



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θέμα: «ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ»

ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΙΔΗΡΑΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2023

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή του μεταπτυχιακού προγράμματος κύριο Δημήτριο Σιδηρά για την εμπιστοσύνη ως προς την ανάθεση του θέματος, καθώς και για τη συνολική συνεργασία.

Γεώργιος Παπαϊωάννου

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Σιδηράς

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί βασικό πρόβλημα της σύγχρονης εποχής, αφού γίνεται ολοένα και περισσότερο αισθητή, με τα ακραία καιρικά φαινόμενα που παρατηρούνται στον πλανήτη, να επιφέρουν επιπτώσεις περιβαλλοντικές, ανθρωπιστικές, κοινωνικές, πολιτικές, ατομικές, γεωφυσικές κ.α. Οι επιστήμονες δε, τονίζουν την αναγκαιότητα της διατήρησης της μέσης θερμοκρασίας της γης σε χαμηλά επίπεδα, περιορίζοντας την αύξησή της έως τον 1,5° C, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο. Φαίνεται όμως, πως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες επιβάρυνσής της, σήμερα, αποτελεί η καύση των ορυκτών καυσίμων, καθώς σημαντικά ποσά ρυπογόνων εκπομπών εκλύονται κάθε χρόνο στην ατμόσφαιρα. Για το λόγο αυτό, η αναζήτηση και χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί μια βασική θεματολογία στις πολιτικές μεταξύ κρατών, με στόχο τη μείωση των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, ο τομέας των αεροπορικών μεταφορών έχει αποτελέσει ευρύ πεδίο εφαρμογών τους, αφού ευθύνεται περίπου για το 2% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες προέρχονται από ανθρώπινο παράγοντα. Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων από βιομάζα, όπως είναι τα έλαια, τα διάφορα είδη φυτών ή οι αγροτικές καλλιέργειες φαίνεται να είναι μια ελπιδοφόρα νέα στρατηγική αντιμετώπισης του φαινομένου παγκοσμίως. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η χρήση των βιοκαυσίμων στον τομέα της αεροπλοΐας, που ακόμη βρίσκονται σε αρκετά πρώιμο στάδιο, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής, και δευτερευόντως λόγω της τεχνολογικής "ανωριμότητας" τους στην πράξη εφαρμογής τους, συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα, τα οποία και χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες στα αεροσκάφη. Ωστόσο, οι αεροπορικές εταιρίες υποχρεούνται - σύμφωνα με τις ισχύουσες οδηγίες - να χρησιμοποιούν τα βιοκαύσιμα, επί του παρόντος, με ένα ποσοστό πρόσμειξης αυτών με την κηροζίνη, κατά μέγιστο όμως βαθμό 50%. Είναι γεγονός πως η συμβατική κηροζίνη χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σήμερα στην

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

αεροπλοΐα, παρόλο που έχει καταστεί ξεκάθαρο πως η χρήση εναλλακτικών καυσίμων μειώνει τις εκπομπές ρύπων έως και 80%. Στην μελέτη μας αυτή, αρχικά θα περιγραφούν τα διαθέσιμα σήμερα βιοκαύσιμα, οι εγκεκριμένες μέθοδοι παραγωγής τους καθώς και οι υποκατηγορίες αυτών, οι οποίες αξιολογούνται και πιστοποιούνται ως προς την αποτελεσματική λειτουργία τους στους κινητήρες αεροσκαφών με συγκεκριμένα κριτήρια. Ακόμη, θα αναφερθούμε στον οικονομικό παράγοντα που φαίνεται να αποτελεί και το μεγαλύτερο εμπόδιο στην έως τώρα καθυστερημένη, ομολογουμένως, ευρεία εφαρμογή της χρήσης τους στα αεροσκάφη. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μια αξιολόγηση οικονομικών παραμέτρων των μεθόδων, ώστε να υπάρξει σύγκριση με τα καθιερωμένα συμβατικά καύσιμα. Στη συνέχεια, περιγράφεται η περιβαλλοντική επίδραση της χρήσης βιοκαυσίμων, αφενός ως προς τη μείωση των εκπομπών, αφετέρου ως προς την κατανάλωση νερού κατά τη διαδικασία ανάπτυξής τους. Τέλος, αναλύονται οι απαραίτητες πρωτοβουλίες και συμφωνίες των κρατικών φορέων για τη στήριξη της παραγωγής τους, οι οποίες είναι μείζονος σημασίας για την ομαλή μετάβαση σε καθαρότερες πηγές ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: κλιματική αλλαγή, βιοκαύσιμα, αεροπλοΐα, τεχνοοικονομική μελέτη, περιβάλλον

Abstract

Climate change is a key problem of the modern era, since it is becoming more and more noticeable, with the extreme weather phenomena observed on the planet, causing humanitarian, social, political, individual, geophysical, etc. effects. Scientists emphasize the necessity of maintaining the earth's average temperature at low levels, limiting its increase to a max. of 1.5° C, compared to the pre-industrial period. However, it seems that one of the most important factors affecting it, today, is the outcomes of burning of fossil fuels, as significant amounts of polluting emissions are released into the atmosphere every year. For this reason, the search for and use of renewable energy sources is a key issue in policies between states, aiming to reduce emissions of pollutants into the atmosphere. In particular, the air transport sector has been a wide field of their applications, since it is responsible for approximately 2% of global greenhouse gas emissions, produced by the human factor. The use of alternative fuels derived from biomass, such as oils, different types of plants or agricultural crops seems to be a promising new strategy to deal with the phenomenon worldwide. This paper examines the use of biofuels in the aviation sector, which are still at a fairly early stage, mainly due to the high production costs, and secondarily due to their technological "immaturity" in their actual application, compared to conventional fuels, which have been used for decades in aircrafts. However, according to the official legislation, airlines are obliged today to use biofuels with a maximum percentage of mixing with kerosene at 50%. It is a fact that conventional kerosene is used almost exclusively in aviation today, even though it has become clear that alternative fuels reduce emissions by up to 80%. In this study, we will initially describe the currently available biofuels, their approved production methods as well as their sub-categories, which are evaluated and certified for their effective operation in aircraft engines with specific criteria. Furthermore, we will refer to the economic factor that seems to be the biggest barrier in the delayed, admittedly, wide application in aircraft. Specifically, an evaluation of economic parameters of the methods will be presented, in order to make a comparison with the established conventional fuels. In addition, the environmental impact of the use of biofuels is described in terms of reducing emissions, as well as in terms of water consumption during their development process. Finally, the necessary initiatives and policies of states to support biofuels' production are analyzed, which are of major importance for a smooth transition to cleaner energy sources.

Keywords: climate change, aviation, biofuels, technoeconomic analysis, environment

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract.....	4
Περιεχόμενα.....	5
Συνομογραφίες/Ακρωνύμια.....	6
Κατάλογος Εικόνων	7
Κατάλογος Πινάκων.....	7
Εισαγωγή	8
Κλιματική αλλαγή και αερομεταφορές	10
Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις, στόχοι.....	10
Αερομεταφορές/Αεροπλοΐα	13
Αεροπορικά καύσιμα στη σύγχρονη εποχή	16
Πιστοποίηση.....	17
Καύσιμα παραγόμενα από βιομάζα.....	19
Σημαντικοί ορισμοί	19
Τα βιοκαύσιμα σήμερα.....	19
Παραγωγή και κατανάλωση.....	20
Εταιρίες παραγωγής.....	21
Ιστορικά δεδομένα πτήσεων με βιοκαύσιμα	21
Γιατί προκρίνονται τα βιοκαύσιμα	22
Πλεονεκτήματα των βιοκαυσίμων σήμερα.....	22
Σύνθεση και Πιστοποίηση	24
Μέθοδοι παραγωγής και χαρακτηριστικά.....	25
Τεχνοοικονομικά στοιχεία	33
Οικονομικοί δείκτες.....	33
Σύνοψη των οικονομικών στοιχείων-Παραδοχές.....	40
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	43
Εκπομπές αερίων (Life Cycle Assessment)	43
Κατανάλωση νερού	45
Πολιτικές Προώθησης Εναλλακτικών καυσίμων	47
Συμπεράσματα	54
Βιβλιογραφία	0

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Συντομογραφίες/Ακρωνύμια

GHG	GreenHouse Gas
IATA	International Air Transport Association/ Διεθνής ένωση αερομεταφορών
SAF	Sustainable Aviation Fuels
WMO	World Meteorological Organization
ASTM	American Society for Testing Materials, Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών των Υλικών
ICAO	International Civil Aviation Organization
ΣΕΔΕ	Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου – European Union Emissions Trading Scheme
LCA	Life Cycle Assessment
SPK	Synthetic Paraffinic Kerosene
SKA	Synthetic Kerosene with Aromatics
DSHC	Direct Sugar to HydroCarbons
DFSTJ	Direct Fermentation of Sugar to Jet
GMBM	Global Market Based Measure
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation/ σχέδιο αντιστάθμισης και μείωσης άνθρακα για τη διεθνή αεροπορία
RED II	Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001
ETS	Emissions trade system – σύστημα εμπορίας εκπομπών αερίων

Κατάλογος Εικόνων

1. Συνοδευτικό οπτικό μέσο του κειμένου της πρασινής ενεργειας απο την ΕΕ (https://www.consilium.europa.eu/).....	49
2.Εικόνα για το κείμενο της ΕΕ σχετικά με το πρώτο επιπεδο στόχου μειωσης των εκπομπων CO2. (https://www.consilium.europa.eu/).....	49

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Εκπομπές CO2 σε g ανά είδος μεταφορών. Πηγή: UK Department for Energy Security and Net Zero, Department for Business, Energy & Industrial Strategy via Our world in Data (με βάση δεδομένα από την μελέτη μεθοδολογίας για την αναφορά αερίων θερμοκηπίου της κυβέρνησης του Ηνωμένου Βασιλείου, ertnews.gr).....	14
Πίνακας 2 Εγκεκριμένες διαδικασίες μετατροπής βιοκαυσίμων (Πηγή: ICAO, 2021).....	32
Πίνακας 3 Αποτελέσματα ενδεικτικής μελέτης με βάση το κόστος κεφαλαίου για τις διαφορετικές μεθόδους παραγωγής βιοκαυσίμων (Pavlenko et al., 2019)	34
Πίνακας 4 Ενδεικτικά αποτελέσματα μελέτης με βάση τα λειτουργικά κόστη ανα μέθοδο παραγωγής βιοκαυσίμων (Pavlenko et al., 2019).....	36
Πίνακας 5 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μελετών για την Ελάχιστη τιμή Πώλησης Καυσίμου	39
Πίνακας 6 Πίνακας αποδοτικότητας των πιο κοινών μεθόδων παραγωγής βιοκαυσίμων.	42
Πίνακας 7 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των πιο κοινών μεθόδων παραγωγής βιοκαυσίμου σε σχέση με την κηροζίνη.....	45
Πίνακας 8 Στοιχεία κατανάλωσης νερού βασικών μεθόδων παραγωγής καυσίμων αεροσκαφών	46

Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη σύγχρονη εποχή. Παγκόσμιοι οργανισμοί και κράτη έχουν δεσμευτεί στην τήρηση της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη έως τον 1,5 βαθμό Κελσίου, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο.

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, θα πρέπει οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου να φτάσουν στο μέγιστο επίπεδό τους το αργότερο έως το 2025, και στη συνέχεια να μειωθούν κατά 43% έως το 2030, έως ότου μηδενιστούν το 2050 (UNFCCC, 2016). Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σημαντικά μεγαλύτερο εύρος, αντικαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα. Ειδικότερα, στον τομέα της αεροπλοΐας, θα πρέπει να υπάρξει σταδιακή αντικατάσταση της συμβατικής κηροζίνης, με καθαρότερες μορφές ενέργειας.

Τα τελευταία, λοιπόν, χρόνια, ενθαρρύνεται σημαντικά η χρήση αεροπορικών καυσίμων τα οποία προέρχονται από βιομάζα, συνεισφέροντας σημαντικά στη μείωση των ρυπογόνων εκπομπών στον αεροπορικό τομέα, επιτυγχάνοντας μείωση εκπομπών έως και 80%, συγκριτικά με τη συμβατική κηροζίνη, η οποία χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή σχεδόν αποκλειστικά (Wright, 2020). Εκτός από τα βιοκαύσιμα, έχουν προταθεί και άλλες μορφές πράσινης ενέργειας, όπως το υδρογόνο, έχοντας, ωστόσο, σημαντικά εμπόδια προς την υλοποίησή τους. Τα βιοκαύσιμα, στον αντίποδα, απαιτούν ακόμη κάποια βήματα για την καθιέρωσή τους, με τις έρευνες για την αποτελεσματική λειτουργία και οικονομική βιωσιμότητά τους να βρίσκονται ακόμη σε αρχικά στάδια, ενώ τα κόστη παραγωγής τους είναι 2 έως 3 φορές μεγαλύτερα από τα ορυκτά καύσιμα. Ως εκ τούτου, από τις συνολικές απαιτήσεις της αεροπλοΐας σε καύσιμα, μόλις το 0,1% της καταναλισκόμενης ποσότητας αποτελείται σήμερα από βιοκαύσιμα (McCausland, 2023).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται μια καταγραφή του πλαισίου γύρω από το οποίο αξιοποιούνται τα βιοκαύσιμα στον αεροπορικό τομέα σήμερα. Συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η κλιματική αλλαγή και οι συνέπειές της, με αναφορά στους τρέχοντες στόχους που έχουν θεσπιστεί από κράτη και οργανισμούς για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης. Επιπλέον, γίνεται μια περιγραφή στο μεταφορικό έργο της αεροπλοΐας και στα αεροπορικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά οι εγκεκριμένες μέθοδοι παραγωγής βιοκαυσίμων και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα από τη χρήση τους. Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα τεχνοοικονομικά στοιχεία των βιοκαυσίμων, ενώ το

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

πέμπτο κεφάλαιο συγκεντρώνει τις βασικές θέσεις και πολιτικές προώθησης των βιοκαυσίμων, όπως αυτές έχουν θεσπιστεί από διεθνείς οργανισμούς έως σήμερα. Τέλος, το έκτο κεφάλαιο συνοψίζει όλα τα προηγούμενα και παραθέτει τα συμπεράσματα και τις σκέψεις του συγγραφέα σχετικά με το αντικείμενο.

