωρείται από τις πιο ρεαλιστικές τεχνολογίες απανθρακοποίησης της αεροπορίας, ιδιαίτερα για πτήσεις μεγάλων αποστάσεων όπου οι τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης δεν μπορούν ακόμη να εφαρμοστούν αποτελεσματικά.

Η e-kerosene κερδίζει σε πλεονεκτήματα καθώς είναι συμβατή με τις υπάρχουσες αεροπορικές υποδομές. Το καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συμβατικούς κινητήρες Jet A-1 χωρίς σημαντικές τεχνικές μετατροπές. Οι Raji et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα συνθετικά καύσιμα παρουσιάζουν υψηλή θερμογόνο δύναμη και παρόμοια χαρακτηριστικά καύσης με τα συμβατικά καύσιμα αεροπορίας.

Το e-kerosene μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση καθαρών εκπομπών CO₂. Αν το χρησιμοποιούμενο CO₂ προέρχεται από ατμοσφαιρική δέσμευση ή βιογενείς πηγές και η ηλεκτρική ενέργεια είναι ανανεώσιμη, το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του καυσίμου μπορεί να προσεγγίσει την ουδετερότητα άνθρακα. Οι Schemme et al. (2017) υποστηρίζουν ότι τα καύσιμα Power-to-Liquid μπορούν να αποτελέσουν βασικό εργαλείο επίτευξης net-zero μεταφορών.

Η παραγωγή e-kerosene συνδέεται επίσης με τη δημιουργία κυκλικής οικονομίας άνθρακα. Το CO₂ που παράγεται κατά την καύση των καυσίμων μπορεί να

επαναδεσμευτεί και να χρησιμοποιηθεί εκ νέου στην παραγωγική διαδικασία. Οι Savva et al. (2025) αναφέρουν ότι τα συνθετικά καύσιμα χαμηλού άνθρακα ενισχύουν τη μετάβαση προς κυκλικά ενεργειακά μοντέλα.

Η τεχνολογία αντιμετωπίζει ακόμη σημαντικές οικονομικές και τεχνικές προκλήσεις. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου απαιτεί μεγάλες ποσότητες ανανεώσιμης ενέργειας, ενώ οι διεργασίες σύνθεσης καυσίμων παρουσιάζουν υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Οι Ozkan et al. (2025) επισημαίνουν ότι η ανταγωνιστικότητα του e-kerosene εξαρτάται άμεσα από τη μείωση του κόστους ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρόλυσης.

Η διαθεσιμότητα μεγάλων ποσοτήτων πράσινου υδρογόνου και CO₂ αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα για τη μαζική παραγωγή e-kerosene. Οι Anand et al. (2025) αναφέρουν ότι απαιτείται τεράστια ανάπτυξη ανανεώσιμων ενεργειακών υποδομών ώστε να υποστηριχθεί η παγκόσμια ζήτηση συνθετικών καυσίμων αεροπορίας. Οι διεθνείς πολιτικές απανθρακοποίησης και τα προγράμματα όπως το ReFuelEU Aviation και το CORSIA ενισχύουν σημαντικά το ενδιαφέρον για ανάπτυξη e-kerosene. Πολλές αεροπορικές εταιρείες και ενεργειακοί οργανισμοί επενδύουν ήδη σε πιλοτικές μονάδες παραγωγής συνθετικών καυσίμων.

4.6 Καταλυτικά συστήματα και τεχνολογικές εξελίξεις

Τα καταλυτικά συστήματα αποτελούν βασικό στοιχείο για την παραγωγή ηλεκτροκαυσίμων (e-fuels) και βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας μέσω αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Οι καταλύτες επιταχύνουν τις χημικές αντιδράσεις μετατροπής του CO₂ σε συνθετικούς υδρογονάνθρακες, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα, την επιλεκτικότητα και τη συνολική βιωσιμότητα των διεργασιών παραγωγής e-SAF (electro-Sustainable Aviation Fuel).

Η σημασία των καταλυτικών συστημάτων είναι ιδιαίτερα μεγάλη στις διεργασίες Reverse Water Gas Shift (RWGS), Fischer–Tropsch και σύνθεσης μεθανόλης. Το CO₂ αποτελεί χημικά σταθερό μόριο και απαιτεί σημαντική ενεργειακή υποστήριξη και κατάλληλους καταλύτες για να μετατραπεί σε χρήσιμα καύσιμα. Οι Oloore et al. (2025) αναφέρουν ότι η ανάπτυξη προηγμένων μεταλλικών οξειδίων και νανοδομημένων καταλυτών αποτελεί βασικό πεδίο έρευνας για τη βελτίωση της μετατροπής CO₂ σε καύσιμα χαμηλού άνθρακα.

Στις διεργασίες RWGS χρησιμοποιούνται κυρίως καταλύτες βασισμένοι σε χαλκό, νικέλιο, σίδηρο και πολύτιμα μέταλλα. Οι Choi et al. (2024) υποστηρίζουν ότι οι καταλύτες χαλκού εμφανίζουν υψηλή επιλεκτικότητα προς παραγωγή CO και βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα. Παράλληλα, οι καταλύτες νικελίου θεωρούνται οικονομικότερη λύση, αν και παρουσιάζουν συχνά μειωμένη σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στη σύνθεση Fischer–Tropsch, οι κυριότεροι καταλύτες είναι ο κοβάλτιος και ο σίδηρος. Οι καταλύτες κοβαλτίου προσφέρουν υψηλή απόδοση στην παραγωγή μακρών ανθρακικών αλυσίδων, κατάλληλων για παραγωγή συνθετικής κηροζίνης και diesel. Αντίθετα, οι καταλύτες σιδήρου παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία στη χρήση syngas με διαφορετικές αναλογίες CO/H₂ και χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Οι Blay-Roger et al. (2024) επισημαίνουν ότι οι νέες τεχνολογίες tandem catalysis επιτρέπουν τη συνδυασμένη μετατροπή CO₂ και syngas με αυξημένη αποδοτικότητα.

Σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις καταγράφονται και στον τομέα των νανοκαταλυτών. Η χρήση νανοδομημένων υλικών αυξάνει τη διαθέσιμη επιφάνεια αντίδρασης και βελτιώνει την ενεργότητα των καταλυτών. Οι Kim et al. (2025) αναφέρουν ότι οι προηγμένες τεχνικές μηχανικής υλικών επιτρέπουν την ανάπτυξη πολυλειτουργικών καταλυτικών συστημάτων με μεγαλύτερη αντοχή και διάρκεια ζωής.

Οι τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και υπολογιστικής χημείας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τον σχεδιασμό νέων καταλυτών. Μέσω μοντέλων προσομοίωσης μπορούν να προβλεφθούν οι βέλτιστες δομές και συνθήκες λειτουργίας, μειώνοντας το κόστος πειραματικής ανάπτυξης. Οι Segovia-Hernandez (2025) υποστηρίζουν ότι η ψηφιακή βελτιστοποίηση διεργασιών θα αποτελέσει βασικό στοιχείο της επόμενης γενιάς παραγωγής e-fuels.

Η λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις μπορεί να περιορίσει σημαντικά το κόστος παραγωγής και να βελτιώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των καυσίμων. Οι Panzone et al. (2020) αναφέρουν ότι η ανάπτυξη αποδοτικότερων καταλυτών αποτελεί προϋπόθεση για τη βιομηχανική εφαρμογή τεχνολογιών Power-to-Liquid. Η απενεργοποίηση καταλυτών λόγω σχηματισμού άνθρακα (coking), η ευαισθησία σε προσμίξεις και το υψηλό κόστος πολύτιμων μετάλλων αποτελούν βασικά προβλήματα. Οι Oloore et al. (2025) επισημαίνουν ότι απαιτείται περαιτέρω

έρευνα για την ανάπτυξη πιο ανθεκτικών και οικονομικά βιώσιμων καταλυτικών συστημάτων.

Η βιομηχανική κλίμακα εφαρμογής απαιτεί σταθερή λειτουργία για μεγάλες χρονικές περιόδους και δυνατότητα ενσωμάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μεταβαλλόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα επηρεάζει τη σταθερότητα των αντιδραστήρων και δημιουργεί ανάγκη για ευέλικτες καταλυτικές τεχνολογίες.

4.7 Ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντικό αποτύπωμα e-fuels

Η ενεργειακή απόδοση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ηλεκτροκαυσίμων (e-fuels) αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την αξιολόγηση της βιωσιμότητάς τους ως εναλλακτικών καυσίμων αεροπορίας. Τα e-fuels παράγονται μέσω αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα και πράσινου υδρογόνου, με βασικό στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την υποστήριξη της ανθρακικής ουδετερότητας στον τομέα των μεταφορών.

Η ενεργειακή απόδοση των e-fuels εξαρτάται από όλα τα στάδια παραγωγής τους, συμπεριλαμβανομένης της δέσμευσης CO₂, της ηλεκτρόλυσης νερού, της παραγωγής syngas και της σύνθεσης Fischer–Tropsch. Κάθε στάδιο συνοδεύεται από ενεργειακές απώλειες, γεγονός που μειώνει τη συνολική απόδοση της διαδικασίας. Οι Schemme et al. (2017) αναφέρουν ότι τα συστήματα Power-to-Liquid παρουσιάζουν χαμηλότερη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα σε σύγκριση με την άμεση ηλεκτροκίνηση, αλλά παραμένουν απαραίτητα για τομείς όπως η αεροπορία όπου απαιτούνται καύσιμα υψηλής ενεργειακής πυκνότητας.

Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης αποτελεί το πιο ενεργοβόρο στάδιο της διαδικασίας. Οι Anand et al. (2025) επισημαίνουν ότι η ηλεκτρόλυση απαιτεί μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας και ότι η συνολική βιωσιμότητα των e-fuels εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα φθηνής και καθαρής ανανεώσιμης ενέργειας.

Η δέσμευση CO₂ μέσω Direct Air Capture (DAC) ή βιομηχανικών διεργασιών απαιτεί επίσης σημαντική κατανάλωση ενέργειας. Οι Segovia-Hernandez (2025) αναφέρουν ότι η ενεργειακή απαίτηση των τεχνολογιών DAC επηρεάζει σημαντικά το συνολικό ανθρακικό και οικονομικό ισοζύγιο των e-fuels.

Ωστόσο, παρά τις ενεργειακές απαιτήσεις, τα e-fuels μπορούν να προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη όταν παράγονται αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται κατά την καύση τους αντισταθμίζονται από το CO₂ που είχε προηγουμένως δεσμευτεί για την παραγωγή τους. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) υποστηρίζουν ότι τα e-fuels μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στην επίτευξη net-zero εκπομπών στην αεροπορία.

Ένα επιπλέον περιβαλλοντικό πλεονέκτημα των e-fuels είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Οι Raji et al. (2025) αναφέρουν ότι τα συνθετικά καύσιμα παράγουν λιγότερα αιωρούμενα σωματίδια και μειωμένες εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1. Η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των e-fuels. Η ανάλυση αυτή εξετάζει όλες τις φάσεις παραγωγής, μεταφοράς και χρήσης καυσίμων. Οι Savva et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα πραγματικά περιβαλλοντικά οφέλη εξαρτώνται από την προέλευση της ηλεκτρικής ενέργειας, του CO₂ και του υδρογόνου.

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βιωσιμότητα των e-fuels. Αν η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ορυκτά καύσιμα, οι συνολικές εκπομπές CO₂ αυξάνονται σημαντικά. Οι Liu et al. (2025) τονίζουν ότι η πλήρης απανθρακοποίηση των e-fuels απαιτεί συνδυασμό ανανεώσιμης ενέργειας, CCUS και πράσινου υδρογόνου.

Η μεγάλη κατανάλωση νερού για παραγωγή υδρογόνου και οι απαιτήσεις γης για εγκατάσταση ανανεώσιμων υποδομών αποτελούν πρόσθετες περιβαλλοντικές παραμέτρους που πρέπει να αξιολογηθούν. Η μαζική ανάπτυξη e-fuels ενδέχεται να δημιουργήσει ανταγωνισμό για φυσικούς πόρους σε ορισμένες περιοχές.

4.8 Τεχνοοικονομική αξιολόγηση παραγωγής e-SAF

Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση της παραγωγής ηλεκτροκαυσίμων βιώσιμης αεροπορίας (e-SAF) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μελλοντική εφαρμογή και εμπορική βιωσιμότητα των τεχνολογιών αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα. Παρότι τα e-SAF θεωρούνται μία από τις πιο υποσχόμενες λύσεις απανθρακοποίησης της αεροπορίας, η παραγωγή τους συνοδεύεται σήμερα από υψηλό οικονομικό και ενεργειακό κόστος.

Η παραγωγή e-SAF περιλαμβάνει πολλές ενεργοβόρες διεργασίες, όπως η δέσμευση CO₂, η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και η σύνθεση καυσίμων μέσω Fischer–Tropsch ή άλλων καταλυτικών μεθόδων. Οι Ozkan et al. (2025) αναφέρουν ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τον σημαντικότερο οικονομικό παράγοντα για την παραγωγή e-fuels. Η ηλεκτρόλυση νερού για παραγωγή πράσινου υδρογόνου αντιπροσωπεύει μεγάλο ποσοστό του συνολικού κόστους παραγωγής. Οι Anand et al. (2025) επισημαίνουν ότι η μείωση του κόστους ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και η βελτίωση αποδοτικότητας ηλεκτρολυτών αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την οικονομική βιωσιμότητα των e-SAF.

Το κόστος παραγωγής συνθετικών καυσίμων αεροπορίας παραμένει σήμερα σημαντικά υψηλότερο από τα συμβατικά καύσιμα. Τυπικές εκτιμήσεις τοποθετούν το κόστος e-SAF περίπου μεταξύ 3–8 €/L, ανάλογα με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, υδρογόνου και CO₂. Αντίθετα, το Jet A-1 κυμαίνεται συνήθως κάτω από 1 €/L σε ιστορικές μέσες τιμές. Μελλοντικές προβλέψεις εκτιμούν ότι μέχρι το 2050 το κόστος e-SAF μπορεί να μειωθεί κάτω από 2 €/L λόγω οικονομιών κλίμακας και μείωσης κόστους ηλεκτρόλυσης (Ozkan et al., 2025).

Η δέσμευση CO₂ μέσω τεχνολογιών DAC ή βιομηχανικών διεργασιών αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις επενδύσεων και λειτουργικών δαπανών. Οι Pio et al. (2025) αναφέρουν ότι η χρήση βιογενούς CO₂ από βιομηχανίες χαρτοπολτού και βιοενέργειας μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής e-SAF σε σύγκριση με την άμεση δέσμευση από τον αέρα.

Η οικονομική αξιολόγηση των e-SAF επηρεάζεται επίσης από τις τιμές των συμβατικών καυσίμων Jet A-1 και από τις πολιτικές τιμολόγησης άνθρακα. Όσο αυξάνονται οι φόροι εκπομπών CO₂ και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, τόσο βελτιώνεται η ανταγωνιστικότητα των βιώσιμων καυσίμων. Οι Delbecq et al. (2025) υποστηρίζουν ότι οι διεθνείς πολιτικές απανθρακοποίησης λειτουργούν ως βασικός μοχλός ανάπτυξης των e-fuels. Τα συνθετικά καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους υπάρχοντες κινητήρες και δίκτυα ανεφοδιασμού χωρίς εκτεταμένες τροποποιήσεις. Αυτό μειώνει το συνολικό κόστος μετάβασης σε σχέση με εναλλακτικές τεχνολογίες όπως η πλήρης ηλεκτροκίνηση ή το υδρογόνο.

Απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις για την ανάπτυξη μονάδων παραγωγής, δικτύων υδρογόνου και εγκαταστάσεων CCUS. Οι Liu et al. (2025) αναφέρουν ότι η

μετάβαση προς καύσιμα χαμηλού άνθρακα απαιτεί εκτεταμένο μετασχηματισμό των ενεργειακών και βιομηχανικών υποδομών.

Η γεωγραφική διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας επηρεάζει άμεσα την οικονομική αποδοτικότητα. Περιοχές με υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό μπορούν να παράγουν e-SAF με χαμηλότερο κόστος, δημιουργώντας νέες ενεργειακές αγορές και δυνατότητες εξαγωγών.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις αναμένεται να μειώσουν σταδιακά το κόστος παραγωγής. Οι Segovia-Hernandez (2025) επισημαίνουν ότι η βελτιστοποίηση διεργασιών, οι νέοι καταλύτες και η αύξηση βιομηχανικής κλίμακας μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα των e-SAF μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Οι κρατικές επιδοτήσεις, τα προγράμματα πράσινης μετάβασης και οι υποχρεωτικοί στόχοι χρήσης SAF αναμένεται να επιταχύνουν την εμπορική ανάπτυξη των συνθετικών καυσίμων. Οι πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσω του ReFuelEU Aviation αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα ρυθμιστικής στήριξης των βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Βιολογικές και Βιοτεχνολογικές Διαδρομές Αξιοποίησης CO₂ για Παραγωγή Βιώσιμων Αεροπορικών Καυσίμων

5.1 Μικροάλγες ως μέσο δέσμευσης CO₂

Οι μικροάλγες αποτελούν μία από τις πλέον υποσχόμενες βιολογικές πλατφόρμες για τη δέσμευση και αξιοποίηση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), λόγω της υψηλής φωτοσυνθετικής τους απόδοσης, της ταχείας ανάπτυξης και της δυνατότητας παραγωγής πολύτιμων βιοπροϊόντων. Στο πλαίσιο της μετάβασης προς βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας, η αξιοποίηση μικροαλγών αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδυάζει τη βιολογική δέσμευση άνθρακα με την παραγωγή βιομάζας κατάλληλης για παραγωγή βιοκαυσίμων.