Κλιματική αλλαγή και αερομεταφορές

Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις, στόχοι

Τα τελευταία 8 χρόνια φαίνεται πως θα είναι τα θερμότερα του πλανήτη, τα οποία έχουν καταγραφεί μετά την προβιομηχανική περίοδο 1850-1900, με τα τελευταία στοιχεία να παρουσιάζουν αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 1,15 ° C (Nullis, 2023). Η αύξηση αυτή οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, στις εκπομπές ρυπογόνων αερίων (GHG-GreenHouse Gas), τα οποία συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, και στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Σημαντικότερα εξ αυτών είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄), και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) (U.S. Energy Information Administration, 2016).

Ακόμη, γίνεται μεγάλη επιστημονική συζήτηση για τη μέση στάθμη της θάλασσας, η οποία ανέρχεται κατά μέσο όρο 3,4 χιλιοστά ετησίως τα τελευταία 30 χρόνια, γεγονός που οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στην τήξη των μεγάλων όγκων πάγου. Μάλιστα, οι ελβετικές Άλπεις υπολογίζεται να έχασαν το 2022 το 6% του όγκου τους σε πάγο, ενώ την τελευταία εικοσαετία οι παγωμένοι όγκοι μειώθηκαν από 77 σε 49 κυβικά χιλιόμετρα, περισσότερο δηλαδή από το ένα τρίτο παγκοσμίως (WMO, 2022). Ένα πιο ανησυχητικό στοιχείο δε, σήμερα, είναι πως για τη χρονική περίοδο 1931-2016 έχει χαθεί το 50% του όγκου των παγετώνων στην Ελβετία (Mannerfelt et al., 2022).

Επιπλέον, είναι γνωστό πως τα ακραία καιρικά πλέον φαινόμενα, όπως παρατεταμένοι καύσωνες, ξηρασία και αυξημένες πλημμύρες επηρεάζουν συχνότερα εκατομμύρια άτομα σε όλο τον κόσμο, με τις συνθήκες διαβίωσης σε ορισμένες περιοχές να χαρακτηρίζονται οριακά και απαγορευτικές. Οι επιδράσεις αυτές γίνονται αντιληπτές και σε οικονομικό επίπεδο, αφού όλα τα παραπάνω συντελούν στο να αυξάνουν τις απαιτήσεις στα κόστη αντιμετώπισης για τα κράτη (WMO, 2022). Συνεπώς, ο αυξανόμενος επερχόμενος κίνδυνος έχει οδηγήσει στην εύρεση κοινής στρατηγικής πρόληψης και στόχευσης παγκοσμίως.

Οι στρατηγικές αυτές σήμερα, έχουν πάρει τη μορφή συμφωνιών μεταξύ χωρών -και ως ενώσεων αλλά και μεταξύ οργανισμών- που ορίζουν κανόνες λειτουργίας αλλά και χρηματοδοτήσεων και πόρων έρευνας για εξεύρεση νέων πηγών ενέργειας και όχι μόνο. Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, πιο συγκεκριμένα, το 2016, με τη Συμφωνία του Παρισιού (COP21), καθιέρωσε αυστηρούς στόχους ως προς τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

της γης στους 2 ° C σε σχέση με την ισχύουσα συνθήκη στη προβιομηχανική εποχή και με ιδανικότερο σενάριο τον περιορισμό σε 1,5 ° C, με απώτερο φυσικά σκοπό να μειωθούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Στη συμφωνία αυτή, ακόμη, προβλέπεται από τα κράτη μέλη να θεσπίζουν σημαντικές μεταρρυθμίσεις, οι οποίες θα στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, (UNFCCC, 2016). Φαινόμενο που μελετάται αρκετά τα τελευταία χρόνια ως άμεση συνάρτηση της αυξημένης θερμοκρασίας της γης και όχι μόνο. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου θα πρέπει, σύμφωνα με τις μελέτες, οι καθαρές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα να μειωθούν περίπου κατά το ήμισυ (45%) έως το 2030, και να εξαλειφθούν πλήρως έως το 2050. Ο στόχος αυτός, ο οποίος αναφέρεται ως Net-Zero, επιβάλλει τη μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όσο γίνεται πλησιέστερα στο μηδέν, με όσες απομένουν να απορροφούνται από την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς ή τα δάση. Στον παραπάνω στόχο έχουν δεσμευτεί 196 μέλη και περισσότερες από 70 χώρες, συμπεριλαμβανομένων των ΗΠΑ, της ΕΕ και της Κίνας, στις οποίες αντιστοιχεί το 76% των παγκόσμιων εκπομπών (United Nations, 2021a).

Ωστόσο, σύμφωνα με τον οργανισμό για τις Εθνικές Συνεισφορές (NDCs: Nationally Determined Contributions) κάθε χώρας, η πρόοδος η οποία έχει επιτευχθεί δεν είναι καθόλου ενθαρρυντική, εφόσον συνεχίσουν να εκπέμπουν με τους ίδιους ρυθμούς καθώς οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τα μέλη της Συμφωνίας του Παρισιού όχι μόνο δεν παρουσιάζουν μείωση, αλλά φαίνεται πως θα παρουσιάσουν αύξηση 11% το 2030 συγκριτικά με τα επίπεδα του 2010. Συνεπώς, θα πρέπει όλα τα κράτη, ειδικότερα όσα εκπέμπουν τις μεγαλύτερες ποσότητες αερίων, να ακολουθήσουν σημαντικά βήματα άμεσα για τη μείωση των εκπομπών και να βελτιώσουν αισθητά τις Εθνικές Συνεισφορές τους (United Nations, 2021).

Ακολούθως, σε επόμενη διάσκεψη του ΟΗΕ στη Γλασκόβη το 2021 (COP26), τα μέλη συμφώνησαν σε ετήσια χρηματοδότηση ύψους 100 δις δολαρίων, από τις αναπτυγμένες προς τις αναπτυσσόμενες χώρες, με σκοπό τη σταδιακή απαγκίστρωση από τα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον, τα μέλη κλήθηκαν να αναθεωρήσουν και να θέσουν αυστηρότερα όρια στις εκπομπές του 2030 έως το τέλος του 2022, διότι υπάρχει σημαντική απόσταση από το στόχους που έχουν τεθεί.

Εντούτοις, το Σεπτέμβριο του 2022, μόλις 24 νέα ή αναθεωρημένα σχέδια είχαν κατατεθεί στον ΟΗΕ από τα μέλη (United Nations, 2021b). Στην τελευταία διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών στην Αίγυπτο το 2022 (COP27), υπήρξε εκ νέου αναφορά στην επιτακτική ανάγκη για μείωση

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

των εκπομπών, με τα τωρινά δεδομένα να δείχνουν πορεία κατά πολύ εκτός στόχου για τον 1,5 ° C, υπολογίζοντας αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας έως και 2,5 ° C έως το τέλος του 21^{ου} αιώνα. Επιπλέον, συμφωνήθηκε η δημιουργία ταμείου στήριξης για αναπτυσσόμενες χώρες, για απώλειες που προκύπτουν λόγω της κλιματικής αλλαγής (United Nations, 2023).

Αερομεταφορές/Αεροπλοΐα

Οι αεροπορικές μεταφορές στις μέρες μας αποτελούν τον ασφαλέστερο και πιο άνετο τρόπο μετακίνησης παγκοσμίως, με ολοένα και περισσότερους ανθρώπους να επιλέγουν τις πτήσεις για τις μετακινήσεις τους. Επιπλέον, η μετακίνηση επιβατών μέσω αεροπορικών πτήσεων αποτελεί ένα σταθερά αυξανόμενο τρόπο μεταφοράς παγκοσμίως, με περίπου 39 εκατομμύρια πτήσεις να έχουν εκτελεστεί το 2019 (συγκριτικά, 25 εκατομμύρια το 2005, 30 εκατομμύρια το 2011). Κάθε χρόνο υπολογίζεται μια αύξηση περίπου 3,5% στον αριθμό των πτήσεων που εκτελούνται. Συνεπώς, παρά την προσωρινή μείωση στις αεροπορικές μετακινήσεις λόγω της πανδημίας του κορονοϊού, ο αριθμός των πτήσεων που εκτελείται ετησίως αυξάνεται σταθερά από το 2000 έως σήμερα, γεγονός που οφείλεται στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου σε αρκετές περιοχές, στην αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, καθώς και στη μείωση του κόστους των πτήσεων. Το 2023 η πρόβλεψη για τις πτήσεις παγκοσμίως αγγίζει τα 40 εκατομμύρια και οι πτήσεις ανά ημέρα θα ξεπεράσουν τις 100.000 στο άμεσο μέλλον (Greenfield, 2023). Όπως είναι λογικό, η αύξηση στη ζήτηση πτήσεων επιφέρει και μια αύξηση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Με βάση τα ιστορικά δεδομένα, μέχρι το έτος 2020, οι παγκόσμιες εκπομπές της αεροπορικής βιομηχανίας ήταν κατά 70% αυξημένες συγκριτικά με το 2005, παρά το γεγονός ότι η απόδοση των αεροπορικών καυσίμων αυξάνεται κατά 2% κάθε χρόνο. Εφόσον δεν υπάρξει κάποια ουσιαστική εξέλιξη, μέχρι το έτος 2050, οι εκπομπές ενδεχομένως να παρουσιάσουν επιπλέον αύξηση κατά 3 έως 7 φορές.

Ακόμη, σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, οι εκπομπές αερίων θα συνεχίσουν να αυξάνονται, ξεπερνώντας τα επίπεδα του 2019, θέτοντας ως ρεαλιστικό στόχο εκπομπών έως το 2030 τους 900 Mt διοξειδίου του άνθρακα κατά μέγιστο, ώστε να μπορέσουν να μηδενιστούν έως το 2050 (IEA, 2022).

Ο τομέας των Μεταφορών παγκοσμίως, υπολογίζεται πως είναι υπεύθυνος για το 20% των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, τα οποία προέρχονται από ανθρώπινη δραστηριότητα (Tiseo, 2023), με τις αερομεταφορές να συνεισφέρουν σημαντικά στις εκπομπές αυτές. Εκτιμάται ότι η συνεισφορά των αεροπορικών μεταφορών στις παγκόσμιες εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου βρίσκεται στο 2%, με 0,7 Gt CO₂ για το 2021, και περίπου 1 Gt CO₂ για τα επίπεδα

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

πριν τον κορονοϊό το 2019 (International Energy Agency, 2022). Σαφέστατα, η συμβολή των αεροπορικών μεταφορών είναι μικρότερη από άλλους τομείς των μεταφορών (οχήματα, ναυσιπλοΐα), ωστόσο είναι αρκετά σημαντική σε ποσότητα εκπομπών. Δεδομένης της αυξητικής τάσης που παρατηρείται στην εκτέλεση πτήσεων παγκοσμίως, ο αεροπορικός τομέας θα συνεισφέρει με κάτι παραπάνω από 1 Gt CO₂ τα επόμενα χρόνια. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθούν οι εκπομπές αερίων των αεροσκαφών συγκριτικά με άλλα μεταφορικά μέσα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για διαφορετικά μέσα μεταφοράς ανά επιβάτη και ανά χιλιόμετρο:

Πίνακας 1 Εκπομπές CO₂ σε g ανά είδος μεταφορών. Πηγή: UK Department for Energy Security and Net Zero, Department for Business, Energy & Industrial Strategy via Our world in Data (με βάση δεδομένα από την μελέτη μεθοδολογίας για την αναφορά αερίων θερμοκηπίου της κυβέρνησης του Ηνωμένου Βασιλείου, ertnews.gr)

Μέσα Μεταφοράς	Εκπομπές CO ₂ ανά επιβάτη/ χλμ
Σύντομη πτήση (π.χ εσωτερικού)✈	255g
Μεσαίο αυτοκίνητο (Βενζίνη) 🚗	192g
Μεσαίο αυτοκίνητο (Diesel) 🚗	171g
Μεσαίας απόστασης πτήση (π.χ. ανάμεσα σε δυο ευρωπαϊκές χώρες)✈	156g
Πολύωρη πτήση (πάνω από 3700 χλμ απόστασης)✈	150g
Λεωφορείο 🚌	105g
Μεσαίου μεγέθους μηχανή 🚗	103g
Διθέσιο αυτοκίνητο (βενζίνη) 🚗	96g
Μεσαίο Ηλεκτροκίνητο Αυτοκίνητο 🚗	53g
Εθνικός Σιδηρόδρομος 🚆	41g
Πλοίο 🚢	19g
Διεθνής σιδηρόδρομος (τύπου Eurostar) 🚆	6g

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Όπως φάνηκε και από τα παραπάνω, η στροφή προς την πράσινη ενέργεια είναι επίκαιρη και ένας από τους βασικούς πυλώνες ενεργειακής στρατηγικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η πολιτική αυτή της ΕΕ εγκαινιάστηκε ήδη το 1997, με τη λεγόμενη έκδοση της Λευκής Βίβλου¹ για να στηρίξει την εξάλειψη των ρυπογόνων εκπομπών στον τομέα της ενέργειας και να μειώσει τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Παράλληλα με αυτό τον τρόπο, επιδιώχθηκαν ήδη νομικά οι δεσμευτικοί στόχοι που υποστήριζαν ένα πλήρες ρυθμιστικό πλαίσιο της ενεργειακής πολιτικής της Ευρώπης για τις μεταφορές, με πρώτο σημείο σταθμό την αξιολόγηση τους το 2020.

Ήδη από τον Απρίλιο του 2009, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο είχε εκθέσει οδηγίες και κανονισμούς για την καθιέρωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη².

Συγκεκριμένα το εκάστοτε Εθνικό Σχέδιο Δράσης κάθε κράτους μέλους της Ένωσης, για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), θα στοχεύει σε τρεις βασικές κατευθύνσεις: την εγκατάσταση πλέον των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, την Μείωση Κατανάλωσης Ενέργειας και την Ελάττωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Μάλιστα ο στόχος σε αριθμούς για το 2020 φαίνεται να ήταν:

- 20% περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου συγκριτικά με το έτος 1990 βάσει της Οδηγίας 2009/29/ΕΚ
- 20% εισχώρηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική ενεργειακή κατανάλωση βάσει της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ και
- 20% μείωση πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσης

¹ Η ανακοίνωση της Επιτροπής: «Ενέργεια για το μέλλον: ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», Λευκή βίβλος για κοινοτική στρατηγική και σχέδιο δράσης, COM(97) 599, Νοέμβριος 1997. Βλ. βιβλιογραφία, ηλεκτρονικές πηγές: <http://europa.eu>

² Οδηγία 2009/28/ΕΚ του ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ και του ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ, της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ, Επίσημη Εφημερίδα αριθ. L 140 της 05/06/2009 σ. 0016 – 0062).

Αεροπορικά καύσιμα στη σύγχρονη εποχή

Εδώ και δεκαετίες τα αεροσκάφη χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για τη χρήση τους, και συγκεκριμένα κηροζίνη ή jet fuel, η οποία αποτελεί παράγωγο του αργού πετρελαίου. Όπως και με τον αριθμό των πτήσεων, έτσι και η συνολική κατανάλωση σε κηροζίνη παγκοσμίως ακολουθεί ανοδικές τάσεις τα τελευταία χρόνια. Το 2019, πριν την πανδημία του κορονοϊού, η κατανάλωση σε κηροζίνη έφτασε τα 95 δισεκατομμύρια γαλόνια, ενώ αναμένεται να ξεπεράσει τα 100 δισεκατομμύρια γαλόνια ετησίως στα επόμενα χρόνια, δηλαδή περίπου 380 δισεκατομμύρια λίτρα (Greenfield, 2023b).

Εκτός από το σημαντικό ανθρακικό αποτύπωμα των συμβατικών καυσίμων, παρουσιάζονται δύο ακόμη σημαντικά μειονεκτήματα από τη χρήση τους. Πρωτίστως, η πρόσφατη παγκόσμια ενεργειακή κρίση δεν έχει αφήσει ανεπηρέαστο τον αεροπορικό τομέα, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται διακυμάνσεις στην τιμή πώλησης της συμβατικής κηροζίνης. Το γεγονός αυτό ενισχύεται ακόμη περισσότερο διότι η κηροζίνη αποτελεί τη μοναδική πηγή καυσίμου στα αεροσκάφη, σε αντίθεση με άλλα μέσα μεταφοράς, όπως το αυτοκίνητο. Ενδεχόμενες αυξήσεις στις τιμές της κηροζίνης επηρεάζουν άμεσα το καταναλωτικό κοινό, οδηγώντας σε αύξηση στις τιμές των αεροπορικών εισιτηρίων. Δευτερευόντως, το αργό πετρέλαιο, από το οποίο παράγεται η κηροζίνη, αποτελεί πηγή με εξαιρετικά μεγάλα αποθέματα, τα οποία, ωστόσο, δεν είναι ανεξάντλητα, ειδικά από τη στιγμή που η χρήση των ορυκτών καυσίμων αυξάνεται διαρκώς. Οφείλουμε, λοιπόν, σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα να βρούμε εναλλακτικές και ανανεώσιμες πηγές καυσίμου για τα αεροσκάφη, οι οποίες θα παρέχουν είτε σχετική είτε απόλυτη ενεργειακή ανεξαρτησία στον αεροπορικό τομέα. Συνεπώς, τα βιοκαύσιμα αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη επιλογή προς αυτή την κατεύθυνση και η μελέτη τους είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Σύμφωνα με στοιχεία του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ, η τιμή πώλησης της κηροζίνης ακολουθεί σταθερά ανοδική πορεία από το 2000 μέχρι και σήμερα. Το 2004 ήταν η πρώτη χρονιά κατά την οποία η τιμή της κηροζίνης ξεπέρασε το 1 δολάριο ανά γαλόνι, ενώ παρατηρείται αύξηση της τιμής πώλησης ακόμη και πάνω από τα 3 δολάρια ανά γαλόνι σε περιόδους οικονομικής κρίσης. Μάλιστα, το 2022, κατά το οποίο ξέσπασε η παγκόσμια ενεργειακή κρίση, η τιμή σημείωσε ρεκόρ, αφού κινήθηκε κατά μέσο όρο στα 3,37 δολάρια ανά

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

γαλόνι. Έως τώρα η τιμή έχει σταθεροποιηθεί στα 3 δολάρια ανά γαλόνι εντός του 2023, με στοιχεία να καταγράφονται από Ιανουάριο έως Απρίλιο (Bureau of Transportation Statistics, 2023). Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως σε μια εικοσαετία, η τιμή του μοναδικού χρησιμοποιούμενου καυσίμου των αεροσκαφών έχει τριπλασιαστεί, ενώ παρατηρούνται απότομες μεταβολές στην τιμή σε περιόδους οικονομικής ή ενεργειακής αστάθειας.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας για τον αεροπορικό τομέα, είτε αντικαθιστώντας τη συμβατική κηροζίνη, είτε δρώντας συμπληρωματικά, βελτιώνοντας τον υπάρχοντα ανταγωνισμό στο ενεργειακό στερέωμα.

Πιστοποίηση

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη, σε σχέση με τα άλλους τρόπους μεταφοράς, πρέπει να πληρούν αυστηρότερα κριτήρια όσον αφορά την παραγωγή και αποθήκευσή τους. Για το λόγο αυτό έχουν θεσπιστεί αρμόδιες αρχές οι οποίες πραγματοποιούν ελέγχους και θέτουν κανονισμούς για τη σύνθεση και χρήση τους, όπως ο οργανισμός ASTM (American Society for Testing Materials), με έδρα τις ΗΠΑ.

Ο ASTM αποτελεί τη μεγαλύτερη και γνωστότερη εποπτική αρχή παγκοσμίως που θεσπίζει τα απαιτούμενα πρότυπα για τη δημιουργία και χρήση λειτουργικών αεροπορικών καυσίμων. Ο ASTM εισήγαγε αρχικώς το πρότυπο D1655, με το οποίο αξιολογούνται τα συμβατικά καύσιμα, τα οποία προέρχονται δηλαδή από ορυκτές πηγές, όπως αργό πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.α. Το πρότυπο αυτό ελέγχει διάφορα χαρακτηριστικά του αεροπορικού καυσίμου, όπως είναι η πυκνότητα, το σημείο καύσης ή παγοποίησης, η ενεργειακή απόδοση κ.α. Πλέον, και με τις νέες τεχνολογίες και προόδους, όπως την χρήση βιοκαυσίμου, τα τελευταία χρόνια ο ASTM καλείται να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα και ποιότητα νέων εναλλακτικών καυσίμων. Σημαντικό είναι επίσης το πρότυπο αξιολόγησης καυσίμων DEF STAN 91-91 του Ηνωμένου Βασιλείου, ενώ τα αεροπορικά καύσιμα στρατιωτικής χρήσης ελέγχονται με το πρότυπο MIL-DTL-83133.

Τα αεροπορικά καύσιμα χωρίζονται επίσημα σε δυο κατηγορίες: σε εμπορικής και στρατιωτικής χρήσης. Τα πολιτικά αεροσκάφη χρησιμοποιούν κυρίως το λεγόμενο «JET A» και το «JET A-1», ενώ τα στρατιωτικά αεροσκάφη χρησιμοποιούν κυρίως το «JP-8». Το «JET A», χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στις ΗΠΑ, ενώ το «JET A-1» έχει χρήση σε παγκόσμια

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

κλίμακα. Το «JET A» είναι οριακά φτηνότερο στην αγορά του, ενώ το «JET A-1» περιλαμβάνει αρκετά πρόσθετα στη σύνθεσή του, γεγονός που το καθιστά λίγο πιο ακριβό. Τα πρόσθετα αυτά επιτρέπουν στο «JET A-1» να έχει χαμηλότερο σημείο πήξης (-47°C), σε σύγκριση με το «JET A» που πήζει υψηλότερα (-40°C). Για το λόγο αυτό, το «JET A-1» προτιμάται παγκοσμίως σε διεθνείς πτήσεις μεγάλων αποστάσεων, αλλά και σε περιοχές με χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ένα νέο πρότυπο σήμερα, το D7566 ορίζει τις προδιαγραφές εναλλακτικών αεροπορικών καυσίμων, τα οποία περιέχουν συνθετικούς υδρογονάνθρακες, και βρίσκεται σε εναρμόνιση με το αρχικό πρότυπο των βιοκαυσίμων D1655, με μικρές, ωστόσο, διαφορές. Σημειώνεται πως τα εναλλακτικά καύσιμα αξιολογούνται αρχικά ως προς το πρότυπο D7566, και εφόσον πιστοποιηθούν, τότε υπόκεινται εκ νέου σε έλεγχο με βάση το πρότυπο D1655 των ορυκτών καυσίμων (Wang et al., 2019).

Θα αναφερθούμε όμως σε επόμενο κεφάλαιο, πιο αναλυτικά, στις ισχύουσες πιστοποιήσεις και ελέγχους των εναλλακτικών καυσίμων.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Καύσιμα παραγόμενα από βιομάζα

Σημαντικοί ορισμοί

Κάποιες σημαντικές έννοιες που θα παρουσιαστούν παρακάτω είναι σημαντικό να οριστούν εδώ:

Sustainable aviation fuel (SAF): ο βασικός όρος της αεροπορικής βιομηχανίας για τα ανανεώσιμα καύσιμα τα οποία δεν προέρχονται από συμβατικές ορυκτές πηγές και χρησιμεύουν, απολύτως ή και μερικώς, ως εναλλακτική λύση για προϊόντα αργού πετρελαίου/υδρογονάνθρακες που χρησιμοποιούνται στις αεροπορικές μεταφορές, έχοντας την ικανότητα να συνεισφέρουν στον περιορισμό των ρυπογόνων εκπομπών στον αεροπορικό τομέα. Περιλαμβάνει καύσιμα που προέρχονται από βιομάζα, υδρογόνο, ηλιακή ενέργεια κ.α. Στην αγγλική βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται επίσης οι ταυτόσημοι όροι sustainable alternative fuel, sustainable alternative jet fuel, renewable jet fuel και biojet fuel. Στην ελληνική γλώσσα χρησιμοποιούνται οι όροι εναλλακτικά καύσιμα ή ανανεώσιμα καύσιμα.

Βιοκαύσιμα (biofuels): καύσιμα τα οποία προέρχονται από βιολογικές (φυτικές ή ζωικές) πηγές, και χαρακτηρίζονται από ίδια ή παραπλήσια χαρακτηριστικά με τα ορυκτά καύσιμα ως προς τη χρήση τους. Τα βιοκαύσιμα ή καύσιμα από πηγές βιομάζας αποτελούν υποκατηγορία των SAF.

Drop-in καύσιμα: καύσιμα τα οποία έχουν παρόμοια χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά σε σχέση με την κηροζίνη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους ήδη υπάρχοντες κινητήρες αεροσκαφών, χωρίς να απαιτείται τροποποίηση στα συστήματα τροφοδοσίας καυσίμου ή άλλα μέρη ενός αεροσκάφους (Wright, 2020).

Τα βιοκαύσιμα σήμερα

Σήμερα, υπάρχουν 9 εγκεκριμένες λύσεις ή μέθοδοι παραγωγής αεροπορικών βιοκαυσίμων, για την πρόσμιξη με τη συμβατική κηροζίνη, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Από αυτές, έχουν ξεχωρίσει η μέθοδος HEFA-SPK (Hydrotreated Ester and Fatty Acids - Synthetic Paraffinic Kerosene), που θεωρείται και η πιο τεχνολογικά "ώριμη" και εμπορεύσιμη μέθοδος, μαζί με την FT-SPK (Fischer Tropsch - Synthetic Paraffinic Kerosene) μέθοδο. Οι δύο αυτές μέθοδοι είναι οι πρώτες που εγκρίθηκαν για παραγωγή βιοκαυσίμων αεροσκαφών και

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

φαίνεται πως θα αποτελέσουν πιθανότατα τις βασικές πηγές αεροπορικού βιοκαυσίμου στο άμεσο μέλλον (IEA, 2019).

Σημαντικό αποτρεπτικό παράγοντα για τις αεροπορικές εταιρείες αποτελεί το κόστος αγοράς βιοκαυσίμου, το οποίο μπορεί να είναι από 2 έως 5 φορές μεγαλύτερο από της κηροζίνης. Επιπλέον, η τρέχουσα νομοθεσία απαιτεί την πρόσμειξη των εναλλακτικών καυσίμων με συμβατικά καύσιμα, με ένα περιορισμό ως προς το μέγιστο ποσοστό στο μείγμα καυσίμου. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από το είδος εναλλακτικού καυσίμου και τη μέθοδο παραγωγής αυτού, και κυμαίνεται από 10 έως 50%. Το τελικό μείγμα καυσίμου θα πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια: ως προς την απόδοση, το σημείο καύσης ή παγοποίησης, την πυκνότητα κλπ.