Οι μικροάλγες χρησιμοποιούν το CO₂ ως κύρια πηγή άνθρακα μέσω φωτοσύνθεσης, μετατρέποντάς το σε οργανική ύλη με χρήση ηλιακής ενέργειας. Σε αντίθεση με τα χερσαία φυτά, παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς δέσμευσης άνθρακα και μεγαλύτερη παραγωγικότητα ανά μονάδα επιφάνειας. Οι Ahmad και Ashraf (2025) αναφέρουν ότι οι μικροάλγες μπορούν να συμβάλουν

σημαντικά στην επίτευξη στόχων βιώσιμης ανάπτυξης μέσω ταυτόχρονης παραγωγής ενέργειας, δέσμευσης άνθρακα και διαχείρισης περιβαλλοντικών πόρων.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μικροαλγών είναι η δυνατότητα ανάπτυξής τους σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις και η χρήση αλμυρού ή επεξεργασμένου νερού, περιορίζοντας έτσι τον ανταγωνισμό με τη γεωργική παραγωγή τροφίμων. Οι Lutz et al. (2024) επισημαίνουν ότι τα φωτοσυνθετικά μικροοργανικά συστήματα μπορούν να αξιοποιηθούν σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις για ταυτόχρονη δέσμευση CO₂ και παραγωγή πρώτων υλών για bio-jet fuels.

Η δέσμευση CO₂ από μικροάλγες μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω ανοικτών συστημάτων καλλιέργειας, όπως λίμνες υψηλής ανάδευσης, είτε μέσω κλειστών φωτοβιοαντιδραστήρων. Οι φωτοβιοαντιδραστήρες προσφέρουν μεγαλύτερο έλεγχο των συνθηκών ανάπτυξης, υψηλότερη παραγωγικότητα και μειωμένο κίνδυνο επιμολύνσεων, αλλά συνοδεύονται από υψηλότερο κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Αντίθετα, τα ανοικτά συστήματα είναι οικονομικότερα αλλά παρουσιάζουν χαμηλότερη αποδοτικότητα.

Η σύνδεση μικροαλγών με βιομηχανικές πηγές εκπομπών CO₂ αποτελεί μία ιδιαίτερα ελκυστική στρατηγική. Το CO₂ που εκπέμπεται από εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής, τσιμεντοβιομηχανίες ή διυλιστήρια μπορεί να διοχετεύεται απευθείας σε καλλιέργειες μικροαλγών, μειώνοντας τις καθαρές εκπομπές. Οι Eyitayo et al. (2024) υποστηρίζουν ότι η ενσωμάτωση τεχνολογιών CCUS με βιολογικές διεργασίες δημιουργεί νέες δυνατότητες για κυκλικά ενεργειακά συστήματα. Οι μικροάλγες παρουσιάζουν υψηλή ευελιξία ως προς τα παραγόμενα προϊόντα. Εκτός από λιπίδια κατάλληλα για βιοκαύσιμα, μπορούν να παράγουν πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, βιοπλαστικά και βιοδραστικές ενώσεις. Αυτή η πολυπαραγωγικότητα ενισχύει την οικονομική βιωσιμότητα των βιοδιυλιστηρίων μικροαλγών.

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις. Η συγκομιδή βιομάζας, η αφυδάτωση και οι διεργασίες downstream processing παραμένουν ενεργοβόρες και δαπανηρές. Οι Lutz et al. (2024) τονίζουν ότι τα στάδια επεξεργασίας μετά την καλλιέργεια αποτελούν μεγάλο ποσοστό του συνολικού κόστους παραγωγής.

Η κλιμάκωση των τεχνολογιών μικροαλγών αποτελεί επίσης κρίσιμο ζήτημα. Παρά τα θετικά αποτελέσματα σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα, η μετάβαση σε βιομηχανική παραγωγή παραμένει περιορισμένη λόγω κόστους, απαιτήσεων γης και

ενεργειακών αναγκών. Οι μικροάλγες προσφέρουν μία πολυδιάστατη προσέγγιση αξιοποίησης CO₂, συνδυάζοντας δέσμευση άνθρακα, παραγωγή βιομάζας και δημιουργία καυσίμων χαμηλού άνθρακα. Η περαιτέρω πρόοδος σε τεχνολογίες καλλιέργειας, βιοδυλιστηρίων και γενετικής βελτίωσης αναμένεται να ενισχύσει τον ρόλο τους στην παραγωγή βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων.

5.2 Παραγωγή βιοκαυσίμων αεροπορίας από μικροάλγες

Η παραγωγή βιοκαυσίμων αεροπορίας από μικροάλγες αποτελεί μία από τις σημαντικότερες βιοτεχνολογικές στρατηγικές αξιοποίησης CO₂, καθώς συνδυάζει υψηλή παραγωγικότητα βιομάζας με δυνατότητα παραγωγής καυσίμων κατάλληλων για χρήση στην αεροπορία. Οι μικροάλγες θεωρούνται πρώτη ύλη τρίτης γενιάς, παρουσιάζοντας πλεονεκτήματα έναντι συμβατικών ενεργειακών καλλιεργειών. Η παραγωγή bio-jet fuels βασίζεται κυρίως στην υψηλή περιεκτικότητα πολλών ειδών μικροαλγών σε λιπίδια. Τα λιπίδια αυτά μπορούν να μετατραπούν μέσω διεργασιών υδρογονοκατεργασίας και θερμοχημικής μετατροπής σε συνθετική κηροζίνη κατάλληλη για αεροπορική χρήση. Οι Bwarwa et al. (2010) ήδη από νωρίς ανέδειξαν τις δυνατότητες μετατροπής μικροαλγικών ελαίων σε αεροπορικά καύσιμα υψηλής ενεργειακής πυκνότητας.

Η παραγωγική αλυσίδα περιλαμβάνει καλλιέργεια, συγκομιδή, εξαγωγή λιπιδίων και μετατροπή σε καύσιμο. Οι Lutzu et al. (2024) τονίζουν ότι τα downstream στάδια αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη συνολική βιωσιμότητα του συστήματος. Διάφορα είδη μικροαλγών όπως *Chlorella*, *Nannochloropsis* και *Spirulina* παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό για παραγωγή βιοκαυσίμων. Η επιλογή είδους εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε λιπίδια, την ανθεκτικότητα και τις απαιτήσεις καλλιέργειας.

Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα χρήσης αποβλήτων και βιομηχανικών εκπομπών CO₂. Η χρήση λυμάτων ως θρεπτικό μέσο μπορεί να μειώσει λειτουργικά κόστη και να βελτιώσει την περιβαλλοντική απόδοση. Οι οικονομικές προκλήσεις παραμένουν σημαντικές. Οι Selimi et al. (2024) επισημαίνουν ότι ο καθαρισμός και η επεξεργασία ελαίων εξακολουθούν να αυξάνουν το τελικό κόστος παραγωγής. Η παραγωγή βιοκαυσίμων από μικροάλγες θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την αεροπορία, καθώς παράγει καύσιμα υψηλής ενεργειακής πυκνότητας συμβατά με υπάρχουσες υποδομές.

5.3 Μεταβολική μηχανική μικροοργανισμών για παραγωγή καυσίμων

Η μεταβολική μηχανική μικροοργανισμών αποτελεί σύγχρονη βιοτεχνολογική προσέγγιση που επιτρέπει τον επανασχεδιασμό κυτταρικών μεταβολικών οδών για παραγωγή καυσίμων από CO₂. Μέσω γενετικής τροποποίησης, οι μικροοργανισμοί μπορούν να μετατρέπουν άνθρακα σε αλκοόλες, λιπίδια και υδρογονάνθρακες.

Ένα από τα σημαντικότερα παραδείγματα αποτελεί το βακτήριο *Cupriavidus necator*. Οι Panich et al. (2025) περιγράφουν την αξιοποίησή του για μετατροπή CO₂ και H₂ σε βιοκαύσιμα μέσω συνθετικής βιολογίας.

Η μεταβολική μηχανική στοχεύει στην ενίσχυση υπαρχόντων μεταβολικών μονοπατιών ή στη δημιουργία νέων βιοσυνθετικών οδών. Μέσω τεχνικών CRISPR και synthetic biology μπορούν να αυξηθούν οι αποδόσεις καυσίμων και να μειωθούν ανεπιθύμητα παραπροϊόντα. Τα ένζυμα αποκαρβοξυλάσης α-κετοοξέων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή χημικών πλατφορμών για βιοκαύσιμα. Οι Ha et al. (2025) αναφέρουν ότι η τροποποίηση αυτών των ενζύμων μπορεί να ενισχύσει τη βιοσύνθεση υδρογονανθράκων.

Η αξιοποίηση αυτοτροφικών μικροοργανισμών προσφέρει επιπλέον δυνατότητες, καθώς χρησιμοποιούν CO₂ ως κύρια πηγή άνθρακα. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται συστήματα σχεδόν κλειστού κύκλου άνθρακα. Παρά τις σημαντικές προοπτικές, εξακολουθούν να υπάρχουν τεχνικά εμπόδια όπως γενετική αστάθεια, περιορισμένες αποδόσεις και υψηλό κόστος βιοαντιδραστήρων. Η μεταβολική μηχανική αποτελεί βασικό εργαλείο για τη μετάβαση προς βιολογικές πλατφόρμες παραγωγής καυσίμων χαμηλού άνθρακα.

5.4 Βιοσύνθεση υδρογονανθράκων και αλκοολών από CO₂

Η βιοσύνθεση υδρογονανθράκων και αλκοολών από CO₂ αποτελεί αναδυόμενο πεδίο που συνδυάζει βιοτεχνολογία, μεταβολική μηχανική και κυκλική οικονομία άνθρακα. Η βασική ιδέα είναι η μετατροπή διοξειδίου του άνθρακα σε υγρά καύσιμα μέσω μικροβιακών και ενζυμικών διεργασιών.

Οι αλκοόλες όπως αιθανόλη, βουτανόλη και ισοβουτανόλη θεωρούνται σημαντικοί πρόδρομοι για παραγωγή αεροπορικών καυσίμων. Μέσω καταλυτικών διεργασιών μπορούν να μετατραπούν σε υδρογονάνθρακες συμβατούς με κινητήρες αεροσκαφών. Οι Panich et al. (2025) αναφέρουν ότι μικροοργανισμοί όπως το

Cupriavidus necator μπορούν να παράγουν οργανικές ενώσεις απευθείας από CO₂ και υδρογόνο. Παράλληλα, η χρήση συνθετικής βιολογίας επιτρέπει τη δημιουργία τεχνητών μεταβολικών οδών για μεγαλύτερες αποδόσεις.

Οι υδρογονάνθρακες που παράγονται βιολογικά παρουσιάζουν υψηλό ενδιαφέρον λόγω συμβατότητας με υπάρχουσες αεροπορικές υποδομές. Οι Jayakumar et al. (2025) επισημαίνουν ότι οι σύγχρονες τεχνολογίες βιομετατροπής βελτιώνουν συνεχώς τις αποδόσεις και μειώνουν ενεργειακές απαιτήσεις. Η χρήση πράσινου υδρογόνου ενισχύει τη βιωσιμότητα των βιοσυνθετικών διεργασιών. Το υδρογόνο λειτουργεί ως δότης ηλεκτρονίων και επιτρέπει τη μετατροπή του σταθερού μορίου CO₂ σε πιο σύνθετες οργανικές ενώσεις.

Η βιοσύνθεση καυσίμων από CO₂ βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Οι χαμηλές αποδόσεις, η περιορισμένη σταθερότητα μικροοργανισμών και η ανάγκη ακριβών βιοαντιδραστήρων αποτελούν σημαντικά εμπόδια. Η δυνατότητα άμεσης μετατροπής CO₂ σε καύσιμα μέσω βιολογικών διεργασιών θεωρείται ιδιαίτερα ελπιδοφόρα για τη μελλοντική παραγωγή βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων και την επίτευξη ανθρακικής ουδετερότητας.

5.5 Downstream διεργασίες και καθαρισμός βιοκαυσίμων

Οι downstream διεργασίες αποτελούν κρίσιμο στάδιο στην αλυσίδα παραγωγής βιοκαυσίμων από βιολογικές διεργασίες αξιοποίησης CO₂, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα του τελικού καυσίμου, την ενεργειακή απόδοση και τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα της παραγωγικής διαδικασίας. Ειδικά στα βιοκαύσιμα αεροπορίας, οι απαιτήσεις ποιότητας είναι ιδιαίτερα αυστηρές λόγω των υψηλών προδιαγραφών λειτουργίας των αεροπορικών κινητήρων και των διεθνών κανονιστικών προτύπων.

Ο όρος downstream processing περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες που ακολουθούν την παραγωγή της βιομάζας ή των ενδιάμεσων προϊόντων και περιλαμβάνει στάδια όπως η συγκομιδή, ο διαχωρισμός, η αφυδάτωση, η εκχύλιση, ο καθαρισμός και η τελική αναβάθμιση του καυσίμου. Στις διεργασίες μικροαλγών, το downstream processing αντιπροσωπεύει συχνά το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους παραγωγής. Οι Lutz et al. (2024) αναφέρουν ότι τα στάδια μετά την καλλιέργεια μπορούν να αντιστοιχούν σε περισσότερο από το ήμισυ του συνολικού ενεργειακού κόστους παραγωγής bio-jet fuels.

Η συγκομιδή της βιομάζας αποτελεί ένα από τα πρώτα κρίσιμα βήματα. Επειδή οι μικροάλγες καλλιεργούνται συνήθως σε αραιά υδατικά διαλύματα, απαιτούνται αποτελεσματικές τεχνικές διαχωρισμού. Χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως φυγοκέντρωση, διήθηση, επίπλευση και συσσωμάτωση (flocculation). Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές παρουσιάζουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, γεγονός που μειώνει τη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα της παραγωγής.

Μετά τη συγκομιδή ακολουθεί η αφυδάτωση της βιομάζας. Η υψηλή περιεκτικότητα νερού των μικροαλγών αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις επεξεργασίας. Για τον λόγο αυτό εξετάζονται νέες τεχνικές χαμηλής ενεργειακής έντασης, όπως η ηλιακή ξήρανση και οι υβριδικές μέθοδοι απομάκρυνσης υγρασίας (Jayakumar et al., 2025). Η εκχύλιση λιπιδίων αποτελεί καθοριστικό στάδιο για την παραγωγή βιοκαυσίμων αεροπορίας από μικροάλγες. Χρησιμοποιούνται οργανικοί διαλύτες, υπερκρίσιμα ρευστά και μηχανικές τεχνικές κυτταρικής διάσπασης. Οι Selimi et al. (2024) τονίζουν ότι η αποτελεσματικότητα του καθαρισμού και της επεξεργασίας των λιπιδίων επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του τελικού καυσίμου.

Μετά την εξαγωγή των πρώτων υλών ακολουθεί η αναβάθμιση καυσίμου (fuel upgrading). Τα βιολογικά παραγόμενα έλαια δεν μπορούν συνήθως να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως καύσιμα αεροπορίας λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο, ακαθαρσίες και ασταθείς ενώσεις. Για αυτό εφαρμόζονται διεργασίες υδρογονοκατεργασίας, ισομερίωσης και υδρογονοδιάσπασης ώστε να παραχθούν υδρογονάνθρακες συμβατοί με προδιαγραφές aviation fuels (Raji et al., 2025). Ο καθαρισμός των τελικών βιοκαυσίμων είναι απαραίτητος για την απομάκρυνση θείου, μεταλλικών στοιχείων, υπολειμματικών διαλυτών και ανεπιθύμητων οργανικών ενώσεων. Οι Atofarati και Enweremadu (2025) αναφέρουν ότι οι σύγχρονες τεχνολογίες νανοκαταλυτών και προσθέτων βελτιώνουν τη σταθερότητα και την ποιότητα των τελικών καυσίμων.

Ένα επιπλέον ζήτημα αφορά την κατανάλωση ενέργειας των downstream διεργασιών. Οι ενεργοβόρες διεργασίες καθαρισμού μπορούν να μειώσουν τα περιβαλλοντικά οφέλη της συνολικής παραγωγικής αλυσίδας. Για τον λόγο αυτό, σύγχρονες προσεγγίσεις επικεντρώνονται στην ενσωμάτωση διεργασιών (process integration) και στη χρήση βιοδυλιστηρίων πολλαπλών προϊόντων.

Η βιομηχανική κλιμάκωση των downstream τεχνολογιών αποτελεί βασική πρόκληση. Οι μικρές βελτιώσεις στην απόδοση διαχωρισμού ή στην ανάκτηση προϊόντων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα. Οι downstream διεργασίες αποτελούν καθοριστικό παράγοντα επιτυχίας για τα βιολογικά παραγόμενα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας. Η βελτιστοποίηση των σταδίων συγκομιδής, καθαρισμού και αναβάθμισης θα διαμορφώσει σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα εμπορικής εφαρμογής των βιολογικών διαδρομών αξιοποίησης CO₂.