Παραγωγή και κατανάλωση

Τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί οι έρευνες για τις συνθήκες υπό τις οποίες παράγονται και λειτουργούν τα βιοκαύσιμα, ενώ η χρήση τους από τις αεροπορικές εταιρείες ενθαρρύνεται σε μεγάλο βαθμό, με σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Παρά το γεγονός πως έχουν αξιολογηθεί και ελεγχθεί σε σημαντικό βαθμό τα τελευταία 15 χρόνια, το μερίδιο χρήσης των βιοκαυσίμων στον αεροπορικό τομέα βρίσκεται μόλις στο 0,1%, σε σχέση με την συμβατική κηροζίνη. Συγκεκριμένα, για το 2022 από τα 276 δισεκατομμύρια λίτρα κηροζίνης που καταναλώθηκαν τις αεροπορικές μεταφορές, μόλις τα 300 εκατομμύρια λίτρα ήταν βιοκαύσιμα, δηλαδή περίπου 1 λίτρο βιοκαυσίμου για κάθε 1000 λίτρα συμβατικής κηροζίνης που χρησιμοποιήθηκαν (Le Feuvre, 2019). Η παραγωγή εναλλακτικών καυσίμων το 2015 ήταν κατά μέσο όρο 0.29 εκατομμύρια λίτρα ετησίως, ενώ έως το 2018 έφτασε στα 6,5 εκατομμύρια λίτρα ετησίως. Σύμφωνα με τον ICAO η πρόβλεψη παραγωγής για το 2032 μπορεί να αγγίξει τα 13,6 δισεκατομμύρια λίτρα, περίπου δηλαδή τα 10,9 εκατομμύρια τόνους (Sustainable Aviation Fuels Stocktaking, 2019). Για το 2045 υπολογίζονται απαιτήσεις να φτάνουν σε 636 δις λίτρα βιοκαυσίμου, ώστε να αντικατασταθούν εξ ολοκλήρου τα συμβατικά καύσιμα (Tchilinguirian, 2022).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση Βιομηχανίας Βιομάζας υπολογίζει πως η συνολική παγκόσμια δυνατότητα παραγωγής βιομάζας έως το 2050 θα κυμαίνεται από 25 έως 76 δισεκατομμύρια βαρέλια ισοδύναμου πετρελαίου, ποσότητα που αντιστοιχεί σε ένα εύρος 150-450 Exajoule.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Μάλιστα, η αφρικανική ήπειρος θα μπορούσε από μόνη της να συνεισφέρει με παραγωγή ενέργειας από βιομάζα 21,4 EJ ετησίως, ή 3,5 δισεκατομμύρια βαρέλια ισοδύναμου πετρελαίου (Liu et al., 2013). Σύμφωνα με το Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ, η Αμερική κατανάλωσε 19,2 δισεκατομμύρια γαλόνια καυσίμου το 2019 για αεροπορικές μεταφορές. Λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο βαθμό πρόσμειξης που ισχύει σήμερα (50%), θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν περίπου 10 δισεκατομμύρια γαλόνια ορυκτών καυσίμων, οδηγώντας σε μια σημαντική μείωση εκπομπών (Bureau of Transportation Statistics, 2019).

Η καθιέρωση μερικώς ή εξ ολοκλήρου των εναλλακτικών καυσίμων μπορεί να προσφέρει ενεργειακή ασφάλεια και ανεξαρτησία. Η χρήση διαφορετικών πηγών ενέργειας, και μάλιστα βιώσιμων, μπορεί να εξομαλύνει τις απότομες μεταβολές τιμών στα ορυκτά καύσιμα, ειδικά σε περιόδους ενεργειακής κρίσης, όπου η διακύμανση τιμών είναι αρκετά μεγάλη. Ενδεικτικά, σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, η κατανάλωση αεροπορικών καυσίμων θα παρουσιάσει συνεχόμενη ετήσια αύξηση 1,5% έως το 2050, με ταυτόχρονη αύξηση της τιμής 2,7% ετησίως (Allison, 2017).

Εταιρίες παραγωγής

Έως το 2022, 4 μεγάλες εταιρίες είναι αυτές που παρήγαγαν σημαντικές ποσότητες εναλλακτικών καυσίμων: Neste, SkyNRG, World Energy και Gevo. Πλέον, υπάρχει ενδιαφέρον και σημαντική παραγωγή και από άλλες εταιρίες, σε μικρότερη κλίμακα, ενώ αρκετές εταιρίες της βόρειας Αμερικής επενδύουν σε σταθμούς παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων, ώστε να αυξήσουν την παραγωγή τους σε βάθος χρόνου. Δυστυχώς, λίγα είναι τα σημεία στον πλανήτη με σταθμούς παραγωγής. Ωστόσο, υπάρχει πρόβλεψη ώστε να δημιουργηθούν αρκετοί νέοι σταθμοί για το μέλλον σε Ευρώπη, Ασία και λατινική Αμερική, οι οποίοι θα συνεισφέρουν αρκετά στη συνολική παραγωγή (Iginii, 2022).

Ιστορικά δεδομένα πτήσεων με βιοκαύσιμα

Ιστορικά, τα βιώσιμα καύσιμα είχαν μπει ήδη στο παράθυρο συζητήσεων ως εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα, σχεδόν από τις αρχές του 21ού αιώνα. Η εταιρία Virgin Atlantic εκτέλεσε με επιτυχία την πρώτη πτήση -χωρίς επιβάτες- το Φεβρουάριο του 2008, με χρήση εναλλακτικών καυσίμων κατά αναλογία 25%, σηματοδοτώντας έτσι, επιτυχώς, την πρόοδο που

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

θα ακολουθήσει (Jones & Milmo, 2008). Περίπου 3 χρόνια μετά, το 2011, η εταιρεία KLM Airlines ήταν η πρώτη η οποία διεξήγαγε εμπορική πτήση, με χρήση 50% εναλλακτικών καυσίμων, μεταφέροντας 171 επιβάτες από το Άμστερνταμ στο Παρίσι (Paur, 2011) και έκτοτε, στο διάστημα 2011 έως 2015, διεξήχθησαν 2500 εμπορικές πτήσεις από 22 διαφορετικές αεροπορικές εταιρείες με χρήση εναλλακτικών καυσίμων με πρόσμιξη έως 50% (Perry, 2019). Σήμερα πραγματοποιούνται χιλιάδες πτήσεις που έχουν έστω και ένα ελάχιστο μερίδιο βιοκαυσίμου στο συνολικό μείγμα καυσίμου.

Γιατί προκρίνονται τα βιοκαύσιμα

Η λίστα των εναλλακτικών καυσίμων περιλαμβάνει όχι μόνο καύσιμα από βιομάζα, αλλά και άλλες ανανεώσιμες πηγές, όπως το υδρογόνο. Ωστόσο, η χρήση του υδρογόνου στα αεροσκάφη βρίσκεται ακόμη σε διαδικασία αρχικής μελέτης, και δε φαίνεται να προκρίνεται στο άμεσο μέλλον ως καύσιμο εναλλακτικών πηγών. Αφενός, το υδρογόνο δεν αποτελεί καύσιμο drop-in, κι έτσι απαιτείται τροποποίηση στην υπάρχουσα δομή και στα συστήματα τροφοδοσίας των αεροσκαφών, κάτι το οποίο θα απαιτούσε τεράστιους πόρους και σημαντικό χρονικό διάστημα ώστε να επιτευχθεί. Αφετέρου, απαιτείται αρκετή έρευνα για τη χρήση στην αεροπορική βιομηχανία.

Πλεονεκτήματα των βιοκαυσίμων σήμερα

Συνοπτικά, αυτό που προσφέρουν τα βιοκαύσιμα σήμερα συνοψίζεται στα εξής:

1. Αποτελούν καύσιμα drop-in, συνεπώς δεν απαιτούνται αλλαγές στους κινητήρες και τη δομή των αεροσκαφών, εξοικονομώντας χρήματα και χρόνο. Επιπλέον, βρίσκονται σε πιο προχωρημένο στάδιο σε σχέση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα, όπως το υδρογόνο.
2. Τα βιοκαύσιμα μειώνουν αποδεδειγμένα σύμφωνα με τις έως τώρα μελέτες τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο απορροφάται από τα φυτά κατά τη διάρκεια ανάπτυξης της βιομάζας, είναι σχεδόν στα ίδια επίπεδα με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που εκλύονται κατά την καύση του καυσίμου σε ένα κινητήρα και επιστρέφονται την ατμόσφαιρα. Συνεπώς, οι εκπομπές από τη χρήση των βιοκαυσίμων είναι σχεδόν μηδενικές. Θα πρέπει, ωστόσο, να υπολογιστούν οι εκπομπές κατά τη διαδικασία παραγωγής των βιοκαυσίμων, από την

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

ανάπτυξη και μεταφορά των πρώτων υλών/βιομάζας, έως τη δύλιση και μεταφορά του βιοκαυσίμου. Σε κάποιες περιπτώσεις, επομένως, παρατηρείται μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως και 80% σε σχέση με τη συμβατική κηροζίνη. Επιπλέον, τα βιοκαύσιμα περιέχουν λιγότερες προσμίξεις, όπως το θείο, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση εκπομπών διοξειδίου του θείου και μικροσωματιδίων (Madison Wright, 2020).

3. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου χρησιμοποιούνται ως βιομάζα αστικά ή βιομηχανικά απόβλητα, υπάρχει έμμεσο περιβαλλοντικό κέρδος, διότι τα απόβλητα αυτά θα απορρίπτονταν σε χώρους ταφής προς αποσύνθεση, χωρίς να αξιοποιούνται περαιτέρω, εκλύοντας εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, όπως το μεθάνιο (Madison Wright, 2020).
4. Η εμφανής εξάρτηση του αεροπορικού τομέα από τα συμβατικά καύσιμα, είναι αρκετά σημαντική, έχοντας μία και μοναδική πηγή ενέργειας, ενώ επηρεάζεται από διακυμάνσεις τιμών του αργού πετρελαίου, ειδικότερα σε περιόδους ενεργειακής ή/και οικονομικής κρίσης. Τα βιοκαύσιμα μπορούν να έχουν πολλές και διαφορετικές πηγές πρώτης ύλης, αλλά και σε διαφορετικά σημεία παγκοσμίως, γεγονός το οποίο δημιουργεί μια ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια. Αντιθέτως, η παραγωγή ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένη γεωγραφικά, και αποτελεί προνόμιο ελάχιστων περιοχών. Η δημιουργία ανταγωνισμού μόνο θετική επίδραση μπορεί να έχει, μειώνοντας και τα κόστη αγοράς αεροπορικών εισιτηρίων.
5. Αρκετές περιοχές του πλανήτη έχουν αφθονία σε πηγές βιομάζας, τις οποίες δεν εκμεταλλευόμαστε. Ειδικότερα για αναπτυσσόμενες χώρες, η παραγωγή βιοκαυσίμων θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα ανάπτυξης και ευημερίας.
6. Σε κοινωνικό επίπεδο, η παραγωγή βιοκαυσίμων θα μπορούσε να προσφέρει νέες θέσεις εργασίας, ενώ παράλληλα θα μπορούσε να αποτελέσει μια αφορμή για καλύτερη διαχείριση και ανακύκλωση αποβλήτων, τα οποία αποτελούν σημαντικό πρόβλημα ειδικά για τις αναπτυσσόμενες χώρες.

Σύνθεση και Πιστοποίηση

Τα βιοκαύσιμα καύσιμα, σήμερα, στην αεροπλοΐα, θα πρέπει να έχουν ίδια ή παρόμοια χαρακτηριστικά με τα συμβατικά καύσιμα, πληρώνοντας ορισμένες αυστηρές προϋποθέσεις για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, δίχως να απαιτείται τροποποίηση στα τρέχοντα συστήματα των αεροσκαφών και να θεωρούνται drop-in καύσιμα.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, τα συμβατικά αεροπορικά καύσιμα πιστοποιούνται με αυστηρά κριτήρια από τον ASTM με το πρότυπο D1655. Αντιθέτως, τα βιοκαύσιμα αξιολογούνται ξεχωριστά με το πρότυπο D7566, το οποίο απαιτεί παρόμοια φυσικά χαρακτηριστικά συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα. Εν συνεχεία, αφού το βιοκαύσιμο πιστοποιηθεί με το πρότυπο ASTM D7566, υπόκειται σε πρόσμειξη με τη συμβατική κηροζίνη, και αξιολογείται εκ νέου βάσει του αρχικού προτύπου συνθετικών καυσίμων D1655. Τότε μπορεί να θεωρηθεί ως κατάλληλο προς χρήση στην αεροπορική βιομηχανία (Wright, 2020).

Γενικότερα, τα δύο πρότυπα του ASTM που αναφέρθηκαν, απαιτούν ίδια χαρακτηριστικά από τα εξεταζόμενα καύσιμα, με ορισμένες, ωστόσο, εξαιρέσεις, ανάλογα με το είδος εναλλακτικού καυσίμου το οποίο εξετάζεται. Για παράδειγμα, το πρότυπο ASTM D1655 των ορυκτών καυσίμων απαιτεί σε θερμοκρασία 15°C πυκνότητα 775-840 kg/m³. Τα εναλλακτικά καύσιμα από τις μεθόδους παραγωγής Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) ή Fischer-Tropsch (FT), ωστόσο, απαιτούν πυκνότητα αρκετά χαμηλότερη, βάσει του προτύπου D7566, στα 730-770 kg/m³, ενώ καύσιμα από άλλες μεθόδους απαιτούν πυκνότητα 765-780 kg/m³.

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι κάθε ένα από τα εναλλακτικά καύσιμα έχει διαφορετική σύσταση, η οποία εξαρτάται από την προερχόμενη πηγή/βιομάζα, καθώς και την επεξεργασία την οποία έχει υποστεί. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο τα εναλλακτικά καύσιμα να αναμειχθούν με τα συμβατικά, τα οποία θα προσφέρουν στο μείγμα τα συστατικά ή τις ιδιότητες που λείπουν, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα κάποιας αστοχίας ή δυσλειτουργίας (Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, 2022).

Μέθοδοι παραγωγής και χαρακτηριστικά

Σήμερα υπάρχει πληθώρα μεθόδων παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων από βιομάζα. Κάποιες έχουν δοκιμαστεί αρκετά και βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο, ενώ κάποιες άλλες νεότερες χρειάζονται ακόμη αρκετή μελέτη και βελτιώσεις στη σύστασή τους. Ανεξαρτήτως της διαδικασίας παραγωγής τους, τα εναλλακτικά καύσιμα, δεδομένης της ένωσής τους με τα συμβατικά καύσιμα, θα πρέπει να πληρούν τα κριτήρια ώστε να θεωρούνται καύσιμα drop-in, δηλαδή να μην απαιτείται τροποποίηση στους υπάρχοντες κινητήρες αεροσκαφών για τη χρήση τους, στοιχείο που αποτελεί και σημαντικό πλεονέκτημα των βιοκαυσίμων. Επί του παρόντος έχουν εγκριθεί 9 διαφορετικές μέθοδοι παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων, όπως φαίνονται παρακάτω, με σειρά ταξινόμησης κατά την ημερομηνία έγκρισής τους από τον ASTM:

1. **F-T ή FT:** *Fischer-Tropsch*
2. **HEFA:** *Hydrotreated Ester and Fatty Acids*
3. **SIP:** *Synthesized Iso-Paraffinic*
4. **FT-SKA:** *Fischer-Tropsch Synthetic paraffinic Kerosine with Aromatics*
5. **ATJ:** *Alcohol To Jet*
6. **CH:** *Catalytic Hydrothermolysis*
7. **HC-HEFA:** *HydroCarbon-Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*
8. **FOG:** *Fats, Oils, and Grease co-processing*
9. **FT:** *Fischer-Tropsch co-processing*

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι παραγωγής, δημιουργούν το λεγόμενο SPK (Synthetic Paraffinic Kerosene), μια συνθετική παραφινική κηροζίνη, που δεν περιλαμβάνει όμως τις λεγόμενες αρωματικές ενώσεις και τις κυκλοπαραφίνες στη σύνθεσή της, γεγονός που επιβάλλει την ένωσή του με συμβατικά καύσιμα. Ωστόσο, υπάρχει μια διαδικασία, η οποία ονομάζεται SKA ή SPK/A (Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics), κατά την οποία πραγματοποιείται αρωματισμός των παραφινών. Η διαδικασία αυτή είναι πιο περίπλοκη από τη συνηθισμένη SPK παραγωγή, όμως η παρουσία αρωματικών στο καύσιμο θα επιτρέπει τη χρήση του SKA ως ανεξάρτητο μείγμα και χωρίς την πρόσμιξη με συμβατικά καύσιμα. Προς το παρόν, βέβαια, και αυτού του είδους τα καύσιμα χρησιμοποιούνται απαιτώντας την πρόσμιξή τους με την κηροζίνη, όπως και τα υπόλοιπα (Pires et al., 2018).