5.6 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί βιολογικών διεργασιών

Οι βιολογικές διεργασίες αξιοποίησης διοξειδίου του άνθρακα αποτελούν μία εναλλακτική προσέγγιση παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, βασισμένη στη χρήση μικροοργανισμών, μικροαλγών και βιοκαταλυτικών μηχανισμών. Παρότι οι τεχνολογίες αυτές εμφανίζουν σημαντικές προοπτικές για την απανθρακοποίηση της αεροπορίας, συνοδεύονται τόσο από σημαντικά πλεονεκτήματα όσο και από ουσιαστικούς περιορισμούς.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των βιολογικών διεργασιών είναι η δυνατότητα άμεσης αξιοποίησης CO₂ ως πρώτης ύλης. Μέσω φωτοσυνθετικών και αυτοτροφικών μηχανισμών, μικροοργανισμοί και μικροάλγες μετατρέπουν άνθρακα σε οργανική ύλη χρησιμοποιώντας φυσικές βιοχημικές διεργασίες. Οι Ahmad και Ashraf (2025) επισημαίνουν ότι τα βιολογικά συστήματα συνεισφέρουν σημαντικά στη δέσμευση άνθρακα και στη βιώσιμη διαχείριση πόρων.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η χαμηλότερη απαίτηση ακραίων συνθηκών λειτουργίας. Σε αντίθεση με τις θερμοχημικές διεργασίες που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, οι περισσότερες βιολογικές διεργασίες λειτουργούν σε σχετικά ήπιες συνθήκες, μειώνοντας εν μέρει τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Οι βιολογικές πλατφόρμες παρουσιάζουν επίσης υψηλή ευελιξία ως προς τα προϊόντα. Μπορούν να παράγουν λιπίδια, αλκοόλες, υδρογονάνθρακες, οργανικά οξέα και ενδιάμεσες ενώσεις χρήσιμες για παραγωγή καυσίμων. Οι Panich et al. (2025) αναφέρουν ότι η μεταβολική μηχανική επιτρέπει πλέον στοχευμένη παραγωγή συγκεκριμένων μορίων υψηλής αξίας. Επιπλέον, οι βιολογικές διεργασίες ενσωματώνονται εύκολα σε κυκλικά συστήματα παραγωγής. Η αξιοποίηση αποβλήτων, λυμάτων και βιομηχανικών εκπομπών CO₂ ενισχύει σημαντικά τη συνολική περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Eyitayo et al., 2024).

Παρά τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί παραμένουν σημαντικοί. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα αφορά τις χαμηλές παραγωγικές αποδόσεις. Η βιολογική ανάπτυξη είναι συνήθως πιο αργή σε σχέση με τις χημικές διεργασίες, περιορίζοντας τη δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων καυσίμου. Οι απαιτήσεις γης και νερού αποτελούν επίσης σημαντικό περιορισμό. Αν και οι μικροάλγες μπορούν να χρησιμοποιούν μη καλλιεργήσιμες περιοχές, οι μεγάλες εγκαταστάσεις εξακολουθούν να απαιτούν εκτεταμένες υποδομές και σημαντικούς υδατικούς πόρους.

Ένα ακόμη πρόβλημα είναι το υψηλό κόστος downstream processing. Όπως αναφέρουν οι Lutz et al. (2024), τα στάδια συγκομιδής, καθαρισμού και αναβάθμισης αυξάνουν σημαντικά το τελικό κόστος των βιοκαυσίμων. Οι βιολογικές διεργασίες εμφανίζουν επίσης αυξημένη ευαισθησία σε περιβαλλοντικές μεταβολές. Παράγοντες όπως θερμοκρασία, pH, φωτισμός και παρουσία προσμίξεων μπορούν να επηρεάσουν δραστικά την παραγωγικότητα.

Η γενετική σταθερότητα των τροποποιημένων μικροοργανισμών αποτελεί επιπλέον πρόκληση. Οι τεχνολογίες μεταβολικής μηχανικής παράγουν συχνά στελέχη υψηλής απόδοσης, τα οποία όμως μπορεί να εμφανίζουν μειωμένη σταθερότητα σε βιομηχανικές συνθήκες. Οι βιολογικές διεργασίες παρουσιάζουν ισχυρά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και σημαντικές δυνατότητες κυκλικής αξιοποίησης άνθρακα. Ωστόσο, η ευρεία εφαρμογή τους στην αεροπορία απαιτεί περαιτέρω τεχνολογική ωρίμανση, μείωση κόστους και βελτίωση παραγωγικότητας.

5.7 Σύγκριση βιολογικών και θερμοχημικών διαδρομών

Η παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας μέσω αξιοποίησης CO₂ μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω βιολογικών είτε μέσω θερμοχημικών διαδρομών. Οι δύο προσεγγίσεις παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς τις τεχνολογικές απαιτήσεις, τις αποδόσεις, την ενεργειακή κατανάλωση και τη δυνατότητα βιομηχανικής εφαρμογής.

Οι θερμοχημικές διαδρομές περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως Reverse Water Gas Shift (RWGS), Fischer–Tropsch σύνθεση, παραγωγή μεθανόλης και διεργασίες Power-to-Liquid. Αντίθετα, οι βιολογικές διαδρομές βασίζονται σε μικροοργανισμούς, μικροάλγες και βιοκαταλυτικά συστήματα.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των θερμοχημικών διαδρομών είναι οι υψηλές αποδόσεις και οι ταχύτεροι ρυθμοί παραγωγής. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) αναφέρουν ότι οι θερμοχημικές τεχνολογίες έχουν ήδη επιδείξει σημαντική ωριμότητα και μεγαλύτερη δυνατότητα βιομηχανικής κλιμάκωσης. Αντίθετα, οι βιολογικές διαδρομές εμφανίζουν μικρότερες αποδόσεις αλλά προσφέρουν αυξημένη περιβαλλοντική ευελιξία. Οι Ahmad και Ashraf (2025) υποστηρίζουν ότι οι βιολογικές πλατφόρμες ενσωματώνονται αποτελεσματικότερα σε κυκλικά συστήματα διαχείρισης άνθρακα.

Οι ενεργειακές απαιτήσεις διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. Οι θερμοχημικές διεργασίες απαιτούν συνήθως υψηλές θερμοκρασίες, πιέσεις και σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Segovia-Hernandez (2025) αναφέρουν ότι η ενεργειακή ένταση αποτελεί έναν από τους βασικούς περιορισμούς των e-fuels. Οι βιολογικές διεργασίες λειτουργούν σε ηπιότερες συνθήκες αλλά συνοδεύονται από υψηλές απαιτήσεις σε χρόνο, επιφάνεια και downstream επεξεργασία. Το ενεργειακό ισοζύγιο συχνά επηρεάζεται από τη συγκομιδή βιομάζας και τον καθαρισμό προϊόντων.

Ως προς τις πρώτες ύλες, οι θερμοχημικές διαδρομές απαιτούν συνήθως υψηλής καθαρότητας CO₂ και πράσινο υδρογόνο. Αντίθετα, οι βιολογικές διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν πιο ετερογενείς πηγές άνθρακα και απόβλητα. Η οικονομική διάσταση διαφοροποιεί επίσης τις δύο προσεγγίσεις. Οι θερμοχημικές τεχνολογίες απαιτούν υψηλές αρχικές επενδύσεις αλλά παρουσιάζουν καλύτερες προοπτικές μαζικής παραγωγής. Οι βιολογικές διαδρομές έχουν χαμηλότερες θερμοκρασιακές απαιτήσεις αλλά συχνά υψηλότερο λειτουργικό κόστος λόγω περιορισμένης παραγωγικότητας. Από περιβαλλοντική άποψη, και οι δύο διαδρομές μπορούν να συμβάλουν στην ανθρακική ουδετερότητα υπό προϋποθέσεις. Η βιωσιμότητα εξαρτάται κυρίως από την προέλευση ενέργειας, τις πηγές CO₂ και την ανάλυση κύκλου ζωής.

Σε σύγκριση με τη βιολογική αξιοποίηση CO₂, η διαδρομή Power-to-Liquid εμφανίζει υψηλότερη τεχνολογική ωριμότητα και μεγαλύτερη δυνατότητα βιομηχανικής κλιμάκωσης, συνοδεύεται όμως από σημαντικά υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω της ανάγκης παραγωγής πράσινου υδρογόνου και πολλαπλών σταδίων μετατροπής. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις τείνουν προς υβριδικά συστήματα

που συνδυάζουν βιολογικές και θερμοχημικές διεργασίες. Η ενσωμάτωση μικροαλγών, παραγωγής υδρογόνου και καταλυτικών διεργασιών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις συνολικές αποδόσεις. Δεν υπάρχει μία μοναδική βέλτιστη διαδρομή για την παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Η επιλογή τεχνολογίας εξαρτάται από ενεργειακούς πόρους, οικονομικούς περιορισμούς, διαθεσιμότητα CO₂ και το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας κάθε εφαρμογής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Εναλλακτικές Θερμοχημικές και Συνθετικές Διαδρομές Παραγωγής Βιώσιμων Καυσίμων Αεροπορίας

6.1 Παραγωγή μεθανόλης χαμηλού άνθρακα από CO₂

Η παραγωγή μεθανόλης χαμηλού άνθρακα από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εναλλακτικές διαδρομές αξιοποίησης άνθρακα για τη σύνθεση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Η μεθανόλη λειτουργεί ως βασική χημική πλατφόρμα (platform chemical), καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε άμεσα ως ενεργειακός φορέας είτε ως ενδιάμεσο προϊόν για παραγωγή συνθετικών καυσίμων υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Η αυξανόμενη σημασία της συνδέεται με τη δυνατότητα δημιουργίας κυκλικών ανθρακικών ροών, όπου το CO₂ μετατρέπεται από απόβλητο σε πρώτη ύλη.

Η βασική αντίδραση παραγωγής μεθανόλης βασίζεται στην υδρογόνωση του CO₂ σύμφωνα με την αντίδραση: $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$. Η διαδικασία απαιτεί σημαντικές ποσότητες υδρογόνου, γεγονός που καθιστά την προέλευση του υδρογόνου καθοριστικό παράγοντα βιωσιμότητας. Η χρήση πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρείται βασική προϋπόθεση για πραγματικά χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα (Anand et al., 2025).

Οι πηγές CO₂ που χρησιμοποιούνται για παραγωγή μεθανόλης μπορούν να προέρχονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις, βιογενείς διεργασίες ή τεχνολογίες άμεσης δέσμευσης από την ατμόσφαιρα (DAC). Οι Savva et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η προέλευση του CO₂ επηρεάζει σημαντικά τόσο την ανάλυση κύκλου ζωής όσο και τη συνολική βιωσιμότητα της διαδικασίας. Η αξιοποίηση βιογενούς CO₂ εμφανίζει συνήθως χαμηλότερο ενεργειακό κόστος σε σύγκριση με την άμεση δέσμευση από τον αέρα.

Η καταλυτική σύνθεση μεθανόλης πραγματοποιείται κυρίως με καταλύτες χαλκού, ψευδαργύρου και αλουμίνας. Οι καταλύτες αυτοί επιτρέπουν υψηλή επιλεκτικότητα προς μεθανόλη, αν και η σταθερότητα και η ανθεκτικότητα τους παραμένουν αντικείμενο έρευνας. Σύγχρονες προσεγγίσεις επικεντρώνονται σε νανοδομημένα υλικά και πολυλειτουργικούς καταλύτες που αυξάνουν την αποδοτικότητα και μειώνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις (Oloore et al., 2025). Η μεθανόλη χαμηλού άνθρακα παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ως ενεργειακός φορέας. Διαθέτει υγρή μορφή σε συνθήκες περιβάλλοντος, γεγονός που διευκολύνει τη μεταφορά και αποθήκευση σε σύγκριση με το υδρογόνο. Επιπλέον, μπορεί να ενσωματωθεί σε υπάρχουσες βιομηχανικές υποδομές, μειώνοντας τις απαιτήσεις νέων επενδύσεων.

Παράλληλα, η μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσο προϊόν για παραγωγή συνθετικής κηροζίνης, καθιστώντας την ιδιαίτερα ελκυστική για τον αεροπορικό τομέα. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) επισημαίνουν ότι οι methanol-based pathways αποτελούν μία από τις πιο ευέλικτες τεχνολογικές επιλογές για αξιοποίηση CO₂ στην παραγωγή SAF. Το υψηλό κόστος πράσινου υδρογόνου, οι ενεργειακές απαιτήσεις συμπίεσης και καθαρισμού CO₂ και οι απώλειες απόδοσης μειώνουν την οικονομική ανταγωνιστικότητα της μεθανόλης έναντι συμβατικών καυσίμων. Οι Segovia-Hernandez (2025) υπογραμμίζουν ότι η οικονομική βιωσιμότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πόρων.

Από περιβαλλοντική άποψη, η ανάλυση κύκλου ζωής δείχνει ότι η μεθανόλη χαμηλού άνθρακα μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, εφόσον παράγεται αποκλειστικά από ανανεώσιμη ενέργεια και δεσμευμένο CO₂. Αντίθετα, χρήση ορυκτής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να περιορίσει σημαντικά τα περιβαλλοντικά οφέλη. Η παραγωγή μεθανόλης χαμηλού άνθρακα από CO₂ αποτελεί σημαντική τεχνολογική επιλογή για τη μετάβαση προς βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας. Η συνδυασμένη πρόοδος σε καταλύτες, παραγωγή υδρογόνου και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά τον ρόλο της στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα.

6.2 Μετατροπή μεθανόλης σε καύσιμα αεροπορίας (MTJ – Methanol to Jet)

Η τεχνολογία Methanol-to-Jet (MTJ) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εναλλακτικές διαδρομές σύνθεσης βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή μεθανόλης χαμηλού άνθρακα σε συνθετικά καύσιμα συμβατά με τους υπάρχοντες αεροπορικούς κινητήρες. Η διαδρομή MTJ αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή συνδέει την αξιοποίηση CO₂ με υπάρχουσες υποδομές αερομεταφορών.

Η βασική αρχή της διαδικασίας περιλαμβάνει τη μετατροπή μεθανόλης σε ελαφρούς υδρογονάνθρακες και στη συνέχεια την αναβάθμιση των προϊόντων σε κηροζίνη αεροπορίας. Η διαδικασία περιλαμβάνει συνήθως τρία στάδια: αφυδάτωση μεθανόλης προς διμεθυλαιθέρα (DME), καταλυτική μετατροπή σε ολεφίνες και τελική олиγομεροποίηση και υδρογονοκατεργασία για παραγωγή υδρογονανθράκων κατάλληλων για χρήση ως jet fuel. Οι καταλύτες ζεολίθων, ιδιαίτερα τύπου ZSM-5, χρησιμοποιούνται εκτενώς λόγω υψηλής επιλεκτικότητας και σταθερότητας. Οι καταλυτικές ιδιότητες επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή προϊόντων και την ενεργειακή απόδοση της διαδικασίας (Segovia-Hernandez, 2025).

Ένα βασικό πλεονέκτημα της MTJ είναι η αξιοποίηση ήδη ανεπτυγμένων βιομηχανικών τεχνολογιών. Η βιομηχανία μεθανόλης διαθέτει ώριμες υποδομές παραγωγής και διακίνησης, γεγονός που μειώνει τα εμπόδια υιοθέτησης. Οι Ozkan et al. (2025) αναφέρουν ότι η διασύνδεση μεταξύ παραγωγής μεθανόλης και συνθετικών καυσίμων αποτελεί βασικό πυλώνα μελλοντικών e-fuel οικοσυστημάτων. Η ποιότητα του παραγόμενου καυσίμου αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα. Τα καύσιμα MTJ χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και αρωματικές ενώσεις, μειώνοντας εκπομπές σωματιδίων και τοπικών ρύπων κατά την καύση (Raji et al., 2025).

Πίνακας 6. Σύγκριση βασικών διαδρομών παραγωγής SAF

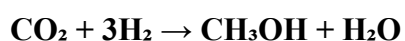
Διαδρομή	Πρώτη ύλη	Τελικό προϊόν	Πλεονέκτημα	Βασική πρόκληση	TR L	Ενδεικτική ή μείωση εκπομπών
PtL / Fischer–Tropsch	CO ₂ + H ₂	e-kerosene	Drop-in fuel, υψηλή συμβατότητα	Υψηλό κόστος H ₂	6–8	70–95%

HEFA	Έλαια, λίπη	SAF	Εμπορικά ώριμη	Περιορισμένη πρώτη ύλη	8–9	50–80%
ATJ	Αλκοόλες	Jet fuel	Ευελιξία πρώτων υλών	Κόστος παραγωγής	6–8	40–75%
MTJ	Μεθανόλη	Jet fuel	Ευέλικτη πλατφόρμα	Χαμηλότερη ωριμότητα	5–7	50–85%
FT-Biomass	Βιομάζα	FT-SPK	Μεγάλη μείωση εκπομπών	Πολύπλοκη εφοδιαστική	7–8	60–90%
Μικροάλλεες	CO ₂ + βιομάζα	Biojet	Δέσμευση άνθρακα	Κλιμάκωση παραγωγής	3–5	40–80%

Η MTJ παρουσιάζει υψηλή ευελιξία ως προς τις πηγές πρώτων υλών. Η μεθανόλη μπορεί να προέρχεται από βιομάζα, CO₂, φυσικό αέριο ή βιομηχανικά απόβλητα, επιτρέποντας διαφορετικά σενάρια απανθρακοποίησης. Ωστόσο, οι ενεργειακές απαιτήσεις παραμένουν υψηλές. Η πολυσταδιακή φύση της διαδικασίας οδηγεί σε συσσωρευμένες απώλειες απόδοσης. Οι Schemme et al. (2017) τονίζουν ότι κάθε επιπλέον μετατροπή μειώνει τη συνολική ενεργειακή αποτελεσματικότητα.