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Παρακάτω θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στα χαρακτηριστικά των εγκεκριμένων και ενεργών μεθόδων που χρησιμοποιούνται σήμερα για την παραγωγή και χρήση των βιοκαυσίμων:

1. F-T

Η μέθοδος Fischer-Tropsch SPK (στο εξής FT) ήταν η πρώτη μέθοδος παραγωγής βιοκαυσίμου η οποία εγκρίθηκε, με το Annex 1, το Σεπτέμβριο του 2009. Τα παραγόμενα βιοκαύσιμα με τη μέθοδο αυτή, έχουν έλλειψη αρωματικών ενώσεων, οι οποίες απαιτούνται για τη διόγκωση των ελαστομερών σφραγισμάτων στα αεροσκάφη, και την αποφυγή διαρροών καυσίμου. Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια γίνεται μια προσπάθεια για μια περισσότερο προηγμένη μεθοδολογία στη FT, με τη χρήση εξελιγμένων καταλυτικών διεργασιών, ώστε να δημιουργούνται τελικά προϊόντα βιοκαυσίμου, τα οποία θα περιέχουν τις απαραίτητες αρωματικές ενώσεις. Από αυτή την προσπάθεια προήλθε η περισσότερο εξελιγμένη με παρουσία αρωματικών ενώσεων FT-SKA μέθοδος, η οποία εγκρίθηκε από τον ASTM με το Annex 4 το Νοέμβριο του 2015.

Η σύνθεση F-T επιτρέπει τη χρήση οποιασδήποτε πρώτης ύλης με βάση τον άνθρακα, η οποία της δίνει τη δυνατότητα να έχει μεγάλο εύρος κυρίων πηγών προέλευσης. Επιπλέον, στη μέθοδο F-T δεν απαιτείται ιδιαίτερη προεργασία στην πρώτη ύλη, πάρα μόνο η διαδικασία αφαίρεσης υγρασίας. Τα παραγόμενα βιοκαύσιμα με μέθοδο F-T χαρακτηρίζονται από υψηλή ποσότητα ειδικής ενέργειας και υψηλό ωφέλιμο φορτίο, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο αρκετά δημοφιλή για την παραγωγή βιοκαυσίμων (Shahabuddin et al., 2020).

Η μέθοδος F-T έχει τρία βασικά στάδια επεξεργασίας: Αρχικά, η βιομάζα μετατρέπεται σε συνθετικό αέριο, δηλαδή ένα αέριο μείγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα. Κατά τη διαδικασία αυτή έπειτα παράγονται ως δευτερεύοντα συστατικά διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία, τα οποία και αφαιρούνται. Εν συνεχεία, το συνθετικό αέριο υφίσταται μια διαδικασία υγροποίησης και μετατρέπεται σε πετρέλαιο, και τέλος, παράγεται το βιοκαύσιμο μέσω διύλισης του.

Σύμφωνα με το πρότυπο του ASTM, η μέθοδος F-T απαιτεί μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης 50% (Shahriar & Khanal, 2022).

2. HEFA

Η μέθοδος Hydrotreated Ester and Fatty Acids SPK (στο εξής HEFA) έχει εγκριθεί από τον ASTM με το πρότυπο D7566 και το Annex 2, τον Ιούνιο του 2011. Σε σχέση με την κλασική μέθοδο διεστεροποίησης σε άλλες παραγωγικές διεργασίες, η HEFA απαιτεί 20% υψηλότερο κόστος κεφαλαίου. Ωστόσο, τα υποπροϊόντα της HEFA, η νάφθα, το diesel και το προπάνιο, πωλούνται σε υψηλότερη τιμή, γεγονός που αντισταθμίζει το υψηλό της κόστος.

Το καύσιμο που παράγεται από τη μέθοδο HEFA έχει ικανοποιητική συμπεριφορά σε ψυχρή ροή, υψηλή θερμική σταθερότητα και υψηλό αριθμό κετανίων, ενώ παρουσιάζει χαμηλές εκπομπές καυσαερίων. Ωστόσο, το καύσιμο από HEFA έχει και αυτό αμελητέα ποσότητα αρωματικών ενώσεων που μπορεί να προκαλέσει συρρίκνωση σε ταλαιπωρημένα ελαστομερή σφραγίσματα και επακόλουθη διαρροή καυσίμου από κινητήρες τζετ. Η διαδικασία που γίνεται με τη μέθοδο αυτή περιλαμβάνει δύο μεγάλα καταλυτικά στάδια: την υδροαποξυγόνωση και τον ισομερισμό/υδροπυρόλυση.

Η μέθοδος HEFA απαιτεί μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης 50% σύμφωνα με το πρότυπο ASTM. Ωστόσο, η υψηλή θερμοδυναμική ικανότητα του βιοκαυσίμου από HEFA ενδεχομένως να δώσει στο μέλλον τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί δίχως προσμίξεις με συμβατικά καύσιμα. Το ενδεχόμενο μιας τέτοιας πιστοποίησης καθιστά τη μέθοδο δημοφιλή και πολλά υποσχόμενη (Shahriar & Khanal, 2022).

3. SIP

Η μέθοδος Synthesized Iso-Paraffinic SPK (στο εξής SIP) εγκρίθηκε τον Ιούνιο του 2014 με το Annex 3, και είναι γνωστή επίσης με τις ονομασίες DSHC (Direct Sugar to HydroCarbons) και DFSTJ (Direct Fermentation of Sugar to Jet) Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη το ζαχαροκάλαμο, το ζαχαρότευτλο, και ο αραβόσιτος (καλαμπόκι).

Μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης με συμβατικά καύσιμα, που ανέρχεται σε 10% (Shahriar & Khanal, 2022).

Η μέθοδος SIP περιλαμβάνει συνολικά έξι στάδια παραγωγής: προεπεξεργασία, ενζυματική υδρόλυση, διαχωρισμός του προϊόντος υδρόλυσης, βιολογική μετατροπή, υδροεπεξεργασία και τελικό καθαρισμό. Η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει τροποποίηση μαγιάς, με σκοπό τη μετατροπή της σακχαρικής πρώτης ύλης σε ένα μόριο υδρογονάνθρακα που

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

ονομάζεται φαρνεσένιο. Το φαρνεσένιο μπορεί να μετατραπεί σε jet καύσιμο αλλά και diesel αυτοκινήτων, αφού περάσει από υδροεπεξεργασία και αναμιχθεί με συμβατικό καύσιμο. Μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πραγματοποιείται σε μια δεξαμενή ζύμωσης, με αποτέλεσμα τους μικρούς χρόνους επεξεργασίας. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις καταλυτικές μεθόδους μετατροπής σακχάρων σε βιοκαύσιμα, στη μέθοδο SIP δεν απαιτείται χρήση χημικών καταλυτών ή χημικές αντιδράσεις με υψηλή πίεση και θερμοκρασία, γεγονός που εξοικονομεί χρόνο επεξεργασίας και οικονομικούς πόρους. Ωστόσο, το πιο σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η δημιουργία βιοκαυσίμου χαμηλού ενεργειακού φορτίου, κάτι που οφείλεται στις χαμηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας στη διαδικασία της ζύμωσης. Για το λόγο αυτό, το μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης βρίσκεται σε τόσο χαμηλά επίπεδα. (10%).

Σημαντικό δε, είναι πως προς το παρόν, η μεθανόλη, η αιθανόλη και η βουτανόλη είναι διαθέσιμες άμεσα και σε μεγάλες ποσότητες στο παγκόσμιο εμπόριο, γεγονός που προσφέρει μεγάλη ευελιξία στη μέθοδο SIP.

Εφόσον υπάρξει διαρκής μελέτη στη διαδικασία της ζύμωσης, η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει μια καλή εναλλακτική διαδικασία, με μεγαλύτερη συνεισφορά στο τελικό μείγμα καυσίμου (Shahriar & Khanal, 2022).

4. F-T SKA

Η μέθοδος Fischer-Tropsch SKA (Synthetic paraffinic Kerosine with Aromatics), αποτελεί προέκταση της μεθόδου Fischer-Tropsch SPK, και εγκρίθηκε το Νοέμβριο του 2015 με το Annex 4. Η διαδικασία μετατροπής σε βιοκαύσιμο είναι παρόμοια με την F-T, με τη διαφοροποίηση ότι προστίθενται οι απαραίτητες αρωματικές ενώσεις, τα οποία συνεισφέρουν στη στεγανοποίηση στο κύκλωμα μετάδοσης καυσίμου στα αεροσκάφη (Shahabuddin et al., 2020).

Η μέθοδος FT-SKA απαιτεί μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης 50%, όπως και στην αρχική F-T (Shahriar & Khanal, 2022).

5. ATJ

Η μέθοδος Alcohol To Jet (στο εξής ATJ) χρησιμοποιεί αλκοόλη ως πρώτη ύλη, η οποία προέρχεται από σακχαρούχα ή λιγνοκυτταρική βιομάζα, όπως σιτάρι καλαμποκιού, γρασίδι ή ζαχαροκάλαμο. Συνεπώς, ένα μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το ευρύ φάσμα πρώτων υλών για επεξεργασία. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM, δύο τύποι αλκοόλης έχουν

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

εγκριθεί ως τώρα για παραγωγή βιοκαυσίμου : η ισοβουτανόλη, που εγκρίθηκε με το Annex 5 τον Απρίλιο του 2016, και η αιθανόλη, που εισήλθε συμπληρωματικά στο Annex 5 δύο χρόνια αργότερα- τον Απρίλιο του 2018. Εδώ είναι σημαντικό να αναφερθεί πως, αναλόγως του είδους πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται, το κόστος της μεθόδου ATJ διαφοροποιείται αρκετά. Για παράδειγμα, το χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας παρουσιάζεται στο ζαχαροκάλαμο (20-30 ευρώ ανά κιλό), ακολουθούμενο από το σιτάρι καλαμποκιού (55-95 ευρώ ανά κιλό), με το γρασίδι να ακολουθεί ως η ακριβότερη η πρώτη ύλη (115-215 ευρώ ανά κιλό).

Στη διαδικασία ATJ, τα στάδια περιλαμβάνουν αρχικά τη πρώτη ύλη που υφίσταται επεξεργασία αφυδάτωσης, με σκοπό το σχηματισμό αλκενίων. Στη συνέχεια, οι αλκοόλες C1-C4 μετατρέπονται σε C2-C5 αλκένια, με τη χρήση καταλυτών ζεόλιθου και οξειδίων μετάλλων. Έπειτα με την αφυδάτωση, τα αλκένια υφίστανται διαδικασία ολιγομερισμού, παράγοντας ολεφίνες. Στη συνέχεια, με τη συνεισφορά υδρογόνου, το οποίο αποτελεί μια κοστοβόρα προσθήκη στη διαδικασία (υδρογόνωση), παράγονται παραφίνες. Οι παραφίνες υφίστανται κλασματοποίηση, δημιουργώντας το τελικό προϊόν βιοκαυσίμου (Shahriar & Khanal, 2022).

Το μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης και για τις δύο αυτές μεθόδους έχει οριστεί στο 50%.

6. CH

Η μέθοδος Catalytic Hydrothermolysis εγκρίθηκε από τον ASTM τον Φεβρουάριο του 2020, με το Annex 6. Αυτή η μέθοδος έχει ως πρώτη ύλη φυτικά έλαια που περιέχουν τριγλυκερίδια, όπως τα: *jatropha*, *carinata*, *camelina* και *tung oil*.

Αποτελείται από τρία στάδια επεξεργασίας: προεπεξεργασία, μετατροπή/υδροθερμόλυση και τέλος διύλιση. Οι πρώτες ύλες στο αρχικό στάδιο υφίστανται σύζευξη, κυκλοποίηση και διασύνδεση, με σκοπό τη βελτίωση της μοριακής τους δομής. Αφού γίνει πυρόλυση και υδρόλυση της πρώτης ύλης, στη συνέχεια το απαλλαγμένο οξέων λιπαρών έλαιο συνδυάζεται με προθερμασμένο νερό και διέρχεται από αντιδραστήρα καταλυτικής υδροθερμόλυσης. Η διαδικασία CH περιλαμβάνει επίσης στάδια αποκαρβοξυλίωσης και αφυδάτωσης, έχοντας ένα εύρος θερμοκρασίας 250 έως 380 °C και πίεσης 5 έως 30 MPa. Τα παραγόμενα προϊόντα περνούν από πυρόλυση, ισομερισμό και κυκλοποίηση, δημιουργώντας κ-αλκάνια, ισοαλκάνια, κυκλοαλκάνια και αρωματικά. Τα τελικά προϊόντα περνούν από ένα στάδιο κλασματοποίησης, για να παράγουν εν τέλει νάφθα, diesel και βιοκαύσιμο τζετ.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Στη μέθοδο CH απαιτείται μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης 50% σύμφωνα με το πρότυπο ASTM (Shahriar & Khanal, 2022).

7. HC-HEFA

Η μέθοδος **HC-HEFA** εγκρίθηκε σχετικά πρόσφατα από τον ASTM, με το Annex 7, το Μάιο του 2020. Η HC-HEFA αποτελεί συνέχεια και υποκατηγορία της μεθόδου HEFA, η οποία αναλύθηκε προηγουμένως. Η διαφορά των 2 μεθόδων όμως έγκειται στο γεγονός πως η HC-HEFA περιλαμβάνει υδροεπεξεργασία βιο-υδρογονανθράκων, σε αντίθεση με τη μέθοδο HEFA στην οποία υπόκεινται επεξεργασία λιπαρά οξέα ή εστέρες λιπαρών οξέων. Επί του παρόντος, η μέθοδος αυτή είναι σε αρχικό στάδιο, με μοναδική πρώτη ύλη βιο-υδρογονάνθρακα να αποτελούν τα τριτερπένια που προέρχονται από το είδος φύκιου *Botryococcus braunii*.

Τέλος, η μέθοδος HC-HEFA απαιτεί μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης 10% σύμφωνα με το πρότυπο ASTM (Shahriar & Khanal, 2022).

Μέθοδοι συν-επεξεργασίας (Coproprocessing)

Επιπρόσθετα των παραπάνω εγκεκριμένων μεθόδων, υπάρχουν 2 ακόμα διαδικασίες συνεπεξεργασίας, κατά τις οποίες η πρώτη ύλη βιομάζας επεξεργάζεται από κοινού με συμβατικά καύσιμα, ώστε να συμπληρωθεί το απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο που περιέχεται στα ορυκτά καύσιμα. Με τον τρόπο αυτό, εξοικονομείται ένα σημαντικό κόστος κεφαλαίου το οποίο επιφέρει η άμεση παραγωγή βιοκαυσίμων. Οι 2 διαδικασίες συνεπεξεργασίας, ωστόσο, δε θα πρέπει να θεωρούνται ως μια μέθοδος παραγωγής βιοκαυσίμων, όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά ένας συνδυασμός ανανεώσιμης πρώτης ύλης με ενδιάμεσα προϊόντα απόσταξης πετρελαίου, με τη διεργασία να γίνεται σε διυλιστήρια πετρελαίου. Επακόλουθα, η πιστοποίηση των προϊόντων αυτών δε γίνεται με το πρότυπο ASTM D7566 όπως τα υπόλοιπα βιοκαύσιμα, αλλά αναφέρονται ως τροποποίηση (amendment) στο πρότυπο ορυκτών αεροπορικών καυσίμων D1655. Το συνθετικό συνεπεξεργασμένο βιοκαύσιμο θα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές και των 2 προτύπων ASTM D7566 και D1655, αντίστοιχα (Shahriar & Khanal, 2022).

8. FOG Co-processing

Η μέθοδος Fats, Oils, and Grease Co-processing ή FOG Co-processing, αναφέρεται και ως Co-processed HEFA, και εγκρίθηκε με το Annex A1 του προτύπου ASTM D1655 τον Απρίλιο του 2018.

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη ελεύθερα λιπαρά οξέα και εστέρες λιπαρών οξέων, από έλαια τα οποία προέρχονται από φυτά και ζωικά λίπη. Η πρώτη ύλη υφίσταται υδροεπεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει υδροαποξυγόνωση και υδροπυρόλυση, σε ένα εύρος πίεσης κατά την αντίδραση 20 έως 110 bars, και θερμοκρασία 290 έως 400 °C. Η διαδικασία απαιτεί τη χρήση καταλυτών, συνήθως κοβαλτίου-μολυβδαινίου ή νικελίου-μολυβδαινίου.

Το μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης, επιπλέον, για αυτή τη διαδικασία είναι 5% (Shahriar & Khanal, 2022).

9. FT Co-processing

Η μέθοδος **FT Co-processing** εγκρίθηκε με το Annex A2 του προτύπου ASTM D1655 το Μάιο του 2020. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται το περιεχόμενο μη επεξεργασμένων υδρογονανθράκων από έναν FT αντιδραστήρα ως πρώτη ύλη, με σκοπό τη συνεπεξεργασία αυτών με πετρέλαιο, και διεργασία παρόμοια με τη μέθοδο F-T όπως αναλύθηκε προηγουμένως.

Η ανάμειξη, σήμερα, με το ορυκτό πετρέλαιο στο δυλιστήριο, γίνεται σε 3 διαφορετικά στάδια της διύλισης: είτε πριν την απόσταξη του πετρελαίου ή σε ενδιάμεσο στάδιο της διύλισης, είτε στο τέλος ως ολοκληρωμένο καύσιμο. Η τελευταία διαδικασία φαίνεται να είναι και η ασφαλέστερη για τη λειτουργία του δυλιστηρίου.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, ωστόσο, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως το υψηλό κόστος κεφαλαίου και οι ιδιαίτερες τεχνικές προκλήσεις, προτού υπάρξει οριστική έγκριση. Ειδικά για τέτοιες μεθόδους υπάρχει ιδιαίτερα περιορισμένη έρευνα, συνεπώς θα πρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά των δυλιστηρίων σε αυτές τις διαδικασίες, καθώς και οι συνδυασμοί πρώτης ύλης που μπορεί να χρησιμοποιηθούν.

Το μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης της μεθόδου είναι αρκετά χαμηλό, της τάξης του 5% (Shahriar & Khanal, 2022).

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Πίνακας 2 Εγκεκριμένες διαδικασίες μετατροπής βιοκαυσίμων (Πηγή: ICAO, 2021)

Πρότυπα ASTM	Μέθοδος επεξεργασίας	Συντομογραφία	Μέγιστη αναλογία πρόσμειξης %
ASTM D7566 Annex 1 (2009)	Fischer – Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene	FT	50
ASTM D7566 Annex 2 (2011)	Hydrotreated Ester and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene	HEFA	50
ASTM D7566 Annex 3 (2014)	Synthesized iso-paraffinic Synthetic Paraffinic Kerosene	SIP	10
ASTM D7566 Annex 4 (2015)	Fischer- Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosine with Aromatics	FT-SKA	50
ASTM D7566 Annex 5 (2016: Isobutanol) (2018: Ethanol)	Alcohol to Jet	ATJ	50
ASTM D7566 Annex 6 (2020)	Catalytic Hydrothermolysis	CH	50
ASTM D7566 Annex 7 (2020)	HydroCarbon-Hydroprocessed Esters and Fatty Acids	HC-HEFA	10
ASTM D1655 Annex A1 (2018)	Fats, Oils, Grease Co-processing	Co-processed HEFA	5
ASTM D1655 Annex A1 (2020)	Fischer- Tropsch Co-processing	Co-processed FT	5

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Τεχνοοικονομικά στοιχεία

Η Τεχνοοικονομική Ανάλυση είναι εξαιρετικά σημαντική στην αξιολόγηση οποιουδήποτε βιοκαυσίμου. Σε θεωρητικό επίπεδο, οποιοδήποτε προϊόν βιοκαυσίμου πληροί τα κριτήρια των δύο προτύπων του ASTM θα έπρεπε να θεωρείται ικανό προς χρήση στην αεροπορική βιομηχανία. Ωστόσο, υπάρχουν ιδιαίτερες δυσκολίες και περιορισμοί στην καθιέρωση των βιοκαυσίμων στον τομέα της αεροπλοΐας. Οι μελέτες για τη λειτουργία και των βιοκαυσίμων είναι ακόμη περιορισμένες, και απαιτείται περαιτέρω οικονομική έρευνα, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την ανταγωνιστικότητα των βιοκαυσίμων σε σχέση με την κηροζίνη.

Οικονομικοί δείκτες

Στην πλειοψηφία τους οι οικονομικές μελέτες για τα βιοκαύσιμα χρησιμοποιούν δείκτες όπως:

- ✓ τα κόστη επένδυσης ή εγκατάστασης,
- ✓ τα λειτουργικά κόστη και
- ✓ η ελάχιστη τιμή πώλησης.

Οι δείκτες αυτοί δίνουν μια αρχική εικόνα για τη μέθοδο παραγωγής βιοκαυσίμου και την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται στην έρευνα. Παρακάτω αναλύονται οι βασικοί οικονομικοί δείκτες για την αξιολόγηση των βιοκαυσίμων, οι οποίοι εξήχθησαν από αξιοσημείωτες οικονομικές μελέτες:

- Κόστος κεφαλαίου (CAPEX)

Για την αξιολόγηση μιας επένδυσης σε χρηματοοικονομικό επίπεδο, είναι πολύ σημαντικό να καθορίσουμε τα κόστη κεφαλαίου ή επένδυσης που προκύπτουν για την εγκατάσταση της παραγωγικής μονάδας (CAPital EXpenditure ή CAPEX). Το κόστος κεφαλαίου απαιτείται στην αρχή μιας επένδυσης, και περιλαμβάνει κόστος αγοράς εξοπλισμού και εγκατάστασης. Στην έρευνα των Pavlenko et al. (2019), έγινε αξιολόγηση του κόστους κεφαλαίου για διαφορετικές παραγωγικές μονάδες βιοκαυσίμου, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής που ακολουθούν.

Συγκεκριμένα, εξήχθησαν αποτελέσματα για το αρχικό κόστος επένδυσης (CAPEX), διατηρώντας σταθερή την ποσότητα παραγωγής για κάθε παραγωγική μονάδα, στα 60,77 εκ. γαλόνια για ένα έτος. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Πίνακας 3 Αποτελέσματα ενδεικτικής μελέτης με βάση το κόστος κεφαλαίου για τις διαφορετικές μεθόδους παραγωγής βιοκαυσίμων (Pavlenko et al., 2019)

ΜΕΘΟΔΟΣ- ΤΥΠΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	CAPEX (ΕΚΑΤ. ΔΟΛΑΡΙΑ)	ΠΑΡΑΓΩΓΗ (ΕΚ.ΓΑΛΟΝΙΑ/ΕΤΟΣ)	CAPEX/ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
HEFA	Έλαια	160,3	60,77	2,63
FT	απόβλητα	684,5	60,77	11,26
ATJ	ζάχαρη	415,4	60,77	6,83
ATJ	κυτταρίνη	641,2	60,77	10,55
SIP	-	292,5	16,12	18,14

Αρχικά, παρατηρούμε πως σε όλες τις μεθόδους παραγωγής, με χρήση διαφορετικής πρώτης ύλης για κάθε μέθοδο, διαφοροποιείται ελάχιστα το κόστος κεφαλαίου (Πίνακας 3). Εξαιρεση αποτελεί η μέθοδος ATJ, όπου χρησιμοποιώντας διαφορετική πρώτη ύλη, μεταβάλλεται σημαντικά το κόστος κεφαλαίου. Όπως γίνεται σαφές, η μέθοδος HEFA αποτελεί την πιο ενδιαφέρουσα, καθώς απαιτεί μόλις 160,3 εκ. δολάρια για την αγορά και εγκατάσταση εξοπλισμού της παραγωγικής μονάδας. Εν συνεχεία, ακολουθεί η μέθοδος ATJ με κόστος κεφαλαίου 415,4 και 641,2 εκ. δολάρια, με χρήση πρώτης ύλης ζάχαρη και κυτταρίνη, αντίστοιχα. Αμέσως μετά, ακολουθεί η μέθοδος FT με 684,5 εκ. δολάρια να απαιτούνται ως κόστος κεφαλαίου. Τελευταία παραγωγική διαδικασία σε κατάταξη έρχεται η μέθοδος SIP, με 292,5 εκ. δολάρια κόστος κεφαλαίου, αλλά πολύ μικρότερη παραγωγική δυναμικότητα συγκριτικά με τις προηγούμενες μεθόδους, έχοντας όμως παραγωγή βιοκαυσίμου μόλις 16,12 εκ. γαλόνια/έτος (Pavlenko et al., 2019).

- Λειτουργικό κόστος (OPEX)

Για την αξιολόγηση μιας επένδυσης σε χρηματοοικονομικό επίπεδο, είναι επίσης σημαντικό να υπολογίσουμε τα λειτουργικά κόστη που προκύπτουν από τις παραγωγικές λειτουργίες της μονάδας (OPerating EXpenditure ή OPEX).

Τα λειτουργικά κόστη αφορούν μεταβλητά κόστη που αυξάνονται όσο αυξάνεται και η ποσότητα παραγωγής, καθώς και σταθερά κόστη που σχετίζονται με τη λειτουργία μιας παραγωγικής μονάδας, όπως ενοικίαση χώρου, αμοιβές προσωπικού κ.α. Όσον αφορά τα λειτουργικά κόστη στις έρευνες, είναι εμφανές ότι επηρεάζονται άμεσα από το είδος της πρώτης

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

ύλης που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, κρατώντας σταθερή την ποσότητα παραγωγής στα 60,77 εκ. γαλόνια για ένα έτος με τη μέθοδο ATJ, η χρήση ως πρώτη ύλη αγροτικών καταλοίπων οδηγεί σε λειτουργικά έξοδα 117,31 εκ. δολάρια/έτος. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη ενεργειακές καλλιέργειες και καλαμπόκι οδηγούμαστε σε υψηλότερα λειτουργικά κόστη 131,1 και 181,71 εκ. δολάρια/έτος, αντίστοιχα (Pavlenko et al., 2019). Στη συνέχεια, θα πρέπει να συγκρίνουμε για κάθε μέθοδο τα λειτουργικά κόστη που προκύπτουν, εφόσον διατηρήσουμε σταθερή την παραγωγή αλλά και το είδος της πρώτης ύλης.

Όπως αναφέρθηκε, η μέθοδος ATJ παρουσιάζει λειτουργικά κόστη 117,31 εκ. δολάρια/έτος με χρήση αγροτικών καταλοίπων ως πρώτη ύλη. Με την ίδια πρώτη ύλη και ποσότητα παραγωγής, αντίστοιχα η μέθοδος FT απαιτεί λειτουργικά έξοδα ύψους 167,91 εκ. δολάρια/έτος (Pavlenko et al., 2019). Επιπρόσθετα, συγκρίνοντας εκ νέου τις παραπάνω μεθόδους με χρήση πρώτης ύλης ενεργειακών καλλιεργειών, παρατηρούμε πως η μέθοδος ATJ έχει χαμηλότερα λειτουργικά κόστη από τη μέθοδο FT, με τιμές 131,1 και 207,01 εκ. δολάρια/έτος, αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4. Τέλος, η μέθοδος HEFA παρουσιάζει μικρή απόκλιση στα λειτουργικά κόστη για διαφορετική πρώτη ύλη, σε ένα εύρος 167,91-181,71 εκ. δολάρια/έτος, έχοντας σαφέστατα υψηλότερα κόστη από τη μέθοδο ATJ και χαμηλότερα κόστη από τη μέθοδο FT (Pavlenko et al., 2019).