Η οικονομική ανταγωνιστικότητα εξαρτάται επίσης από την τιμή της μεθανόλης και του υδρογόνου. Το υψηλό κόστος πράσινης μεθανόλης αποτελεί σήμερα σημαντικό περιορισμό για ευρεία εμπορική εφαρμογή. Παρά τις προκλήσεις, η τεχνολογία MTJ θεωρείται ιδιαίτερα ελκυστική λόγω συμβατότητας με υπάρχουσες υποδομές και δυνατότητας αξιοποίησης CO₂. Η περαιτέρω βελτιστοποίηση καταλυτών και διεργασιών αναμένεται να ενισχύσει τη βιομηχανική εφαρμογή της.

Η τεχνολογία MTJ ξεκινά από συνθετική μεθανόλη που παράγεται μέσω υδρογόνωσης CO₂:



Στη συνέχεια η μεθανόλη μετατρέπεται σε ολεφίνες μέσω αφυδάτωσης και ακολουθεί ολιγομερισμός και υδρογόνωση για παραγωγή υδρογονανθράκων της περιοχής C₈–C₁₆ που αντιστοιχεί στο καύσιμο αεροπορίας. Ως καταλύτες χρησιμοποιούνται κυρίως ζεόλιθοι τύπου ZSM-5, οι οποίοι επιτρέπουν υψηλή εκλεκτικότητα προς υγρά καύσιμα. Βασικοί περιορισμοί αποτελούν οι απώλειες ενέργειας στα πολλαπλά στάδια μετατροπής και η ανάγκη χρήσης μεγάλων ποσοτήτων πράσινου υδρογόνου (Savva et al., 2025).

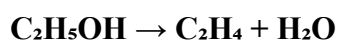
6.3 Alcohol-to-Jet (ATJ) τεχνολογίες

Οι τεχνολογίες Alcohol-to-Jet (ATJ) αποτελούν μία ακόμη σημαντική εναλλακτική διαδρομή παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, αξιοποιώντας αλκοόλες ως ενδιάμεσες πρώτες ύλες για σύνθεση συνθετικής κηροζίνης. Οι αλκοόλες που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι η αιθανόλη, η ισοβουτανόλη και η βουτανόλη, οι οποίες μπορούν να παραχθούν είτε βιολογικά είτε μέσω αξιοποίησης CO₂.

Η βασική διαδικασία ATJ περιλαμβάνει αφυδάτωση των αλκοολών προς παραγωγή ολεφινών, ακολουθούμενη από ολιγομεροποίηση, υδρογόνωση και κλασματική απόσταξη για παραγωγή αεροπορικών καυσίμων. Η διαδικασία επιτρέπει τη δημιουργία υδρογονανθράκων κατάλληλης ανθρακικής αλυσίδας για χρήση σε κινητήρες αεροσκαφών. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ATJ τεχνολογιών είναι η ευελιξία πρώτων υλών. Οι αλκοόλες μπορούν να παραχθούν από βιομάζα, γεωργικά υπολείμματα, μικροάλγες ή μικροβιακή μετατροπή CO₂. Οι Ha et al. (2025) επισημαίνουν ότι οι σύγχρονες βιοτεχνολογικές πλατφόρμες αυξάνουν συνεχώς τις δυνατότητες παραγωγής αλκοολών χαμηλού άνθρακα.

Οι τεχνολογίες ATJ έχουν ήδη προσελκύσει σημαντικό βιομηχανικό ενδιαφέρον λόγω υψηλής συμβατότητας με υπάρχουσες υποδομές. Οι Undavalli et al. (2024) αναφέρουν ότι τα καύσιμα ATJ θεωρούνται από τις πλέον ώριμες τεχνολογίες SAF με σημαντικές δυνατότητες εμπορικής εφαρμογής. Περιβαλλοντικά, τα καύσιμα ATJ μπορούν να προσφέρουν σημαντική μείωση εκπομπών, ιδιαίτερα όταν οι αλκοόλες παράγονται από ανανεώσιμες πηγές άνθρακα. Παράλληλα, η χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο μειώνει τις εκπομπές σωματιδίων και ατμοσφαιρικών ρύπων.

Οι τεχνολογίες ATJ αξιοποιούν κυρίως αιθανόλη και ισοβουτανόλη ως ενδιάμεσες ενώσεις. Η διεργασία περιλαμβάνει αφυδάτωση της αλκοόλης προς ολεφίνες, ολιγομερισμό για αύξηση του μοριακού βάρους και τελική υδρογόνωση για παραγωγή παραφινικών υδρογονανθράκων κατάλληλων για χρήση ως αεροπορικό καύσιμο. Η γενική αντίδραση αφυδάτωσης της αιθανόλης περιγράφεται ως:



Παρά τα πλεονεκτήματα αξιοποίησης υφιστάμενων υποδομών παραγωγής βιοαιθανόλης, η διαδρομή ATJ παρουσιάζει χαμηλότερη συνολική ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με ορισμένες εναλλακτικές οδούς SAF, ενώ η οικονομική

βιωσιμότητα εξαρτάται σημαντικά από τη διαθεσιμότητα φθηνών αλκοολικών πρώτων υλών (Undavalli et al., 2024; Ramos-Fernandez et al., 2025).

Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί. Οι ενεργειακές απώλειες πολλαπλών σταδίων, οι απαιτήσεις καταλυτών και το υψηλό κόστος πρώτων υλών εξακολουθούν να επηρεάζουν την οικονομική βιωσιμότητα. Οι Liu et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η μείωση κόστους ανανεώσιμης ενέργειας θα είναι καθοριστική για τη μελλοντική ανάπτυξη των ATJ τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες ATJ προσφέρουν μία ευέλικτη και τεχνολογικά ώριμη προσέγγιση παραγωγής βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων, αποτελώντας σημαντικό στοιχείο της στρατηγικής απανθρακοποίησης του αεροπορικού τομέα. Η τεχνολογία HEFA αποτελεί σήμερα την εμπορικά πιο ώριμη διαδρομή παραγωγής βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων, ωστόσο δεν βασίζεται άμεσα στην αξιοποίηση CO₂ και περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα βιώσιμων λιπιδικών πρώτων υλών και τους περιορισμούς χρήσης γης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Περιβαλλοντική, Ενεργειακή και Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Βιώσιμων Καυσίμων Αεροπορίας

7.1 Ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA)

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία αξιολόγησης της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των καυσίμων αεροπορίας νέας γενιάς, καθώς επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλα τα στάδια της παραγωγικής αλυσίδας. Στην περίπτωση των βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (SAF), η LCA αποκτά ιδιαίτερη σημασία, επειδή οι πραγματικές μειώσεις εκπομπών δεν εξαρτώνται μόνο από την καύση του καυσίμου αλλά και από τον τρόπο παραγωγής, μεταφοράς, επεξεργασίας και τελικής χρήσης.

Πίνακας 7 : Σύγκριση εκπομπών κύκλου ζωής

Καύσιμο	Εκπομπές (gCO ₂ eq/MJ)	Μείωση έναντι Jet A-1
Jet A-1	85–95	-
HEFA	20–60	30–80%
FT-SAF	15–50	40–85%

e-Kerosene	5–20	>80%
Microalgae SAF	15–55	35–80%

Η βασική αρχή της LCA στηρίζεται στην αξιολόγηση όλων των εισροών και εκροών ενός συστήματος από την εξόρυξη ή παραγωγή πρώτων υλών έως την τελική χρήση και διάθεση. Στον τομέα των αεροπορικών καυσίμων εφαρμόζονται κυρίως δύο προσεγγίσεις: η ανάλυση “well-to-wake” και η ανάλυση “cradle-to-grave”. Η πρώτη επικεντρώνεται κυρίως στην ενεργειακή αλυσίδα καυσίμου, ενώ η δεύτερη εξετάζει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος (Savva et al., 2025).

Επίδραση προέλευσης CO ₂ στο ανθρακικό αποτύπωμα	
Προέλευση CO₂	Κλιματική επίδοση
Βιογενές CO ₂	Πολύ υψηλή
DAC	Υψηλή αλλά ενεργοβόρα
Βιομηχανικό CO ₂	Ενδιάμεση
Ορυκτό CO ₂	Χαμηλή

Για τα e-fuels και τα συνθετικά καύσιμα από CO₂, η LCA περιλαμβάνει στάδια όπως δέσμευση άνθρακα, παραγωγή υδρογόνου, μεταφορά πρώτων υλών, καταλυτική σύνθεση και τελική χρήση στον κινητήρα αεροσκάφους. Οι Schemme et al. (2017) αναφέρουν ότι η ενσωμάτωση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος. Η προέλευση του CO₂ επηρεάζει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η χρήση βιογενούς CO₂ ή άμεσης δέσμευσης από την ατμόσφαιρα παρουσιάζει διαφορετικά περιβαλλοντικά προφίλ συγκριτικά με τη χρήση βιομηχανικών εκπομπών. Οι Pio et al. (2025) επισημαίνουν ότι το biogenic CO₂ εμφανίζει συχνά καλύτερη συνολική περιβαλλοντική επίδοση λόγω μικρότερων ενεργειακών απαιτήσεων δέσμευσης.

Τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1 παρουσιάζουν εκπομπές κύκλου ζωής περίπου 85–95 gCO₂eq/MJ. Αντίθετα, τα βιώσιμα καύσιμα εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές: HEFA περίπου 20–60 gCO₂eq/MJ, FT-SAF περίπου 15–50 gCO₂eq/MJ και e-kerosene που παράγεται από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και DAC μπορεί να πέσει ακόμη και κάτω από 20 gCO₂eq/MJ (Savva et al., 2025). Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου αποτελεί επίσης κρίσιμο στοιχείο της αξιολόγησης. Οι Anand et al. (2025)

υπογραμμίζουν ότι η χρήση ηλεκτρόλυσης με ηλεκτρική ενέργεια υψηλής έντασης άνθρακα μπορεί να αναιρέσει σημαντικό μέρος των περιβαλλοντικών οφελών. Πέρα από τις εκπομπές CO₂, η LCA εξετάζει επιπλέον δείκτες όπως κατανάλωση νερού, χρήση γης, οξίνιση, ευτροφισμό και απαιτήσεις πρώτων υλών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις βιολογικές διαδρομές παραγωγής, όπου οι επιπτώσεις χρήσης γης και νερού μπορεί να είναι σημαντικές.

Παρά τη χρησιμότητα της μεθόδου, υπάρχουν περιορισμοί. Διαφορετικές υποθέσεις συστήματος, όρια ανάλυσης και επιλογές συντελεστών εκπομπών οδηγούν συχνά σε διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ μελετών. Οι Liu et al. (2025) επισημαίνουν ότι απαιτείται μεγαλύτερη τυποποίηση μεθοδολογιών ώστε να διευκολυνθούν οι συγκρίσεις μεταξύ τεχνολογιών. Η LCA αποτελεί αναγκαίο εργαλείο για την αξιολόγηση των SAF, καθώς παρέχει ολοκληρωμένη εικόνα των πραγματικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και συμβάλλει στη λήψη τεχνολογικών και πολιτικών αποφάσεων.

Συγκριτική αξιολόγηση βασικών διαδρομών παραγωγής SAF/e-SAF

Διαδρομή	Πρώτη ύλη	Βασικά στάδια	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Τεχνολογική ωριμότητα (TRL)
HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)	Φυτικά έλαια, χρησιμοποιημένα μαγειρικά έλαια, ζωικά λίπη	Υδρογονοκατεργασία → ισομερίωση → κλασματοποίηση	Εμπορικά ώριμη τεχνολογία, υψηλή συμβατότητα με Jet A-1	Περιορισμένη διαθεσιμότητα βιώσιμων λιπιδικών πρώτων υλών	9
FT-SPK (Fischer–Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene)	Βιομάζα ή CO ₂ + H ₂	Αεριοποίηση ή RWGS → syngas → FT σύνθεση → upgrading	Υψηλή ποιότητα καυσίμου, μεγάλη ευελιξία πρώτων υλών	Υψηλό επενδυτικό κόστος	7–9
Power-to-Liquid (PtL/e-SAF)	CO ₂ + πράσινο H ₂	DAC ή CCUS → RWGS → FT → e-kerosene	Πολύ χαμηλές εκπομπές κύκλου ζωής	Υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και κόστος H ₂	6–8

Διαδρομή	Πρώτη ύλη	Βασικά στάδια	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί	Τεχνολογική ωριμότητα (TRL)
MTJ (Methanol-to-Jet)	Μεθανόλη από CO ₂ ή βιομάζα	Σύνθεση μεθανόλης → αφυδάτωση → ολιγομερισμός → υδρογόνωση	Ευέλικτη διαδρομή παραγωγής	Περιορισμένη βιομηχανική ή εμπειρία	6–7
ATJ (Alcohol-to-Jet)	Αιθανόλη, ισοβουτανόλη	Αφυδάτωση → ολιγομερισμός → υδρογόνωση	Αξιοποίηση υφιστάμενων αλκοολικών ρευμάτων	Αρκετά στάδια επεξεργασίας	7–8
Μικροάλγες	CO ₂ , νερό, ηλιακή ακτινοβολία	Καλλιέργεια → συγκομιδή → εκχύλιση λιπιδίων → HEFA	Άμεση βιολογική δέσμευση CO ₂	Υψηλό κόστος καλλιέργειας και συγκομιδής	4–6

Πηγή: Προσαρμογή από Undavalli et al. (2024), Ramos-Fernandez et al. (2025), Ozkan et al. (2025), Lutz et al. (2024).

7.2 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των SAF

Η μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου αποτελεί τον βασικό λόγο ανάπτυξης των βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (SAF). Παρότι τα καύσιμα αυτά χαρακτηρίζονται συχνά ως χαμηλού άνθρακα, η πραγματική περιβαλλοντική τους απόδοση εξαρτάται από την προέλευση πρώτων υλών, τις διεργασίες παραγωγής και τις ενεργειακές εισροές.

Οι εκπομπές των SAF αξιολογούνται συνήθως σε όρους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂-eq), λαμβάνοντας υπόψη όλες τις εκπομπές κατά μήκος της αλυσίδας παραγωγής. Οι Song et al. (2025) επισημαίνουν ότι η επίτευξη ουσιαστικής απανθρακοποίησης απαιτεί σημαντικές μειώσεις εκπομπών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής και όχι μόνο κατά τη φάση χρήσης. Τα e-fuels που παράγονται από CO₂ και πράσινο υδρογόνο εμφανίζουν από τις υψηλότερες δυνατότητες μείωσης εκπομπών. Οι Ozkan et al. (2025) αναφέρουν ότι τα πλήρως ανανεώσιμα e-fuels μπορούν θεωρητικά να προσεγγίσουν σχεδόν κλειστό κύκλο άνθρακα, καθώς ο άνθρακας που απελευθερώνεται κατά την καύση είχε προηγουμένως δεσμευθεί.

Ιδιαίτερη σημασία στην αξιολόγηση κύκλου ζωής των SAF έχει η προέλευση του διοξειδίου του άνθρακα που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη. Το βιογενές CO₂, το

οποίο προέρχεται από βιομάζα ή διεργασίες βιοαερίου, θεωρείται μέρος του βραχυπρόθεσμου βιογεωχημικού κύκλου του άνθρακα και συνεπώς οδηγεί σε σημαντικά χαμηλότερες καθαρές εκπομπές. Αντίστοιχα, το CO₂ που δεσμεύεται απευθείας από την ατμόσφαιρα μέσω Direct Air Capture (DAC) μπορεί να οδηγήσει θεωρητικά σε σχεδόν ουδέτερο ανθρακικό ισοζύγιο, υπό την προϋπόθεση ότι η απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Αντίθετα, η αξιοποίηση CO₂ από ορυκτές βιομηχανικές πηγές, όπως διυλιστήρια ή μονάδες παραγωγής τσιμέντου, μειώνει μεν τις άμεσες εκπομπές αλλά δεν εξαλείφει πλήρως την εξάρτηση από τον ορυκτό άνθρακα. Επομένως, η περιβαλλοντική επίδοση ενός SAF δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογία σύνθεσης αλλά και από την προέλευση του CO₂ και της ενέργειας που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή του.

Αντίστοιχα, τα βιοκαύσιμα από μικροάλγες παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες μείωσης εκπομπών λόγω βιολογικής δέσμευσης άνθρακα. Ωστόσο, οι Ahmad και Ashraf (2025) τονίζουν ότι οι εκπομπές από καλλιέργεια, συγκομιδή και επεξεργασία επηρεάζουν έντονα το τελικό ισοζύγιο. Οι μη-CO₂ επιδράσεις της αεροπορίας αποτελούν επίσης σημαντικό ζήτημα. Οι εκπομπές NO_x, υδρατμών, σωματιδίων και οι γραμμές συμπύκνωσης συμβάλλουν σημαντικά στη συνολική κλιματική επίδραση. Οι Delbecq et al. (2025) αναφέρουν ότι οι μη-CO₂ επιπτώσεις μπορεί να είναι συγκρίσιμες ή και μεγαλύτερες από τις άμεσες εκπομπές CO₂.