Στην περίπτωση, επομένως, του κόστους κεφαλαίου η σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων ήταν πιο εύκολη, ενώ για τα λειτουργικά έξοδα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για κάθε μέθοδο, εφόσον και στις 2 περιπτώσεις έχουμε θεωρήσει μια κοινή ποσότητα παραγωγής βιοκαυσίμου.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Πίνακας 4 Ενδεικτικά αποτελέσματα μελέτης με βάση τα λειτουργικά κόστη ανά μέθοδο παραγωγής βιοκαυσίμων (Pavlenko et al., 2019).

ΜΕΘΟΔΟΣ- ΤΥΠΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	ΟΡΕΧ (ΕΚΑΤ. ΔΟΛΑΡΙΑ)	ΠΑΡΑΓΩΓΗ (ΕΚ.ΓΑΛΟΝΙΑ ΑΝΑ ΕΤΟΣ)	ΟΡΕΧ/ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (ΔΟΛΑΡΙΑ/ΓΑΛΟΝΙ)
HEFA	Έλαια	167,91-181,71	60,77	2,76-2,99
FT	Ενεργειακές καλλιέργειες	207,01	60,77	3,4
FT	Αγροτικά υπολείμματα	167,91	60,77	2,76
ATJ	Αγροτικά υπολείμματα	117,31	60,77	1,93
ATJ	Ενεργειακές καλλιέργειες	131,1	60,77	2,15
ATJ	καλαμπόκι	181,71	60,77	2,99

- Ελάχιστη Τιμή Πώλησης Καυσίμου (MJSP)

Μία πολύ σημαντική παράμετρος για την Τεχνοοικονομική ανάλυση, είναι η Ελάχιστη Τιμή Πώλησης Καυσίμου Αεροσκαφών (MJSP: Minimum Jet Selling Price), η οποία καθορίζει τη μικρότερη τιμή στην οποία μπορεί να πωλείται ένα καύσιμο για αεροσκάφη, ώστε να επιτυγχάνεται εξασφάλιση της επένδυσης. Με άλλα λόγια ότι επιτυγχάνεται το “Νεκρό Σημείο” όπως λέγεται, στο οποίο με δεδομένη τιμή πώλησης καυσίμου, τα έσοδα από την πώληση του βιοκαυσίμου είναι ίσα με τα έξοδα.

Ο υπολογισμός της τιμής αυτής γίνεται με τη βοήθεια οικονομικών μεγεθών, όπως ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης μιας επένδυσης, το επιτόκιο αναγωγής κ.α. Όσο η τιμή αυτή προσεγγίζει την πραγματική τιμή πώλησης συμβατικών ορυκτών καυσίμων, τόσο πιο συμφέρουσα χαρακτηρίζεται η επένδυση για το εξεταζόμενο βιοκαύσιμο.

Σύμφωνα με σχετικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί στην διεθνή βιβλιογραφία, χρησιμοποιώντας διαφορετικές πρώτες ύλες καθώς και μεθόδους παραγωγής, παρατηρούνται διαφορετικές τιμές πώλησης με σημαντικές αποκλίσεις (Πίνακας 5). Όπως είναι λογικό, για την

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

ίδια μέθοδο παραγωγής και την ίδια πρώτη ύλη, όσο περισσότερο αυξάνουμε την παραγωγή, τόσο περισσότερο μειώνεται η Ελάχιστη Τιμή Πώλησης (οικονομίες κλίμακας). Παρακάτω αναλύονται οι τιμές πώλησης σε σύγκριση με την παραγόμενη ποσότητα βιοκαυσίμου από διαφορετικές μελέτες:

Με τη μέθοδο ATJ και πρώτη ύλη από το δέντρο λεύκα, επετεύχθη Ελάχιστη Τιμή 1,79 δολάρια ανά λίτρο βιοκαυσίμου με παραγωγή 20,07 εκατομμύρια γαλόνια σε ένα έτος. Αυξάνοντας την παραγωγή σε 50,19 εκατομμύρια γαλόνια η Ελάχιστη Τιμή μειώθηκε σε 1,4 δολάρια ανά λίτρο, ενώ για παραγωγή 100,38 εκ. γαλόνια/έτος είχαμε Τιμή 1,14 δολάρια/λίτρο (Crawford et al., 2016).

Επιπλέον, με χρήση της μεθόδου ATJ και πρώτη ύλη κόκκους καλαμποκιού και φύλλα καλαμποκιού, παρατηρήθηκε καλύτερη απόδοση στους κόκκους, με τιμή 1,11 δολάρια/λίτρο σε παραγωγή 39,64 εκ. γαλόνια/έτος, σε σχέση με τα φύλλα-απομεινάρια του καλαμποκιού, που είχαν τιμή 1,62 δολάρια/λίτρο και παραγωγή 27,61 εκ. γαλόνια/έτος (Tao, Markham, et al., 2017). Συνεπώς, συμπεραίνεται πως για παρόμοιας προέλευσης πρώτη ύλη -όπως για παράδειγμα από τον ίδιο καρπό αλλά διαφορετικό του τμήμα- υπάρχει εξίσου διαφορά στο κόστος και την παραγωγική δυναμικότητα.

Ακόμη, παρατηρούνται διαφορές όταν έχουμε ίδια μέθοδο με ίδια μορφή πρώτης ύλης, αλλά διαφορετικό ενδιάμεσο προϊόν στη διαδικασία. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι η μέθοδος ATJ με πρώτη ύλη το ζαχαροκάλαμο. Στο σενάριο της ισοβουτανόλης ως ενδιάμεσο προϊόν υπήρξε παραγωγή 42,8 εκ. γαλόνια/έτος με τιμή 0,68 δολάρια/λίτρο. Αντίθετα, με ενδιάμεσο προϊόν την αιθανόλη, υπήρξε παρόμοια παραγωγική δυνατότητα στα 36,98 εκ. γαλόνια/έτος, αλλά σχεδόν διπλάσια ελάχιστη τιμή πώλησης ύψους 1,17 δολάρια/λίτρο (Klein et al., 2018).

Σε άλλη έρευνα για τη μέθοδο HEFA διαπιστώθηκε διαφορά στην τιμή για διαφορετικές πρώτες ύλες. Σε σύγκριση με τις πρώτες ύλες από φοινικέλαιο και σογιέλαιο, το έλαιο από μακάουμπα (είδος φοίνικα), είχε την καλύτερη τιμή με 0,55 δολάρια/λίτρο, σε κλίμακα παραγωγής 68,16 εκ. γαλόνια/έτος (Klein et al., 2018).

Επιπλέον, ερευνήθηκε η μέθοδος HEFA με πρώτες ύλες το φυτό *jatropha*, την καμελίνα, το φυτό *penncress*, καστορέλαιο, και μαγειρικό λίπος όπου καμελίνα και το καστορέλαιο είχαν μεγάλη παραγωγική δυνατότητα με κάτι περισσότερο από 50 εκ. γαλόνια/έτος, αλλά η ελάχιστη τιμή πώλησης ήταν αρκετά υψηλή, στα 2,9 δολάρια/λίτρο για την καμελίνα και 2,49 δολάρια/λίτρο

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

για το καστορέλαιο. Τα μαγειρικά λίπη είχαν καλύτερα αποτελέσματα, με παραγωγή στα 50,4 εκ. γαλόνια/έτος και ελάχιστη τιμή 1,27 δολάρια/λίτρο. Το φυτό jatropha είχε χαμηλή τιμή στο 1 δολάριο/λίτρο, με παραγωγή 44 εκ. γαλόνια/έτος, ενώ τέλος, το φυτό pennycress είχε τιμή 1,7 δολάρια/λίτρο με παραγωγή 40,3 εκ. γαλόνια/έτος (Tao, Milbrandt, et al., 2017).

Εν συνεχεία, η μέθοδος FT, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό πρώτης ύλης από ζαχαροκάλαμο και ευκάλυπτο, εμφάνισε περιορισμένη δυνατότητα παραγωγής, στα 26,94 εκ. γαλόνια/έτος, αλλά εξαιρετικά χαμηλή ελάχιστη τιμή ύψους 0,36 δολάρια/λίτρο (Klein et al., 2018).

Σε μια άλλη μελέτη της μεθόδου FT, υπήρξε παραγωγή ύψους 60 εκ. γαλόνια/έτος, με πρώτες ύλες αστικά στερεά απόβλητα, αγροτικά υπολείμματα, διάφορες καλλιέργειες, και τιμές 1,53, 1,98 και 2,15 δολάρια/λίτρο, αντίστοιχα (Pavlenko et al., 2019).

Επί του παρόντος, η μέθοδος SIP παρουσιάζει τα λιγότερο ευνοϊκά αποτελέσματα από τις υπόλοιπες, αφού για παραγωγή βιοκαυσίμου μόλις στα 16,12 εκ. γαλόνια/έτος υπολογίστηκε μια αρκετά υψηλή τιμή πώλησης στα 3,82 δολάρια/λίτρο, χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη το ζαχαροκάλαμο. Εμφανώς καλύτερα ήταν τα αποτελέσματα με χρήση ως πρώτη ύλη αγροτικών υπολειμμάτων, με τιμή στα 2,17 δολάρια/λίτρο για παραγωγή ύψους 30,12 εκ. γαλόνια/έτος (Klein et al., 2018). Ωστόσο, και στη δεύτερη περίπτωση η διαφορά της ελάχιστης τιμής για τη μέθοδο SIP είναι αρκετά σημαντική σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές MJSP, με αναγωγή σε δολάρια ανά γαλόνι:

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Πίνακας 5 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μελετών για την Ελάχιστη τιμή Πώλησης Καυσίμου

Μέθοδος-τύπος	Είδος Βιομάζας	MJSP (δολάρια/λίτρο)	Παραγωγή (εκ. γαλόνια/έτος)	MJSP (δολάρια/γαλόνι)
HEFA	Μακάουμπα	0,55	68,16	2,1
HEFA	Jatropha	1	44	3,8
HEFA	Καμελίνα	2,9	50	11
HEFA	Pennycress	1,7	40,3	6,4
HEFA	Καστορέλαιο	2,49	50	9,4
HEFA	Μαγειρικό λίπος	1,27	50,4	4,8
FT	Ζαχαροκάλαμο, ευκάλυπτος	0,36	26,94	1,36
FT	Αστικά απόβλητα	1,53	60	5,8
FT	Αγροτικά υπολείμματα	1,98	60	7,5
FT	Διάφορες καλλιέργειες	2,15	60	8,1
ATJ	λεύκα	1,79	20,07	6,7
ATJ	λεύκα	1,4	50,19	5,3
ATJ	λεύκα	1,14	100,38	4,3
ATJ	Καλαμπόκι (κόκκοι)	1,11	39,64	4,2
ATJ	Καλαμπόκι (υπολείμματα)	1,62	27,61	6,1
ATJ	Ζαχαροκάλαμο (ισοβουτανόλη)	0,68	42,8	2,57
ATJ	Ζαχαροκάλαμο (αιθανόλη)	1,17	39,68	4,42
SIP	Ζαχαροκάλαμο	3,82	16,12	14,4
SIP	Αγροτικά υπολείμματα	2,17	30,12	8,2

Σύνοψη των οικονομικών στοιχείων-Παραδοχές

➤ FT

Η μέθοδος FT απαιτεί γενικότερα υψηλότερο κόστος κεφαλαίου από τις μεθόδους HEFA και ATJ, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ωστόσο, ιδιαίτερης σημασίας είναι το γεγονός ότι το κόστος κεφαλαίου ανά ποσότητα βιοκαυσίμου που παράγεται μειώνεται, όσο αυξάνουμε την παραγωγική δυνατότητα της μονάδας. Σε μελέτη των Jong et. al. (2015), υπολογίστηκε το κόστος κεφαλαίου ανά γαλόνι βιοκαυσίμου της παραγωγικής μονάδας, με αποτέλεσμα 15,09-15,48 δολάρια/γαλόνι, για μια παραγωγική δυνατότητα περίπου στα 41 εκ. γαλόνια ανά έτος. Στην έρευνα των Pavlenko et. al. (2019), το κόστος κεφαλαίου ανά παραγωγική δυνατότητα ήταν χαμηλότερο, στα 11,26 δολάρια/γαλόνι. Στη μελέτη αυτή, υπήρξε αρκετά χαμηλό λειτουργικό κόστος, 1,06 δολάρια ανά γαλόνι, με χρήση στερεών αποβλήτων, ενώ ήταν υψηλότερο στα 2,76 και 3,4 δολάρια ανά γαλόνι με χρήση αγροτικών υπολειμμάτων και ενεργειακών καλλιεργειών, αντίστοιχα. Ωστόσο, το κόστος κεφαλαίου ήταν αρκετά υψηλό στα 684,5 εκ. δολάρια.

Συνοψίζοντας, θα λέγαμε πως η μέθοδος FT έχει κατά μέσο όρο χαμηλά κόστη για τη λειτουργία των παραγωγικών μεθόδων, ωστόσο, θα πρέπει να υπάρξει περαιτέρω μελέτη και έρευνα ώστε να μειωθούν τα αρχικά κόστη επένδυσης για μια μονάδα παραγωγής βιοκαυσίμου με μεθόδους FT.