Εκπομπές κύκλου ζωής
Jet A-1 → 85–95 gCO ₂ eq/MJ
HEFA → 20–60 gCO ₂ eq/MJ
FT-SAF → 15–50 gCO ₂ eq/MJ
e-kerosene → 5–20 gCO ₂ eq/MJ

Τα SAF παρουσιάζουν συχνά χαμηλότερες εκπομπές σωματιδίων και θείου λόγω χαμηλότερης περιεκτικότητας σε αρωματικές ενώσεις. Οι Raji et al. (2025) υποστηρίζουν ότι αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη ποιότητα αέρα και πιθανή μείωση σχηματισμού contrails. Παρόλα αυτά, οι μειώσεις εκπομπών δεν είναι πάντα εγγυημένες. Εάν χρησιμοποιούνται ορυκτές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας ή CO₂ υψηλής έντασης άνθρακα, τα οφέλη μειώνονται σημαντικά. Τα SAF μπορούν να συμβάλουν

ουσιαστικά στη μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, υπό την προϋπόθεση ότι ενσωματώνονται σε συστήματα χαμηλού άνθρακα και ανανεώσιμης ενέργειας.

Ενδεικτικά τεχνοοικονομικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά διαδρομών SAF

Παράμετρος	Jet A-1	HEFA-SAF	FT-SAF	e-SAF (PtL)
Εκπομπές κύκλου ζωής	85–95 gCO ₂ eq/MJ	15–40 gCO ₂ eq/MJ	10–35 gCO ₂ eq/MJ	5–25 gCO ₂ eq/MJ
Κόστος παραγωγής	0,7–1,0 €/L	1,2–2,0 €/L	2,0–3,5 €/L	3,0–6,0 €/L
Κατανάλωση H ₂	-	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ υψηλή
Ενεργειακή απαίτηση	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ υψηλή
Δυνατότητα απανθρακοποίησης	Χαμηλή	Υψηλή	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή

Πηγή: Dahal et al. (2021), Schemme et al. (2017), Pio et al. (2025), European Commission (2023).

Τα βιώσιμα αεροπορικά καύσιμα δεν εξαλείφουν τις άμεσες εκπομπές CO₂ κατά την καύση τους, καθώς η οξείδωση των υδρογονανθράκων συνεχίζει να παράγει διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο, μειώνουν σημαντικά τις καθαρές εκπομπές κύκλου ζωής όταν παράγονται από ανανεώσιμη ενέργεια, βιώσιμες πρώτες ύλες και κυκλικές ροές άνθρακα.

7.3 Ενεργειακή αποδοτικότητα και ενεργειακές απώλειες

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αξιολόγησης των βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας, καθώς καθορίζει πόσο αποτελεσματικά μετατρέπεται η πρωτογενής ενέργεια σε χρήσιμο αεροπορικό καύσιμο. Οι διαδρομές αξιοποίησης CO₂ παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις συνολικές απώλειες.

Τα e-fuels χαρακτηρίζονται από πολυσταδιακές αλυσίδες παραγωγής. Περιλαμβάνουν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτρόλυση, δέσμευση CO₂, σύνθεση καυσίμου και μεταφορά. Σε κάθε στάδιο εμφανίζονται ενεργειακές απώλειες που επηρεάζουν τη συνολική απόδοση. Οι Schemme et al. (2017) υπολογίζουν ότι η συνολική απόδοση των Power-to-Liquid διαδρομών παραμένει σχετικά χαμηλή συγκριτικά με άμεση ηλεκτροκίνηση. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου αποτελεί ένα από τα πιο ενεργοβόρα στάδια. Οι Tak et al. (2025) αναφέρουν ότι η ηλεκτρόλυση εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικές απώλειες, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.

Οι διεργασίες RWGS και Fischer–Tropsch προσθέτουν επιπλέον ενεργειακές απαιτήσεις λόγω υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Οι Choi et al. (2024) υπογραμμίζουν ότι η βελτίωση καταλυτών μπορεί να περιορίσει μέρος των απωλειών. Οι βιολογικές διαδρομές λειτουργούν σε ηπιότερες συνθήκες, αλλά εμφανίζουν απώλειες λόγω χαμηλών ρυθμών ανάπτυξης και ενεργοβόρου downstream processing. Παρά τις απώλειες, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των υγρών καυσίμων διατηρεί σημαντικό πλεονέκτημα για την αεροπορία μεγάλων αποστάσεων.

7.4 Οικονομική βιωσιμότητα παραγωγής e-fuels

Η οικονομική βιωσιμότητα αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους περιορισμούς για τη μαζική διείσδυση των e-fuels στην αεροπορία. Παρότι οι τεχνολογίες παραγωγής εμφανίζουν σημαντική πρόοδο, το κόστος παραμένει αισθητά υψηλότερο από τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1.

Το κόστος παραγωγής επηρεάζεται κυρίως από τέσσερις παράγοντες: κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, τιμή υδρογόνου, κόστος δέσμευσης CO₂ και κεφαλαιουχικές επενδύσεις. Οι Segovia-Hernandez (2025) υποστηρίζουν ότι η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί τον σημαντικότερο οικονομικό παράγοντα.

Πίνακας 7

Fuel	gCO ₂ eq/MJ
Jet A-1	85–95
HEFA	20–60
FT-SAF	15–50
e-kerosene	5–20

Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου παραμένει ιδιαίτερα δαπανηρή. Οι Roque et al. (2024) αναφέρουν ότι η μείωση κόστους ηλεκτρόλυσης θα καθορίσει τη μελλοντική ανταγωνιστικότητα των e-fuels. Οι επενδύσεις σε μονάδες PtL, DAC και καταλυτικές εγκαταστάσεις αυξάνουν σημαντικά τις αρχικές δαπάνες. Οι Ozkan et al. (2025) τονίζουν ότι η οικονομική βιωσιμότητα απαιτεί μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις και

υψηλούς συντελεστές λειτουργίας (International Air Transport Association (IATA), 2024).

Οι πολιτικές παρεμβάσεις παίζουν καθοριστικό ρόλο. Μηχανισμοί όπως carbon pricing, φορολογικά κίνητρα και υποχρεωτικά ποσοστά SAF μπορούν να βελτιώσουν την ανταγωνιστικότητα. Παρά το υψηλό σημερινό κόστος, οι προβλέψεις δείχνουν ότι η τεχνολογική μάθηση, η μείωση τιμών ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και η κλιμάκωση παραγωγής θα μειώσουν σταδιακά το κόστος (International Energy Agency (IEA), 2024).

7.5 Κόστος παραγωγής και υποδομών

Το κόστος παραγωγής και ανάπτυξης υποδομών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την ταχύτητα υιοθέτησης βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (Sustainable Aviation Fuels – SAF). Παρά τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο των τελευταίων ετών, τα περισσότερα SAF και ιδιαίτερα τα e-fuels εξακολουθούν να εμφανίζουν υψηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με τα συμβατικά αεροπορικά καύσιμα, δημιουργώντας σημαντικές προκλήσεις για την εμπορική τους διείσδυση.

Το συνολικό κόστος παραγωγής των SAF επηρεάζεται από πολλαπλές μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων των πρώτων υλών, της κατανάλωσης ενέργειας, των τεχνολογιών μετατροπής, των απαιτήσεων καθαρισμού και της κλίμακας παραγωγής. Στις διαδρομές αξιοποίησης CO₂, ιδιαίτερα σημαντικό κόστος προκύπτει από τη δέσμευση άνθρακα και την παραγωγή πράσινου υδρογόνου. Οι Segovia-Hernandez (2025) αναφέρουν ότι η υψηλή ενεργειακή ένταση των διεργασιών Power-to-Liquid επηρεάζει καθοριστικά το τελικό κόστος καυσίμου.

Πίνακας 8 : Σύγκριση κόστους παραγωγής

Καύσιμο	Κόστος παραγωγής (€/L)	Κύριος παράγοντας κόστους
Jet A-1	<1	Πετρέλαιο
HEFA	1–2	Feedstock
FT-SAF	2–5	CAPEX
e-SAF	3–8	H ₂ + ηλεκτρική ενέργεια
MTJ	2–6	Μεθανόλη

Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης αποτελεί συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους παραγωγής e-fuels. Οι Anand et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την οικονομική ανταγωνιστικότητα των συνθετικών καυσίμων. Σε περιοχές με χαμηλό κόστος ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, τα οικονομικά δεδομένα εμφανίζονται σημαντικά ευνοϊκότερα.

Οι τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ δημιουργούν πρόσθετες οικονομικές απαιτήσεις. Η άμεση δέσμευση από την ατμόσφαιρα (DAC) παρουσιάζει υψηλότερο κόστος συγκριτικά με τη χρήση βιομηχανικών ρευμάτων CO₂ λόγω χαμηλότερων συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα και αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Αντίθετα, η αξιοποίηση βιογενούς ή βιομηχανικού CO₂ μπορεί να μειώσει το αρχικό κόστος παραγωγής (Pio et al., 2025).

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) αποτελούν επίσης σημαντικό παράγοντα. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής SAF απαιτούν σύνθετο εξοπλισμό, συστήματα καθαρισμού, καταλυτικούς αντιδραστήρες, ηλεκτρολύτες και μονάδες συμπίεσης. Οι Ozkan et al. (2025) επισημαίνουν ότι οι αρχικές επενδύσεις παραμένουν σημαντικά υψηλότερες συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες διύλισης.

Οι απαιτήσεις υποδομών εκτείνονται πέρα από την παραγωγή καυσίμων. Η αποθήκευση υδρογόνου, η μεταφορά CO₂, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι εγκαταστάσεις ανάμιξης καυσίμων δημιουργούν πρόσθετες ανάγκες επενδύσεων. Η ύπαρξη ήδη ανεπτυγμένων αεροπορικών υποδομών προσφέρει πλεονέκτημα στα drop-in fuels, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν με περιορισμένες τροποποιήσεις (Undavalli et al., 2024). Η οικονομία κλίμακας αναμένεται να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη μείωση κόστους. Μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής επιτρέπουν χαμηλότερο μοναδιαίο κόστος, βελτιωμένη αξιοποίηση εξοπλισμού και μείωση λειτουργικών δαπανών. Οι Schemme et al. (2017) υπογραμμίζουν ότι η μαζική ανάπτυξη παραγωγικών εγκαταστάσεων αποτελεί βασική προϋπόθεση για ανταγωνιστικά e-fuels.

Η κρατική στήριξη και τα οικονομικά κίνητρα επηρεάζουν σημαντικά τη βιωσιμότητα των επενδύσεων. Carbon pricing, φορολογικές απαλλαγές, επιδοτήσεις και μηχανισμοί συμβολαίων διαφοράς μπορούν να επιταχύνουν την ανάπτυξη υποδομών χαμηλού άνθρακα.

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν αβεβαιότητες σχετικά με τη μελλοντική εξέλιξη των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, πρώτων υλών και τεχνολογικού εξοπλισμού. Οι διακυμάνσεις αυτές δυσκολεύουν τη μακροπρόθεσμη οικονομική αξιολόγηση έργων SAF. Το κόστος παραγωγής και υποδομών παραμένει βασικός περιορισμός για την ευρεία εφαρμογή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Η τεχνολογική ωρίμανση, η μείωση κόστους ανανεώσιμης ενέργειας και η κλιμάκωση παραγωγής αναμένεται να βελτιώσουν σημαντικά την οικονομική ανταγωνιστικότητα τα επόμενα χρόνια.

7.6 Σύγκριση SAF με συμβατικά αεροπορικά καύσιμα

Η σύγκριση των βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (SAF) με τα συμβατικά καύσιμα Jet A-1 αποτελεί κρίσιμο βήμα για την αξιολόγηση της δυνατότητας μετάβασης της αεροπορίας προς ένα χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα. Η σύγκριση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου αλλά περιλαμβάνει ενεργειακές ιδιότητες, τεχνολογική συμβατότητα, οικονομικούς παράγοντες και επιχειρησιακή απόδοση.

Το συμβατικό Jet A-1 αποτελεί προϊόν διύλισης πετρελαίου και χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, σταθερότητα και εκτεταμένη παγκόσμια υποδομή. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αποτελεί βασικό πλεονέκτημα, καθώς η αεροπορία απαιτεί καύσιμα με υψηλή αναλογία ενέργειας προς βάρος. Οι Wei et al. (2025) αναφέρουν ότι η ενεργειακή πυκνότητα παραμένει βασικό κριτήριο επιλογής καυσίμου για αεροπορικές εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων.

Τα SAF επιδιώκουν να διατηρήσουν τις λειτουργικές ιδιότητες του Jet A-1, μειώνοντας παράλληλα το ανθρακικό αποτύπωμα. Οι περισσότερες τεχνολογίες SAF στοχεύουν στην παραγωγή drop-in fuels, δηλαδή καυσίμων συμβατών με υπάρχοντες κινητήρες, αεροσκάφη και υποδομές ανεφοδιασμού (Undavalli et al., 2024).

Από περιβαλλοντική άποψη, τα SAF παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Οι Song et al. (2025) αναφέρουν ότι τα βιώσιμα καύσιμα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές κύκλου ζωής, ιδιαίτερα όταν παράγονται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες και χαμηλού άνθρακα ηλεκτρική ενέργεια. Τα e-fuels από CO₂ και πράσινο υδρογόνο προσφέρουν θεωρητικά σχεδόν κλειστό κύκλο άνθρακα. Ωστόσο, η πραγματική απόδοση εξαρτάται έντονα από τις ενεργειακές εισροές και την προέλευση πρώτων υλών (Ramos-Fernandez et al., 2025).

Ως προς τις φυσικοχημικές ιδιότητες, πολλά SAF εμφανίζουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο και αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Οι Raji et al. (2025) επισημαίνουν ότι αυτό συμβάλλει στη μείωση εκπομπών σωματιδίων και στη βελτίωση της ποιότητας αέρα γύρω από αεροδρόμια.

Παρά τα πλεονεκτήματα, τα SAF παρουσιάζουν περιορισμούς. Το κόστος παραγωγής παραμένει υψηλότερο, η παραγωγική ικανότητα είναι περιορισμένη και οι διαθέσιμες ποσότητες δεν επαρκούν ακόμη για πλήρη αντικατάσταση του Jet A-1. Επιπλέον, ορισμένα καύσιμα απαιτούν περιορισμένη ανάμιξη με συμβατικά καύσιμα λόγω πιστοποιητικών απαιτήσεων. Οι ενεργειακές απώλειες παραγωγής αποτελούν επίσης σημαντικό ζήτημα. Οι θερμοχημικές διαδρομές e-fuels απαιτούν πολλαπλά στάδια μετατροπής, αυξάνοντας την κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με την απευθείας χρήση ορυκτών καυσίμων.

Από πλευράς ενεργειακής ασφάλειας, τα SAF προσφέρουν μεγαλύτερη διαφοροποίηση πρώτων υλών και μικρότερη εξάρτηση από πετρελαϊκές αγορές. Αυτό μπορεί να μειώσει μελλοντικούς γεωπολιτικούς κινδύνους. Τα SAF εμφανίζουν σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα έναντι του Jet A-1, αλλά εξακολουθούν να υστερούν σε κόστος και παραγωγική ωριμότητα. Η μελλοντική ανταγωνιστικότητά τους θα εξαρτηθεί από τεχνολογική πρόοδο, πολιτικές υποστήριξης και κλιμάκωση παραγωγής.

7.7 Κοινωνικές και γεωπολιτικές επιπτώσεις

Η μετάβαση προς βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας δεν αποτελεί μόνο τεχνολογική και περιβαλλοντική πρόκληση αλλά και κοινωνικοοικονομική και γεωπολιτική μεταβολή μεγάλης κλίμακας. Η ανάπτυξη νέων ενεργειακών αλυσίδων επηρεάζει αγορές, διεθνείς σχέσεις, απασχόληση και ενεργειακή ασφάλεια.

Ένα από τα σημαντικότερα κοινωνικά οφέλη των SAF αφορά τη δημιουργία νέων βιομηχανικών οικοσυστημάτων και θέσεων εργασίας. Η ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου, εγκαταστάσεων δέσμευσης CO₂ και μονάδων παραγωγής καυσίμων δημιουργεί νέες ανάγκες εξειδικευμένου προσωπικού. Οι Raman et al. (2024) υπογραμμίζουν ότι η ανάπτυξη SAF συνδέεται άμεσα με στόχους βιώσιμης ανάπτυξης και πράσινης οικονομίας.

Η ενεργειακή μετάβαση επηρεάζει επίσης περιφερειακές οικονομίες. Χώρες με υψηλό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να εξελιχθούν σε εξαγωγείς συνθετικών καυσίμων ή πράσινου υδρογόνου. Οι Tak et al. (2025) αναφέρουν ότι η γεωγραφική ανακατανομή ενεργειακών πόρων μπορεί να αλλάξει σημαντικά τις παγκόσμιες ενεργειακές ισορροπίες. Η ενεργειακή ασφάλεια αποτελεί ακόμη έναν κρίσιμο παράγοντα. Η εξάρτηση της αεροπορίας από το πετρέλαιο δημιουργεί γεωπολιτικούς κινδύνους λόγω συγκέντρωσης αποθεμάτων σε περιορισμένες περιοχές. Τα SAF προσφέρουν δυνατότητα διαφοροποίησης πρώτων υλών και αποκεντρωμένης παραγωγής.

Ωστόσο, νέες εξαρτήσεις μπορεί να εμφανιστούν. Η παραγωγή e-fuels απαιτεί μεγάλες ποσότητες κρίσιμων μετάλλων, καταλυτών και ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Liu et al. (2025) επισημαίνουν ότι η μετάβαση χαμηλού άνθρακα μπορεί να δημιουργήσει νέες γεωπολιτικές αλυσίδες εξάρτησης. Σε κοινωνικό επίπεδο, η αύξηση κόστους αεροπορικών μεταφορών αποτελεί πιθανή συνέπεια. Η υψηλότερη τιμή των SAF ενδέχεται να μεταφερθεί στους καταναλωτές μέσω αυξημένων ναύλων, δημιουργώντας ζητήματα κοινωνικής αποδοχής.

Η χρήση βιολογικών πρώτων υλών δημιουργεί επίσης ζητήματα ανταγωνισμού πόρων. Αν και οι τεχνολογίες τρίτης γενιάς μειώνουν αυτόν τον κίνδυνο, η μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη μπορεί να δημιουργήσει πιέσεις σε γη, νερό και βιομάζα. Παράλληλα, οι διεθνείς ανισότητες ενδέχεται να ενισχυθούν. Αναπτυσσόμενες οικονομίες μπορεί να αντιμετωπίσουν δυσκολίες πρόσβασης σε ακριβές τεχνολογίες SAF, διευρύνοντας το τεχνολογικό χάσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Προκλήσεις, Περιορισμοί και Μελλοντικές Προοπτικές για την Αξιοποίηση CO₂ στην Αεροπορία

8.1 Τεχνολογικά εμπόδια στην αξιοποίηση του CO₂

Η αξιοποίηση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) για την παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές στρατηγικές απανθρακοποίησης του αεροπορικού τομέα. Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια, εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικά τεχνολογικά εμπόδια που περιορίζουν την εμπορική εφαρμογή των τεχνολογιών Carbon Capture,

Utilization and Storage (CCUS) και τη μαζική παραγωγή Sustainable Aviation Fuels (SAF).

Το πρώτο και σημαντικότερο εμπόδιο σχετίζεται με τη χημική σταθερότητα του μορίου του CO₂. Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί θερμοδυναμικά σταθερό μόριο, γεγονός που καθιστά τη μετατροπή του σε καύσιμα ενεργειακά απαιτητική. Η αναγωγή του απαιτεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας και αποτελεσματικούς καταλύτες, αυξάνοντας τόσο το κόστος όσο και την πολυπλοκότητα των διεργασιών (Okoye-Chine et al., 2024).

Οι καταλυτικές διεργασίες αποτελούν κρίσιμο σημείο περιορισμού. Διεργασίες όπως Reverse Water Gas Shift (RWGS), Fischer-Tropsch και σύνθεση μεθανόλης εξαρτώνται από καταλύτες υψηλής δραστηριότητας, επιλεκτικότητας και ανθεκτικότητας. Ωστόσο, η απενεργοποίηση καταλυτών λόγω συσσώρευσης άνθρακα, δηλητηρίασης επιφανειών ή θερμικής υποβάθμισης εξακολουθεί να περιορίζει τη διάρκεια ζωής τους. Οι Choi et al. (2024) αναφέρουν ότι η ανάπτυξη προηγμένων καταλυτών παραμένει βασική προτεραιότητα για τη βελτίωση της αποδοτικότητας μετατροπής CO₂.

Οι θερμοχημικές διαδρομές εμφανίζουν επίσης περιορισμούς ενεργειακής έντασης. Η ανάγκη υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων αυξάνει τις ενεργειακές απαιτήσεις και επιβαρύνει το οικονομικό ισοζύγιο των μονάδων παραγωγής. Οι Segovia-Hernandez (2025) επισημαίνουν ότι η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν από τους βασικούς λόγους περιορισμένης εμπορικής εφαρμογής των e-fuels.

Στις βιολογικές διαδρομές, τα τεχνολογικά εμπόδια είναι διαφορετικής φύσης. Η χαμηλή παραγωγικότητα μικροοργανισμών, οι περιορισμοί μαζικής μεταφοράς CO₂ και η ευαισθησία βιολογικών συστημάτων στις μεταβολές συνθηκών λειτουργίας επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση. Οι Ahmad και Ashraf (2025) υπογραμμίζουν ότι οι μικροάλλες παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες αλλά απαιτούν περαιτέρω βελτιστοποίηση για βιομηχανική εφαρμογή. Η καθαρότητα των ρευμάτων CO₂ αποτελεί ακόμη μία πρόκληση. Οι βιομηχανικές πηγές εκπομπών περιέχουν συχνά ακαθαρσίες όπως SO_x, NO_x και σωματίδια, οι οποίες μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα καταλυτών ή να επηρεάσουν βιολογικά συστήματα. Αυτό αυξάνει τις απαιτήσεις προεπεξεργασίας και το συνολικό κόστος παραγωγής.

Οι τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ αντιμετωπίζουν επίσης περιορισμούς. Η άμεση δέσμευση από τον αέρα (DAC) απαιτεί υψηλές ενεργειακές εισροές λόγω χαμηλής συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα, ενώ οι βιομηχανικές διεργασίες δέσμευσης συχνά απαιτούν πολύπλοκα συστήματα καθαρισμού (Eyitayo et al., 2024).

Οι πολυσταδιακές διεργασίες παραγωγής αυξάνουν την τεχνική πολυπλοκότητα. Η ενσωμάτωση ηλεκτρόλυσης, δέσμευσης άνθρακα, καταλυτικών αντιδραστήρων και downstream διεργασιών απαιτεί σύνθετο έλεγχο και υψηλή αξιοπιστία συστημάτων. Παρά τις δυσκολίες, η τεχνολογική πρόοδος σε υλικά, καταλύτες, συνθετική βιολογία και ψηφιακή βελτιστοποίηση διεργασιών δημιουργεί σημαντικές προοπτικές. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) αναφέρουν ότι οι υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες αξιοποίησης άνθρακα ενδέχεται να επιταχύνουν τη μετάβαση προς ώριμες βιομηχανικές εφαρμογές.

8.2 Διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας και πράσινου υδρογόνου

Η διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας και πράσινου υδρογόνου αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την επιτυχία των τεχνολογιών αξιοποίησης CO₂ και την ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Τα περισσότερα συνθετικά καύσιμα βασίζονται σε ενεργοβόρες διεργασίες, γεγονός που καθιστά το ενεργειακό τους υπόβαθρο κρίσιμο παράγοντα περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας.

Τεχνολογία	Τεχνολογική Ωριμότητα	Περιβαλλοντικό Όφελος	Κόστος	Δυνατότητα Κλιμάκωσης	Καταλληλότητα για Αεροπορία
HEFA	5	3	4	3	5
ATJ	4	4	3	3	4
MTJ	3	4	3	3	4
FT από βιομάζα	4	4	3	3	5
PtL (RWGS + FT)	4	5	2	3	5
Μικροάλγες	2	5	1	2	3

Κλίμακα: 1 = πολύ χαμηλό, 5 = πολύ υψηλό.

Το πράσινο υδρογόνο παράγεται κυρίως μέσω ηλεκτρόλυσης νερού χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Η παραγωγή αυτή επιτρέπει τη δημιουργία καυσίμων χαμηλού άνθρακα, καθώς αποφεύγονται οι εκπομπές που σχετίζονται με ορυκτές πηγές ενέργειας. Οι Anand et al. (2025)

υποστηρίζουν ότι το πράσινο υδρογόνο αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο για το μελλοντικό ενεργειακό σύστημα μηδενικών εκπομπών.

Η παραγωγή e-fuels απαιτεί εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες υδρογόνου. Στις διεργασίες υδρογόνωσης CO₂, το υδρογόνο λειτουργεί ως βασικός δότης ηλεκτρονίων, επιτρέποντας τη μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα σε σύνθετους υδρογονάνθρακες. Οι Tak et al. (2025) αναφέρουν ότι οι μελλοντικές ανάγκες αεροπορίας ενδέχεται να αυξήσουν δραματικά τη ζήτηση πράσινου υδρογόνου τις επόμενες δεκαετίες.

Ωστόσο, η διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ενέργειας παραμένει άνισα κατανομημένη γεωγραφικά. Περιοχές με υψηλό ηλιακό ή αιολικό δυναμικό εμφανίζουν μεγαλύτερες δυνατότητες παραγωγής υδρογόνου χαμηλού κόστους. Αυτό δημιουργεί νέα γεωγραφικά πρότυπα ενεργειακής παραγωγής και πιθανές μεταβολές στις διεθνείς ενεργειακές αλυσίδες (Roque et al., 2024).

Η μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών αποτελεί ακόμη μία πρόκληση. Η παραγωγή από φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα παρουσιάζει διακυμάνσεις, δημιουργώντας ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας και ευέλικτα ενεργειακά δίκτυα. Οι Tasleem και Alsharaeh (2025) επισημαίνουν ότι η ενεργειακή ευελιξία θα αποτελέσει κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας των μελλοντικών υδρογονο-οικονομιών.

Η ηλεκτρόλυση νερού παραμένει επίσης ενεργοβόρα διαδικασία. Παρά τη βελτίωση τεχνολογιών PEM, αλκαλικής και SOEC ηλεκτρόλυσης, σημαντικές ενεργειακές απώλειες εξακολουθούν να υπάρχουν. Οι Elazab et al. (2024) τονίζουν ότι η αποδοτικότητα ηλεκτρολυτών αποτελεί βασικό πεδίο τεχνολογικής βελτίωσης. Το κόστος ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει άμεσα την τιμή τελικών καυσίμων. Χαμηλότερες τιμές ηλεκτρισμού μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ανταγωνιστικότητα των e-fuels, ενώ υψηλό ενεργειακό κόστος περιορίζει τη βιωσιμότητα παραγωγής.

Επιπλέον, η παραγωγή πράσινου υδρογόνου απαιτεί σημαντικές ποσότητες νερού. Σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους, αυτό μπορεί να δημιουργήσει ανταγωνισμούς μεταξύ ενεργειακών και κοινωνικών αναγκών. Παρά τις προκλήσεις, η συνεχής μείωση κόστους ανανεώσιμων τεχνολογιών δημιουργεί θετικές προοπτικές. Η αυξανόμενη εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ και οι επενδύσεις σε υποδομές υδρογόνου αναμένεται να ενισχύσουν τη διαθεσιμότητα χαμηλού άνθρακα ενέργειας.

8.3 Ζητήματα κλιμάκωσης και βιομηχανικής εφαρμογής

Η μετάβαση από εργαστηριακές και πιλοτικές εφαρμογές παραγωγής βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας σε βιομηχανική κλίμακα αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της ενεργειακής μετάβασης. Παρότι πολλές τεχνολογίες αξιοποίησης CO₂ έχουν αποδείξει τεχνική σκοπιμότητα, η μεγάλης κλίμακας εφαρμογή παραμένει περιορισμένη. Ένα από τα βασικά ζητήματα κλιμάκωσης αφορά τη διαφορά μεταξύ εργαστηριακών και βιομηχανικών συνθηκών. Οι αποδόσεις που επιτυγχάνονται σε μικρή κλίμακα συχνά δεν αναπαράγονται εύκολα σε μεγάλα συστήματα λόγω φαινομένων μεταφοράς μάζας, θερμότητας και αυξημένης πολυπλοκότητας διεργασιών (Segovia-Hernandez, 2025).

Η διαθεσιμότητα πρώτων υλών αποτελεί επίσης σημαντικό περιορισμό. Οι μεγάλες ποσότητες CO₂, νερού και υδρογόνου που απαιτούνται για παραγωγή SAF δημιουργούν σημαντικές απαιτήσεις εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η ανάπτυξη ολοκληρωμένων αλυσίδων αξίας αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για εμπορική ανάπτυξη.

Η ενσωμάτωση πολλαπλών τεχνολογιών αυξάνει την πολυπλοκότητα βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Οι μονάδες παραγωγής e-fuels συνδυάζουν ηλεκτρολύτες, συστήματα δέσμευσης άνθρακα, αντιδραστήρες σύνθεσης και διεργασίες καθαρισμού, δημιουργώντας υψηλές απαιτήσεις λειτουργικού ελέγχου. Οι κεφαλαιουχικές απαιτήσεις αποτελούν ακόμη έναν σημαντικό περιορισμό. Οι Ozkan et al. (2025) αναφέρουν ότι οι επενδύσεις σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις παραμένουν ιδιαίτερα υψηλές, αυξάνοντας τον οικονομικό κίνδυνο επενδυτών.

Στις βιολογικές διεργασίες, η κλιμάκωση παρουσιάζει επιπλέον δυσκολίες. Η παραγωγή μικροαλγών και βιολογικών καυσίμων απαιτεί μεγάλες επιφάνειες, αυξημένη διαχείριση καλλιεργειών και σύνθετες downstream διεργασίες (Lutzu et al., 2024). Οι υποδομές μεταφοράς και διανομής αποτελούν επίσης σημαντικό ζήτημα. Η σύνδεση περιοχών παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας με βιομηχανικά κέντρα ή αεροδρόμια απαιτεί νέα δίκτυα και εγκαταστάσεις.

Τα κανονιστικά πλαίσια και οι διαδικασίες πιστοποίησης επηρεάζουν επιπλέον την ταχύτητα υιοθέτησης. Οι αυστηρές απαιτήσεις ασφάλειας αεροπορίας αυξάνουν τον χρόνο εμπορικής εισόδου νέων τεχνολογιών. Παρά τις δυσκολίες, η αυξανόμενη ζήτηση SAF, οι πολιτικές στήριξης και οι διεθνείς επενδύσεις δημιουργούν θετικές

προοπτικές. Η σταδιακή ανάπτυξη βιομηχανικών clusters χαμηλού άνθρακα ενδέχεται να επιταχύνει σημαντικά την εμπορική ωρίμανση.

8.4 Πολιτικές ενίσχυσης και επενδυτικά κίνητρα

Η μετάβαση της αεροπορίας προς βιώσιμα καύσιμα και τεχνολογίες χαμηλού άνθρακα δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογική πρόοδο αλλά και από την ύπαρξη κατάλληλων πολιτικών πλαισίων και οικονομικών κινήτρων. Η παραγωγή Sustainable Aviation Fuels (SAF), ιδιαίτερα των e-fuels που βασίζονται στην αξιοποίηση CO₂, παραμένει σημαντικά ακριβότερη από τα συμβατικά καύσιμα αεροπορίας. Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη αποτελεσματικών μηχανισμών υποστήριξης θεωρείται απαραίτητη για την επιτάχυνση της αγοράς και την επίτευξη στόχων απανθρακοποίησης.

Οι κυβερνητικές πολιτικές επηρεάζουν άμεσα τόσο τη ζήτηση όσο και την προσφορά βιώσιμων καυσίμων. Στην πλευρά της ζήτησης, τα υποχρεωτικά ποσοστά ανάμιξης SAF αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους μηχανισμούς δημιουργίας αγοράς. Η εφαρμογή ποσοτικών στόχων υποχρεώνει αεροπορικές εταιρείες και προμηθευτές καυσίμων να αυξήσουν σταδιακά τη χρήση βιώσιμων καυσίμων, δημιουργώντας προβλεψιμότητα για επενδύσεις. Οι Raman et al. (2024) υπογραμμίζουν ότι οι σαφείς πολιτικές δεσμεύσεις αποτελούν βασικό παράγοντα επιτάχυνσης της τεχνολογικής ωρίμανσης.

Η τιμολόγηση άνθρακα (carbon pricing) αποτελεί επίσης σημαντικό εργαλείο πολιτικής. Μέσω φόρων άνθρακα ή συστημάτων εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών, αυξάνεται το κόστος χρήσης ορυκτών καυσίμων και βελτιώνεται η ανταγωνιστικότητα των SAF. Οι Song et al. (2025) επισημαίνουν ότι οι μηχανισμοί τιμολόγησης άνθρακα αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην οικονομική βιωσιμότητα των εναλλακτικών καυσίμων.

Οι επιδοτήσεις κεφαλαίου και τα επενδυτικά προγράμματα αποτελούν απαραίτητο στοιχείο για τεχνολογίες υψηλού επενδυτικού κόστους. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής e-fuels απαιτούν μεγάλες κεφαλαιουχικές δαπάνες λόγω ηλεκτρολυτών, συστημάτων δέσμευσης CO₂ και καταλυτικών μονάδων. Οι Ozkan et al. (2025) αναφέρουν ότι οι πρώτες εμπορικές μονάδες δύσκολα μπορούν να αναπτυχθούν χωρίς δημόσια οικονομική στήριξη.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν τα συμβόλαια διαφορών (Contracts for Difference – CfD), τα οποία μειώνουν την αβεβαιότητα επενδυτών παρέχοντας εγγυημένες τιμές πώλησης. Αυτοί οι μηχανισμοί χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για τεχνολογίες καθαρής ενέργειας και μπορούν να περιορίσουν τον επενδυτικό κίνδυνο.

Η δημόσια χρηματοδότηση έρευνας και ανάπτυξης παραμένει καθοριστική. Νέοι καταλύτες, αποδοτικότερες διεργασίες δέσμευσης άνθρακα και βελτιωμένες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης απαιτούν συνεχή επενδυτική στήριξη. Οι Segovia-Hernandez (2025) επισημαίνουν ότι η καινοτομία αποτελεί προϋπόθεση για τη μείωση κόστους.

Η ανάπτυξη υποδομών απαιτεί επίσης συντονισμένες πολιτικές. Δίκτυα μεταφοράς CO₂, εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδρογόνου και βιομηχανικά clusters χαμηλού άνθρακα χρειάζονται συνδυασμό δημόσιων και ιδιωτικών επενδύσεων. Ωστόσο, υπάρχουν και προκλήσεις πολιτικής εφαρμογής. Η αβεβαιότητα κανονισμών, οι μεταβολές κυβερνητικών προτεραιοτήτων και οι διαφορετικές εθνικές στρατηγικές μπορούν να επιβραδύνουν επενδύσεις.

8.5 Προοπτικές για μηδενικές εκπομπές στην αεροπορία

Η επίτευξη μηδενικών καθαρών εκπομπών στην αεροπορία αποτελεί έναν από τους πλέον φιλόδοξους στόχους της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης. Ο αεροπορικός τομέας χαρακτηρίζεται από υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, περιορισμένες δυνατότητες άμεσης ηλεκτροκίνησης και αυξανόμενη ζήτηση μεταφορών, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την πλήρη απανθρακοποίηση.

Οι διεθνείς στρατηγικές συγκλίνουν στην άποψη ότι η επίτευξη net-zero δεν μπορεί να βασιστεί σε μία μόνο τεχνολογία. Αντίθετα, απαιτείται συνδυασμός βιώσιμων καυσίμων, επιχειρησιακών βελτιώσεων, νέων κινητήριων συστημάτων και τεχνολογιών αντιστάθμισης άνθρακα. Οι Delbecq et al. (2025) επισημαίνουν ότι η πολυπαραγοντική προσέγγιση αποτελεί τη μοναδική ρεαλιστική διαδρομή για βαθιά απανθρακοποίηση.

Τα SAF αναμένεται να αποτελέσουν τον βασικό πυλώνα της μετάβασης. Οι Song et al. (2025) αναφέρουν ότι τα βιώσιμα καύσιμα μπορούν να καλύψουν μεγάλο μέρος των μελλοντικών αναγκών, ιδιαίτερα σε πτήσεις μεγάλων αποστάσεων όπου οι εναλλακτικές λύσεις είναι περιορισμένες. Η παγκόσμια ζήτηση βιώσιμων αεροπορικών

καυσίμων προβλέπεται να αυξηθεί δραστικά τις επόμενες δεκαετίες. Εκτιμήσεις υποδεικνύουν ότι η απαιτούμενη παραγωγή SAF μπορεί να υπερβεί τα 400–500 εκατομμύρια τόνους ετησίως μέχρι το 2050, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι net-zero στην αεροπορία (Delbecq et al., 2025).

Τα e-fuels εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητας σχεδόν κυκλικού κύκλου άνθρακα. Η χρήση δεσμευμένου CO₂ και πράσινου υδρογόνου επιτρέπει την παραγωγή καυσίμων με πολύ χαμηλές καθαρές εκπομπές. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η αξιοποίηση CO₂ θα αποτελέσει βασικό στοιχείο των μελλοντικών στρατηγικών net-zero. Παράλληλα, η ανάπτυξη αεροσκαφών υδρογόνου και ηλεκτρικής πρόωσης μπορεί να επηρεάσει συγκεκριμένα τμήματα αγοράς. Οι Wei et al. (2025) αναφέρουν ότι οι τεχνολογίες αυτές πιθανότατα θα εφαρμοστούν αρχικά σε μικρές και μεσαίες αποστάσεις.

Η βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας παραμένει επίσης κρίσιμη. Αεροδυναμικές βελτιώσεις, ελαφρύτερα υλικά και καλύτερη διαχείριση πτήσεων μπορούν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο, η επίτευξη μηδενικών εκπομπών αντιμετωπίζει περιορισμούς. Η παραγωγική ικανότητα SAF παραμένει χαμηλή, το κόστος υψηλό και οι ανάγκες ανανεώσιμης ενέργειας τεράστιες. Οι Liu et al. (2025) τονίζουν ότι η επιτυχία εξαρτάται από συστημικό μετασχηματισμό ολόκληρου του ενεργειακού συστήματος.

Οι μη-CO₂ επιπτώσεις της αεροπορίας αποτελούν πρόσθετη πρόκληση. Εκπομπές NO_x, contrails και σωματίδια συνεχίζουν να συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή ακόμη και όταν μειώνονται οι εκπομπές άνθρακα. Παρά τις δυσκολίες, οι μακροπρόθεσμες προοπτικές παραμένουν θετικές. Η τεχνολογική πρόοδος, οι διεθνείς πολιτικές και οι επενδύσεις χαμηλού άνθρακα δημιουργούν τις προϋποθέσεις για σταδιακή μετάβαση.

8.6 Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις

Η ταχεία εξέλιξη των τεχνολογιών αξιοποίησης CO₂ δημιουργεί σημαντικές ευκαιρίες για νέα ερευνητικά πεδία, τα οποία αναμένεται να διαμορφώσουν το μέλλον των βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας. Παρά τη σημαντική πρόοδο, εξακολουθούν να υπάρχουν τεχνολογικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κενά γνώσης που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση.

Ένας από τους βασικότερους άξονες έρευνας αφορά την ανάπτυξη προηγμένων καταλυτικών συστημάτων. Η βελτίωση επιλεκτικότητας, δραστηρότητας και διάρκειας ζωής καταλυτών μπορεί να μειώσει ενεργειακές απαιτήσεις και κόστος παραγωγής. Οι Oloore et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα ελαττωματικά μεταλλικά οξείδια και οι νέες νανοδομές εμφανίζουν σημαντικές προοπτικές.

Οι τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ αποτελούν επίσης πεδίο έντονης ερευνητικής δραστηριότητας. Η ανάπτυξη νέων προσροφητικών υλικών, μεμβρανών και υβριδικών τεχνολογιών μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα DAC και βιομηχανικής δέσμευσης. Οι Eyitayo et al. (2024) υπογραμμίζουν ότι η μείωση ενεργειακών απαιτήσεων αποτελεί βασική ερευνητική προτεραιότητα. Στον τομέα του υδρογόνου, η έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση ηλεκτρολυτών και στη μείωση εξάρτησης από κρίσιμες πρώτες ύλες. Οι Anand et al. (2025) αναφέρουν ότι η επόμενη γενιά ηλεκτρολυτών μπορεί να επιτύχει σημαντικές βελτιώσεις αποδοτικότητας.

Η συνθετική βιολογία και η μεταβολική μηχανική αναμένεται να διαδραματίσουν ολοένα σημαντικότερο ρόλο. Οι Panich et al. (2025) δείχνουν ότι γενετικά τροποποιημένοι μικροοργανισμοί μπορούν να βελτιώσουν τη μετατροπή CO₂ σε υγρά καύσιμα. Επιπλέον, απαιτείται μεγαλύτερη έρευνα σε ολοκληρωμένα συστήματα. Η διασύνδεση παραγωγής υδρογόνου, CCUS, ανανεώσιμης ενέργειας και βιομηχανικών διεργασιών απαιτεί συστημικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης.

Η ανάλυση κύκλου ζωής και οι τεχνοοικονομικές αξιολογήσεις θα συνεχίσουν να αποτελούν σημαντικό ερευνητικό πεδίο. Οι διαφορετικές παραδοχές μεταξύ μελετών δυσκολεύουν τη σύγκριση τεχνολογιών και απαιτούν τυποποίηση μεθοδολογιών. Τέλος, αυξανόμενο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υβριδικές διαδρομές παραγωγής που συνδυάζουν βιολογικές και θερμοχημικές διεργασίες. Αυτές οι προσεγγίσεις ενδέχεται να επιτρέψουν καλύτερη αξιοποίηση άνθρακα και υψηλότερες συνολικές αποδόσεις.

Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη εξέτασε διεξοδικά τους πιθανούς δρόμους αξιοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) για τη σύνθεση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας (Sustainable Aviation Fuels – SAF), εστιάζοντας στις τεχνολογικές, περιβαλλοντικές, ενεργειακές και οικονομικές διαστάσεις της μετάβασης προς αερομεταφορές χαμηλού άνθρακα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η αξιοποίηση CO₂ μπορεί να

αποτελέσει κρίσιμο εργαλείο απανθρακοποίησης του αεροπορικού τομέα, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πράσινο υδρογόνο.

Ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα της μελέτης είναι ότι τα συμβατικά αεροπορικά καύσιμα εξακολουθούν να αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Η συνεχής αύξηση της αεροπορικής δραστηριότητας δημιουργεί πιέσεις για ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων με χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα. Οι Song et al. (2025) αναφέρουν ότι χωρίς ευρεία υιοθέτηση SAF, η επίτευξη κλιματικών στόχων στην αεροπορία θα είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Η μελέτη ανέδειξε ότι οι τεχνολογίες αξιοποίησης CO₂ μπορούν να ταξινομηθούν σε θερμοχημικές, ηλεκτροχημικές και βιολογικές διαδρομές. Οι θερμοχημικές διεργασίες, όπως Reverse Water Gas Shift (RWGS) και Fischer–Tropsch, εμφανίζουν υψηλή τεχνολογική ωριμότητα και δυνατότητα παραγωγής drop-in fuels συμβατών με υπάρχοντες κινητήρες αεροσκαφών (Panzone et al., 2020).

Οι βιολογικές διαδρομές, ιδιαίτερα η χρήση μικροαλγών και μεταβολικά τροποποιημένων μικροοργανισμών, παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες άμεσης βιολογικής δέσμευσης άνθρακα. Οι Ahmad και Ashraf (2025) υποστηρίζουν ότι οι μικροάλγες μπορούν να συνδυάσουν παραγωγή καυσίμων με περιβαλλοντικά οφέλη, αν και απαιτούνται περαιτέρω τεχνολογικές βελτιώσεις.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον ρόλο του πράσινου υδρογόνου. Η μελέτη έδειξε ότι η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης με ανανεώσιμη ενέργεια αποτελεί βασική προϋπόθεση για χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα των e-fuels. Οι Anand et al. (2025) και Tak et al. (2025) επισημαίνουν ότι το υδρογόνο θα αποτελέσει βασικό ενεργειακό φορέα της μελλοντικής αεροπορίας. Ένα ακόμη σημαντικό εύρημα αφορά την ανάγκη ολοκληρωμένης ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA). Η πραγματική περιβαλλοντική απόδοση των SAF εξαρτάται έντονα από την προέλευση ηλεκτρικής ενέργειας, CO₂ και πρώτων υλών. Οι Savva et al. (2025) υπογραμμίζουν ότι μόνο πλήρως ανανεώσιμα ενεργειακά συστήματα μπορούν να επιτύχουν ουσιαστική μείωση εκπομπών.

Η μελέτη κατέδειξε επίσης ότι τα οικονομικά και τεχνολογικά εμπόδια παραμένουν σημαντικά. Το υψηλό κόστος πράσινου υδρογόνου, οι ενεργειακές απαιτήσεις δέσμευσης CO₂ και οι ανάγκες υποδομών περιορίζουν προς το παρόν τη μαζική διείσδυση των SAF. Παρά τις προκλήσεις, τα συνολικά αποτελέσματα δείχνουν

ότι οι τεχνολογίες αξιοποίησης CO₂ διαθέτουν σημαντικό δυναμικό συμβολής στην κλιματική ουδετερότητα της αεροπορίας, ιδιαίτερα εφόσον συνδυαστούν με κατάλληλες πολιτικές, επενδύσεις και διεθνή συνεργασία.

Η αξιολόγηση των πιθανών δρόμων αξιοποίησης του CO₂ για παραγωγή βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας δείχνει ότι δεν υπάρχει μία μοναδική τεχνολογική λύση ικανή να καλύψει πλήρως τις ανάγκες του αεροπορικού τομέα. Αντίθετα, η μελλοντική μετάβαση αναμένεται να βασιστεί σε συνδυασμό διαφορετικών τεχνολογιών και παραγωγικών διαδρομών.

Οι θερμοχημικές διαδρομές αξιοποίησης CO₂ εμφανίζουν σήμερα τη μεγαλύτερη τεχνολογική ωριμότητα. Η σύνθεση Fischer–Tropsch, σε συνδυασμό με την αντίδραση RWGS, επιτρέπει την παραγωγή συνθετικών υδρογονανθράκων υψηλής ποιότητας και συμβατότητας με υπάρχουσες αεροπορικές υποδομές. Οι Ramos-Fernandez et al. (2025) υποστηρίζουν ότι οι συγκεκριμένες τεχνολογίες αποτελούν από τις πλέον υποσχόμενες επιλογές για μεγάλης κλίμακας παραγωγή e-SAF.

Τα e-fuels εμφανίζουν ιδιαίτερα σημαντικά πλεονεκτήματα λόγω της δυνατότητας δημιουργίας σχεδόν κλειστού κύκλου άνθρακα. Η χρήση δεσμευμένου CO₂ και πράσινου υδρογόνου επιτρέπει σημαντική μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, οι υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και το αυξημένο κόστος παραγωγής παραμένουν βασικοί περιορισμοί (Schemme et al., 2017).

Οι βιολογικές διαδρομές παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι μικροάλγες και οι γενετικά τροποποιημένοι μικροοργανισμοί μπορούν να μετατρέψουν βιολογικά το CO₂ σε λιπίδια, αλκοόλες και υδρογονάνθρακες. Οι Panich et al. (2025) επισημαίνουν ότι η μεταβολική μηχανική μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις αποδόσεις βιοκαυσίμων τα επόμενα χρόνια. Παρόλα αυτά, οι βιολογικές διεργασίες εμφανίζουν περιορισμούς κλιμάκωσης, χαμηλότερες ταχύτητες παραγωγής και υψηλές απαιτήσεις downstream processing. Οι Lutz et al. (2024) αναφέρουν ότι η ενεργειακή κατανάλωση καθαρισμού και επεξεργασίας παραμένει σημαντική πρόκληση.

Η παραγωγή μεθανόλης χαμηλού άνθρακα και οι τεχνολογίες Methanol-to-Jet (MTJ) παρουσιάζουν επίσης σημαντικές προοπτικές. Η μεθανόλη μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεσο ενεργειακό προϊόν, επιτρέποντας ευελιξία στη μεταφορά

και αποθήκευση άνθρακα. Οι Savva et al. (2025) τονίζουν ότι η χαμηλού άνθρακα μεθανόλη αποκτά αυξανόμενη στρατηγική σημασία στις μεταφορές.

Από τεchnοοικονομική άποψη, οι διαδρομές που βασίζονται σε βιομηχανικό ή βιογενές CO₂ εμφανίζουν βραχυπρόθεσμα πλεονεκτήματα λόγω χαμηλότερου κόστους δέσμευσης. Αντίθετα, η άμεση δέσμευση από την ατμόσφαιρα (DAC) θεωρείται πιο μακροπρόθεσμη λύση λόγω υψηλού ενεργειακού κόστους. Η αξιολόγηση έδειξε επίσης ότι η επιτυχία οποιασδήποτε τεχνολογίας εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και πράσινου υδρογόνου. Χωρίς πλήρως ανανεώσιμο ενεργειακό υπόβαθρο, τα περιβαλλοντικά οφέλη μειώνονται σημαντικά.

Η επιτυχής μετάβαση προς βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας και αξιοποίηση CO₂ απαιτεί συντονισμένες ενέργειες τόσο από τον αεροπορικό τομέα όσο και από τη βιομηχανία ενέργειας. Η παρούσα μελέτη αναδεικνύει την ανάγκη υιοθέτησης ολοκληρωμένων στρατηγικών που θα συνδυάζουν τεχνολογική καινοτομία, επενδύσεις και πολιτική υποστήριξη.

Πρώτον, απαιτείται σημαντική ενίσχυση επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πράσινο υδρογόνο. Η παραγωγή e-fuels εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα χαμηλού άνθρακα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Tak et al. (2025) υποστηρίζουν ότι η ανάπτυξη μεγάλων ενεργειακών υποδομών ΑΠΕ αποτελεί προϋπόθεση για την απανθρακοποίηση αερομεταφορών.

Ο αεροπορικός τομέας θα πρέπει να ενισχύσει τη συνεργασία με εταιρείες ενέργειας, χημικής βιομηχανίας και τεχνολογικών παρόχων. Η δημιουργία βιομηχανικών clusters μπορεί να μειώσει κόστος μεταφοράς CO₂ και να βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα ολοκληρωμένων συστημάτων παραγωγής. Ιδιαίτερη σημασία έχει η στήριξη έρευνας και ανάπτυξης. Οι νέοι καταλύτες, οι βελτιωμένες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης και οι εξελιγμένες βιολογικές διεργασίες μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος παραγωγής SAF. Οι Choi et al. (2024) αναφέρουν ότι η ανάπτυξη προηγμένων καταλυτών αποτελεί κρίσιμο πεδίο τεχνολογικής εξέλιξης.

Απαιτείται επίσης δημιουργία σταθερού κανονιστικού πλαισίου. Υποχρεωτικά ποσοστά χρήσης SAF, μηχανισμοί carbon pricing και φορολογικά κίνητρα μπορούν να βελτιώσουν την ανταγωνιστικότητα των βιώσιμων καυσίμων. Οι Raman et al. (2024) επισημαίνουν ότι οι μακροπρόθεσμες πολιτικές δεσμεύσεις αυξάνουν την εμπιστοσύνη επενδυτών.

Οι αεροπορικές εταιρείες θα πρέπει να επενδύσουν σε στρατηγικές ενεργειακής αποδοτικότητας, βελτιωμένο σχεδιασμό πτήσεων και σταδιακή ενσωμάτωση SAF στους στόλους τους. Απαιτείται διεθνής συνεργασία για τυποποίηση πιστοποιήσεων, ανάπτυξη κοινών αγορών SAF και ανταλλαγή τεχνογνωσίας. Η επιτυχία της μετάβασης εξαρτάται από τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος συνεργασίας μεταξύ αεροπορίας, βιομηχανίας ενέργειας, κρατών και ερευνητικών οργανισμών.

Τα βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας αποτελούν σήμερα μία από τις πιο ρεαλιστικές και τεχνολογικά εφαρμόσιμες λύσεις για τη μείωση των εκπομπών του αεροπορικού τομέα. Η παρούσα μελέτη έδειξε ότι η αξιοποίηση CO₂ για παραγωγή SAF μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, ιδιαίτερα στις πτήσεις μεγάλων αποστάσεων όπου οι εναλλακτικές τεχνολογίες παραμένουν περιορισμένες.

Τα e-fuels και τα προηγμένα βιοκαύσιμα προσφέρουν τη δυνατότητα σημαντικής μείωσης εκπομπών κύκλου ζωής, ενώ παράλληλα διατηρούν συμβατότητα με υπάρχουσες αεροπορικές υποδομές. Οι Undavalli et al. (2024) αναφέρουν ότι η δυνατότητα χρήσης drop-in fuels αποτελεί καθοριστικό πλεονέκτημα για γρήγορη ενσωμάτωση στην αγορά.

Οι διαδρομές αξιοποίησης CO₂ εμφανίζουν μεγαλύτερο δυναμικό μακροπρόθεσμης απανθρακοποίησης σε σύγκριση με συμβατικές βιογενείς διαδρομές SAF, αλλά η επιτυχία τους εξαρτάται από τη μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής χαμηλού άνθρακα και την ανάπτυξη υποδομών υδρογόνου.

Η αξιοποίηση CO₂ ενισχύει τη μετάβαση προς κυκλική οικονομία άνθρακα. Αντί το διοξείδιο του άνθρακα να αντιμετωπίζεται αποκλειστικά ως απόβλητο, μετατρέπεται σε πρώτη ύλη υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η πλήρης κλιματική ουδετερότητα απαιτεί ολοκληρωμένη προσέγγιση. Οι Delbecq et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα SAF πρέπει να συνδυαστούν με ενεργειακή αποδοτικότητα, τεχνολογικές βελτιώσεις αεροσκαφών και πολιτικές περιορισμού εκπομπών.

Η παρούσα μελέτη κατέδειξε ότι οι τεχνολογίες αξιοποίησης CO₂ μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στην απανθρακοποίηση των αερομεταφορών, ωστόσο βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητας. Η πλέον ώριμη εμπορικά τεχνολογία SAF παραμένει η HEFA, αν και δεν βασίζεται άμεσα στην αξιοποίηση CO₂. Μεταξύ των διαδρομών που αξιοποιούν διοξείδιο του άνθρακα, η

προσέγγιση Power-to-Liquid μέσω συνδυασμού RWGS και Fischer–Tropsch εμφανίζει σήμερα το υψηλότερο επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας και τη μεγαλύτερη δυνατότητα βιομηχανικής εφαρμογής.

Από περιβαλλοντική άποψη, τα e-fuels που παράγονται από CO₂ δεσμευμένο μέσω Direct Air Capture και πράσινο υδρογόνο παρουσιάζουν το μεγαλύτερο δυναμικό μείωσης εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Ωστόσο, η συγκεκριμένη διαδρομή συνοδεύεται από υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και σημαντικό κόστος παραγωγής, γεγονός που αποτελεί το βασικότερο εμπόδιο για τη μαζική διείσδυσή της στην αγορά.

Οι βιολογικές διαδρομές, όπως η αξιοποίηση μικροαλγών και η μεταβολική μηχανική μικροοργανισμών, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τη δέσμευση άνθρακα και τη βιωσιμότητα των πρώτων υλών, αλλά εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν προκλήσεις κλιμάκωσης και οικονομικής ανταγωνιστικότητας. Παράλληλα, τεχνολογίες όπως οι MTJ και ATJ παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες δυνατότητες συμπλήρωσης του μελλοντικού χαρτοφυλακίου SAF.

Τέλος, αναδείχθηκε ότι ο ρόλος του πράσινου υδρογόνου είναι καθοριστικός για όλες σχεδόν τις διαδρομές παραγωγής συνθετικών καυσίμων αεροπορίας. Η μελλοντική διαθεσιμότητα ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και η μείωση του κόστους παραγωγής πράσινου υδρογόνου αναμένεται να καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό ανάπτυξης των τεχνολογιών e-SAF κατά τις επόμενες δεκαετίες.

Βιβλιογραφία

- Ahmad, A., & Ashraf, S. S. (2025). Harnessing microalgae: Innovations for achieving UN Sustainable Development Goals and climate resilience. *Science of the Total Environment*, 962, 178225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178225>
- Ajuka, L. O., Kazeem, R. A., Kuti, O. A., Jen, T. C., Afolalu, A. S., & Akinlabi, E. T. (2024). Decarbonized automotive fuel: Liquefied petroleum gas biosynthesis, benefits and drawbacks. *Results in Engineering*, 21, 101889. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101889>
- Amhamed, A. I., Al Assaf, A. H., Le Page, L. M., & Alrebei, O. F. (2025). Alternative sustainable aviation fuel and energy (SAFE): A review with selected simulation cases of study. *Energy Reports*, 13, 4601–4613. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.03.045>
- Anand, C., Chandrara, B., Nithiya, P., Akshaya, M., Tamizhdurai, P., Shoba, G., Subramani, A., Kumaran, R., Yadav, K. K., Gacem, A., Bhutto, J. K., Alreshidi, M. A., & Alam, M. W. (2025). Green hydrogen for a sustainable future: A review of production methods, innovations, and applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 407–434. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.193>
- ASTM International. (2024). *ASTM D7566 standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons*. ASTM International.
- Atofarati, E. O., & Enweremadu, C. C. (2025). A review of sustainable biofuel catalysts and additive technologies using nanoparticles. *Cleaner Engineering and Technology*, 23, 100908. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100908>
- Benajes, J., García, A., Monsalve-Serrano, J., & Guzmán-Mendoza, M. (2024). A review on low carbon fuels for road vehicles: The good, the bad and the energy potential for the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114141>
- Blay-Roger, R., Nawaz, M. A., Baena-Moreno, F. M., Bobadilla, L. F., Reina, T. R., & Odriozola, J. A. (2024). Tandem catalytic approaches for CO₂ enriched Fischer–Tropsch synthesis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 103, 101159. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101159>

- Bwapwa, J. K., Anandraj, A., & Trois, C. (2010). Possibilities for conversion of microalgae oil into aviation fuel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(5), 1345–1354. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.012>
- Choi, Y., Sim, G. D., Jung, U., Park, Y., Youn, M. H., Chun, D. H., Rhim, G. B., Kim, K. Y., & Koo, K. Y. (2024). Copper catalysts for CO₂ hydrogenation to CO through reverse water–gas shift reaction for e-fuel production: Fundamentals, recent advances, and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 492, 152174. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152174>
- Dahal, K., Brynolf, S., Grahn, M., & Skov, I. R. (2021). Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111564. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111564>
- Delbecq, S., Fontane, J., Gourdain, N., Planès, T., & Simatos, F. (2025). Sustainable aviation in the context of the Paris Agreement: A review of prospective scenarios and their technological mitigation levers. *Progress in Aerospace Sciences*, 152, 101068. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2025.101068>
- Elazab, M. A., Elgohr, A. T., Bassyouni, M., Kabeel, A. E., Attia, M. E. H., Elshaarawy, M. K., Hamed, A. K., & Alzahrani, H. A. H. (2024). Green hydrogen: Unleashing the potential for sustainable energy generation. *Journal of Ecological Engineering*, 25(8), 184–213. <https://doi.org/10.12911/22998993/189218>
- European Commission. (2023). *ReFuelEU Aviation initiative and Regulation (EU) 2023/2405*. European Commission.
- European Union Aviation Safety Agency. (2024). *European aviation environmental report 2024*. EASA.
- Eyitayo, S. I., Okere, C. J., Hussain, A., Gamadi, T., & Watson, M. C. (2024). Synergistic sustainability: Future potential of integrating produced water and CO₂ for enhanced carbon capture, utilization, and storage (CCUS). *Journal of Environmental Management*, 351, 119713. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119713>

- Federal Aviation Administration. (2023). Progress and review of rotating wing aircraft and structural dynamics in the context of the United States Aviation Climate Action Plan. *Progress in Aerospace Sciences*, 139, 100887. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100887>
- Guzman, A. F., Gonzalez, J. N., & Alwosheel, A. (2025). Energy efficiency trends in Saudi Arabian commercial aviation before and after COVID-19. *Journal of Air Transport Management*, 123, 102753. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102753>
- Ha, K., Ryu, S., & Trinh, C. T. (2025). Alpha-ketoacid decarboxylases: Diversity, structures, reaction mechanisms, and applications for biomanufacturing of platform chemicals and fuels. *Biotechnology Advances*, 79, 108493. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108493>
- Hafis, M., Balaji, K., Tamilarasan, N., Senthilkumar, D., & Sakthivel, R. (2025). A review on alternative fuels: Spray characteristics, engine performance and emissions effect. *Energy Conversion and Management: X*, 25, 100790. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100790>
- International Air Transport Association. (2024). *Net zero roadmaps for sustainable aviation fuels*. IATA.
- International Civil Aviation Organization. (2023). *ICAO environmental report 2022*. ICAO.
- International Energy Agency. (2024). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA.
- Jayakumar, M., Gebeyehu, K. B., Abo, L. D., Tadesse, A. W., Vivekanandan, B., Sundramurthy, V. P., Bacha, W., Ashokkumar, V., & Baskar, G. (2025). A comprehensive outlook on topical processing methods for biofuel production and its thermal applications: Current advances, sustainability and challenges. *Fuel*, 381, 133446. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133446>
- Kim, J. H., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2025). Advanced processing and multi-functional screening utilizing industrial and engineering chemical applications. *Journal of*

- Industrial and Engineering Chemistry*, 142, 112–124.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.01.045>
- Lei, J., Niu, J., Tian, G., Xin, G., Yang, X., & Shi, C. (2025). Advances in hydrogen as a zero-carbon fuel for rotary engines: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 68, 552–566. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.365>
- Liu, Z., Zhang, M., Bauer, C., & McKenna, R. (2025). The role of low carbon fuels towards net-zero in integrated assessment models and energy system models: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215, 115608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115608>
- Lutzu, G. A., Usai, L., Ciurli, B., Chiellini, C., Di Caprio, F., Pagnanelli, F., Parsaeimehr, A., Malina, I., Malins, K., Cosenza, B., Fabbricino, M., Cesaro, A., Policastro, G., Cao, G., & Concas, A. (2024). Bio-jet fuels from photosynthetic microorganisms: A focus on downstream processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 203, 114731. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114731>
- Okoye-Chine, C. G., Otun, K., Shiba, N., Rashama, C., Ugwu, S. N., Onyeaka, H., & Onyeaka, C. T. (2024). Conversion of carbon dioxide into fuels—A review. *Results in Engineering*, 24, 103014. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103014>
- Oloore, L. E., Adeoye, A. E., Qasem, N. A. A., Alotaibi, M., Alansi, A. M., & Qahtan, T. F. (2025). Defective metal oxides for carbon dioxide reduction to low-carbon fuels. *Journal of CO₂ Utilization*, 92, 102920. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102920>
- Ozkan, M., Narappa, A. B., Namboodiri, T., Chai, Y., Babu, M., Jennings, J. S. E., Gao, Y., Tasneem, S., Lam, J., Talluri, K. R., Shang, R., Ozkan, C. S., & Watkins, J. M. (2025). Forging a sustainable sky: Unveiling the pillars of aviation e-fuel production for carbon emission circularity. *iScience*, 28(4), 112316. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112316>
- Panich, J., Fong, B., & Singer, S. W. (2025). Metabolic engineering of *Cupriavidus necator* H16 for sustainable biofuels from CO₂. *Trends in Biotechnology*, 43(1), 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.06.009>

- Panzone, C., Philippe, R., Chappaz, A., Fongarland, P., & Bengaouer, A. (2020). Power-to-liquid catalytic CO₂ valorization into fuels and chemicals: Focus on the Fischer–Tropsch route. *Journal of CO₂ Utilization*, 38, 314–347. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.02.009>
- Parhamfar, M. (2024). Towards green airports: Factors influencing greenhouse gas emissions and sustainability through renewable energy. *Next Research*, 1(2), 100060. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2024.100060>
- Pio, D. T., Vilas-Boas, A. C. M., Araújo, V. D., Rodrigues, N. F. C., & Mendes, A. (2025). Decarbonizing the aviation sector with electro sustainable aviation fuel (eSAF) from biogenic CO₂ captured at pulp mills. *Journal of CO₂ Utilization*, 92, 102927. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.102927>
- Raji, A. M., Manescau, B., Chetehouna, K., Ango, S. E., & Ogabi, R. (2025). Performance and spray characteristics of fossil Jet A-1 and biojet fuel: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114970. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114970>
- Raman, R., Gunasekar, S., David, L. D., Rahmat, A. F., & Nedungadi, P. (2024). Aligning sustainable aviation fuel research with sustainable development goals: Trends and thematic analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 133, 104278. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104278>
- Ramos-Fernandez, E. V., Santos, J. L., Alsaadi, D. K., Bavykina, A., Gallo, J. M. R., & Gascon, J. (2025). Potential pathways for CO₂ utilization in sustainable aviation fuel synthesis. *Chemical Science*, 16(2), 530–551. <https://doi.org/10.1039/D4SC06164K>
- Roque, B. A. C., Cavalcanti, M. H. C., Brasileiro, P. P. F., Gama, P. H. R. P., dos Santos, V. A., Converti, A., Benachour, M., & Sarubbo, L. A. (2024). Hydrogen-powered future: Catalyzing energy transition, industry decarbonization and sustainable economic development: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 21, 100812. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100812>
- Savva, C., Michailidou, A. V., Tournaviti, M., Vlachokostas, C., & Makris, D.-O. (2025). Closing the loop between life cycle assessment and low-carbon

- methanol: A critical review for a sustainable energy alternative. *Fuel*, 390, 134633. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134633>
- Schemme, S., Samsun, R. C., Peters, R., & Stolten, D. (2017). Power-to-fuel as a key to sustainable transport systems: An analysis of diesel fuels produced from CO₂ and renewable electricity. *Fuel*, 205, 198–221. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.061>
- Segovia-Hernandez, J. G. (2025). Advancing e-fuels production through process intensification: Overcoming challenges and seizing opportunities for a sustainable energy future—A critical review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 207, 109995. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109995>
- Selimi, J., Langschwager, F., Tunå, P., Hulteberg, C. P., & Abdelaziz, O. Y. (2024). Purification of lipid oil using ion exchange resins. *Green Carbon*, 2(1), 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.greenca.2024.01.003>
- Song, G., An, H., Hou, Y., Tong, H., Liu, J., Tang, X., & Yi, H. (2025). Review of the historical trends and decarbonization pathways of the civil aviation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 222, 115927. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115927>
- Tak, Y. C., Paw, J. K. S., Kadirgama, K., Yusaf, T., Ramasamy, D., Sudhakar, K., Sandhya, M., Awad, O. I., Zhou, B., Pasupuleti, J., Samylingam, L., & Rajamony, R. K. (2025). Decarbonizing the future for the transportation and aviation industries: Green hydrogen as the sustainable fuel solution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 91, 718–734. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.062>
- Tasleem, S., & Alsharaeh, E. H. (2025). Role of green, yellow, blue, white and gold hydrogen in fuelling the path to net zero and sustainable future: A review. *Energy Conversion and Management*, 326, 119500. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119500>
- Undavalli, V., Olatunde, O. B. G., Boylu, R., Wei, C., Haeker, J., Hamilton, J., & Khandelwal, B. (2024). Recent advancements in sustainable aviation fuels.

Progress in Aerospace Sciences, 149, 101037.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2024.101037>

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Paris Agreement*. UNFCCC.

Wei, C., Undavalli, V. K., Perkins, C., Heglas, K., Oswald, E., Gbadamosi Olatunde, O. B., & Khandelwal, B. (2025). Technical and economic assessment of cryogenic fuels for future aviation. *Progress in Aerospace Sciences*, 153, 101053.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2024.101053>

Zhang, W., Wang, J., Qin, G., Kuntal, S., Gong, F., & Yan, R. (2025). Review of the state-of-the-art of alternative marine fuels: A viable approach to zero-carbon shipping. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 16, 100232.
<https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100232>