➤ HEFA

Η μέθοδος παραγωγής HEFA είναι ενδεχομένως η πιο ώριμη τεχνολογικά από τις υπάρχουσες μεθόδους καθώς βασικό της πλεονέκτημα είναι το χαμηλό κόστος επένδυσης που απαιτείται για τη δημιουργία παραγωγικής μονάδας. Στην έρευνα των Pavlenko et. al. (2019), υπολογίστηκε αρχικό κόστος επένδυσης μόλις στα 2,64 δολάρια ανά γαλόνι που μπορεί να παράγει η μονάδα, με παραγωγική δυναμικότητα στα 60,77 εκ. γαλόνια/έτος και πρώτη ύλη το φοινικέλαιο. Για την ίδια παραγωγική ποσότητα, οι μέθοδοι FT και ATJ είχαν κόστη επένδυσης ανά γαλόνι παραγωγής 11,26 δολάρια και 6,83-10,55 δολάρια αντίστοιχα. Μάλιστα, αναλύοντας τα επιμέρους κόστη που απαιτεί το κόστος επένδυσης μιας HEFA παραγωγικής μονάδας, σχεδόν το 50% αποτελείται από το κόστος της μονάδας επεξεργασίας υδρογόνου. Αναφορικά με τα λειτουργικά κόστη της μεθόδου HEFA, κινούνται στο εύρος 2,76-2,99 δολάρια ανά γαλόνι, ελάχιστα χαμηλότερα της μεθόδου FT που είχε, σύμφωνα με την ίδια έρευνα, λειτουργικά κόστη 2,76-3,4 δολάρια ανά γαλόνι.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

➤ ATJ

Η μέθοδος ATJ έχει χαμηλότερη απήχηση από τις άλλες 2 μεθόδους, ωστόσο παρουσιάζει ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Για την ίδια παραγωγική ποσότητα στα 60,77 εκ. γαλόνια σε χρονικό ορίζοντα ενός έτους, η μέθοδος ATJ παρουσιάζει αρχικό κόστος επένδυσης υψηλότερο από τη μέθοδο HEFA και χαμηλότερο από τη μέθοδο FT. Σε συσχέτιση με την παραγωγική δυναμικότητα, η μέθοδος ATJ απαιτεί 6,83-10,55 δολάρια ανά γαλόνι παραγωγής, με λειτουργικά κόστη 1,9 έως 2,9 δολάρια ανά γαλόνι, σχετικά χαμηλότερα κατά μέσο όρο από τις μεθόδους FT και HEFA (Kandaramath Hari et al., 2015).

➤ SIP

Η μέθοδος SIP αποτελεί εγκεκριμένη μέθοδο μέσω του προτύπου ASTM, ωστόσο σε αυτή τη λύση οι μελέτες είναι ακόμη πιο περιορισμένες. Σε μία από τις λίγες έρευνες που έχουν διεξαχθεί, η χρήση ζαχαροκάλαμου ως πρώτη ύλη περιορίζει την παραγωγική δυναμικότητα στα 15,32 εκ. γαλόνια σε ένα έτος. Το κόστος επένδυσης ανά γαλόνι παραγωγής ανέρχεται στα 14,9 δολάρια ανά γαλόνι, ενώ τα λειτουργικά κόστη ανέρχονται σε 19,75 δολάρια ανά γαλόνι (de Jong et al., 2015). Για τη μέθοδο SIP απαιτείται περισσότερη μελέτη για ασφαλέστερα ως προς τα κόστη χρήσης της μεθόδου, τα οποία φαίνονται αρκετά υψηλά, ενώ μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το ποσοστό πρόσμιξης με συμβατικά καύσιμα, με μέγιστο στο 10%.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Ενεργειακή απόδοση

Το κόστος για την παραγωγή βιοκαυσίμων, αποτελεί αυτή τη στιγμή το σημαντικότερο αποτρεπτικό παράγοντα για τις αεροπορικές εταιρίες καθώς και τις εταιρίες παραγωγής καυσίμων, ώστε να επενδύσουν στα βιοκαύσιμα. Αφενός, το κόστος της πρώτης ύλης είναι το πρώτο στοιχείο το οποίο θα καθορίσει κατά πόσο μια διαδικασία παραγωγής βιοκαυσίμων θεωρείται επικερδής και βιώσιμη. Αφετέρου, θα πρέπει να εξεταστούν κόστη όπως το κόστος κεφαλαίου/επένδυσης και τα λειτουργικά κόστη από τη λειτουργία μιας παραγωγικής μονάδας (συνήθως ετήσια) κ.α.

Ωστόσο, θα πρέπει να εξετάσουμε και την ενεργειακή απόδοση κάθε μεθόδου ξεχωριστά, είτε στο πλαίσιο της παραγωγικής διεργασίας ως ποσότητα παραγωγής βιοκαυσίμου ανά ποσότητα πρώτης ύλης, είτε ως ποσότητα ενέργειας που εξάγεται από τη διεργασία ανά ποσότητα ενέργειας που εισάγεται. Σύμφωνα με μελέτες των Wei H et al. (2019), de Jong S. (2017) και Pavlenko et al. (2019), οι μέθοδοι παραγωγής HEFA, FT, ATJ και SIP μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις δύο παραπάνω παραμέτρους ως εξής (Πίνακας 7):

Πίνακας 6 Πίνακας αποδοτικότητας των πιο κοινών μεθόδων παραγωγής βιοκαυσίμων.

Μέθοδος Παραγωγής SAF	Απόδοση διεργασίας TONfuel/TONfeedstock	Ενεργειακή απόδοση GJoutput/GJinput
HEFA	0,75 - 0,83	0,71 - 0,77
FT	0,13 - 0,22	0,91
ATJ	0,56	0,40 - 0,53
SIP	0,17	0,50

Από τα εξαγόμενα στοιχεία, συμπεραίνεται πως η μέθοδος HEFA παρουσιάζει υψηλή αποδοτικότητα και στους δύο δείκτες, με τιμές που κυμαίνονται στο εύρος 75-83%, αξιολογώντας την ως την πιο συμφέρουσα από τις τέσσερις που εξετάζονται. Στη συνέχεια, ακολουθεί η μέθοδος FT, η οποία, ενώ παρουσιάζει τον υψηλότερο δείκτη ενεργειακής απόδοσης ίσο με 91%, εντούτοις έχει πολύ χαμηλό δείκτη απόδοσης διεργασίας, παράγοντας 13 έως 22 τόνους καυσίμου (συμπεριλαμβάνοντας επιπλέον προϊόντα όπως diesel, gasoline κ.α.), για κάθε 100 τόνους πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται. Ακολουθεί ως τρίτη σε κατάταξη η μέθοδος ATJ, με τους δύο δείκτες της μεθόδου να κυμαίνονται στο εύρος 40-56%. Τέλος, η μέθοδος SIP δείχνει η λιγότερο αποδοτική, με απόδοση διεργασίας 17% και ενεργειακή απόδοση 50% (Wei et al., 2019).

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Εκπομπές αερίων (Life Cycle Assessment)

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η περιβαλλοντική συνεισφορά των βιοκαυσίμων. Παρά το γεγονός ότι απαιτούνται μεγάλα βήματα για τη μείωση του κόστους παραγωγής των βιοκαυσίμων, τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση τους θα μπορούσαν να μετριάσουν σε μεγάλο βαθμό τα φαινόμενα της κλιματικής αλλαγής. Η επίδραση των βιοκαυσίμων στη μείωση των ρυπογόνων εκπομπών μετριέται σε γραμμάρια ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα ενέργειας που εκλύεται, περιλαμβάνοντας όχι μόνο την καύση του αναφερόμενου καυσίμου, αλλά και τις εκπομπές κατά τη διαδικασία παραγωγής του (g CO₂ eq/MJ).

Σύμφωνα με τον ICAO, οι εκπομπές αερίων για ένα βιοκαύσιμο θα πρέπει να αναλύονται σε έναν ορίζοντα ευρύτερο, που ονομάζεται Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA= Life Cycle Assessment). Το LCA υπολογίζεται αθροίζοντας δύο ποσά εκπομπών αερίων, ως εξής:

$$\text{SAF Life Cycle emission value} = \text{core LCA value} + \text{Induced Land Use Change.}$$

Το core LCA value ισούται με το άθροισμα των εκπομπών οι οποίες σχετίζονται με όλα τα στάδια παραγωγής ενός βιοκαυσίμου, και αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

1. Καλλιέργεια πρώτης ύλης
2. Επεξεργασία, συλλογή πρώτης ύλης
3. Μεταφορά πρώτης ύλης σε μονάδες παραγωγής
4. Μετατροπή σε βιοκαύσιμο
5. Μεταφορά και διανομή βιοκαυσίμου
6. Χρήση σε αεροσκάφη/καύση

Ο παράγοντας ILUC αποτελείται από τις εκπομπές αερίων λόγω της πιθανής μεταβολής που υφίσταται το έδαφος από την καλλιέργεια και εξαγωγή της πρώτης ύλης. Σε αρκετές μελέτες για τις εκπομπές ενός βιοκαυσίμου ο παράγοντας αυτός είτε αγνοείται λανθασμένα, είτε είναι δύσκολο να υπολογιστεί, οπότε αναφέρεται ως αντικείμενο που χρήζει περαιτέρω μελέτης στο μέλλον.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Αναφορικά με τα βιοκαύσιμα, οι ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εξαρτώνται από τη μέθοδο παραγωγής βιοκαυσίμου, τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη, την ενεργειακή απόδοση που επιτυγχάνεται κατά τη μετατροπή, καθώς και το ποσοστό μετατροπής πρώτης ύλης σε όγκο ή μάζα. Στον πίνακα 7 φαίνονται συγκεντρωτικά οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για κάθε μέθοδο παραγωγής βιοκαυσίμου, στη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

Επιπλέον, είναι χρήσιμο να θέσουμε μια βάση αναφοράς, εν προκειμένω στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τα συμβατικά καύσιμα, ώστε να υπάρξει σαφέστερη εικόνα σύγκρισης για κάθε μέθοδο παραγωγής ξεχωριστά. Οι εκπομπές για τα συμβατικά καύσιμα έχουν υπολογιστεί κατά μέσο όρο στα 90 g CO₂ eq/MJ (πίνακας 7). Όπως είναι λογικό, όλες οι μέθοδοι παραγωγής βιοκαυσίμων παρουσιάζουν χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Επί του παρόντος, η μέθοδος FT παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση στο πλαίσιο του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, έχοντας ένα εύρος 3,6-22 g CO₂ eq/MJ (Klein et al., 2018). Το γεγονός αυτό κατά κύριο λόγο οφείλεται στη χρήση λιγνοκυτταρικής βιομάζας ως πρώτη ύλη, η οποία οδηγεί σε χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στον αντίποδα, η μέθοδος HEFA παρουσιάζει τις αμέσως υψηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με εύρος 16,5-47 g CO₂ eq/MJ (de Jong et al., 2017), κάτι που εξηγείται από τη χρήση βιομάζας κυρίως από την κατηγορία των ελαίων, τα οποία έχουν χειρότερες περιβαλλοντικές συνέπειες. Εν συνεχεία, η μέθοδος ATJ παρουσίασε μεγάλη διακύμανση στις εκπομπές αερίων, με εύρος 1,6-89,8 g CO₂ eq/MJ. Γενικότερα, στις περιπτώσεις της αιθανόλης εμφανίστηκαν υψηλότερες τιμές εκπομπών, συγκριτικά με τη χρήση ισοβουτανόλης, όπου οι εκπομπές ήταν χαμηλότερες. Το μεγάλο εύρος στις εκπομπές στη μέθοδο ATJ οφείλεται στις διαφορετικές αποδόσεις της μεθόδου καθώς και στα διαφορετικά υποπροϊόντα που παράγονται κατά τη διαδικασία παραγωγής (Staples et al., 2014). Τέλος, για τη μέθοδο SIP έχουμε τις λιγότερες πληροφορίες από τις 4 μεγάλες κατηγορίες παραγωγής που αναφέρονται, με τις μόλις τρεις έρευνες που εξέτασαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεθόδου να κινούνται σε ένα εύρος 15-80 g CO₂ eq/MJ.

Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη μέθοδο ώστε να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα για το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα (de Jong et al., 2017). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για κάθε μέθοδο:

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Πίνακας 7 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των πιο κοινών μεθόδων παραγωγής βιοκαυσίμου σε σχέση με την κηροζίνη

Μέθοδος βιοκαυσίμου	Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (g CO ₂ eq/MJ)	Ποσοστό μείωσης εκπομπών %
HEFA	16,5-47	48-82
FT	3,6-22	75-96
ATJ	1,6-89,8	0-98
ATJ	15-80	11-83
Κηροζίνη		90

Κατανάλωση νερού

Παράλληλα με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κατά την επεξεργασία των πρώτων υλών και τη δημιουργία βιοκαυσίμων, απαιτείται η κατανάλωση σημαντικών ποσοτήτων νερού, στοιχείο που θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στην αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδρασης ενός βιοκαυσίμου.

Σε μελέτη των Cox et al. (2014), μελετήθηκε η χρήση νερού στη μέθοδο HEFA με χρήση ελαίου μικροφυκιών και ελαίου ινδικής οξιάς (rongamia) ως πρώτες ύλες. Στη μελέτη αναπτύχθηκαν δύο σενάρια: στο πρώτο υπήρξε αναγωγή στο προϊόν βιοκαυσίμου που παρήχθη, ενώ στο δεύτερο υπήρξε καταγραφή κατανάλωσης νερού με επέκταση σε όλη τη διαδικασία παραγωγής καθώς και στα ενδιάμεσα υποπροϊόντα της διαδικασίας, εξάγοντας μεγαλύτερες τιμές κατανάλωσης. Στο πρώτο σενάριο, με πρώτη ύλη έλαιο μικροφυκιών και έλαιο ινδικής οξιάς, είχαμε κατανάλωση νερού 6,4 και 5,5 κυβικά μέτρα ανά GJ παραγόμενης ενέργειας, αντίστοιχα. Στο δεύτερο σενάριο, υπήρξαν υψηλότερες τιμές, στα 13,9 και 11,8 κυβικά μέτρα ανά GJ, αντίστοιχα. Για τη μέθοδο SIP, χρησιμοποιώντας ζαχαροκάλαμο ως πρώτη ύλη, η ίδια μελέτη υπολόγισε κατανάλωση νερού 15,6 και 147 κυβικά μέτρα ανά GJ για τα δύο σενάρια, ενώ οι Staples et al. (2013), επίσης με χρήση ζαχαροκάλαμου, υπολόγισαν κατανάλωση νερού 71,73 και 86,57 κυβικά μέτρα ανά GJ, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, στην ίδια έρευνα χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες γρασίδι και καλαμπόκι. Το γρασίδι υπολογίστηκε πως απαιτεί σε κατανάλωση νερού για τα δύο σενάρια 92,39 και 104,74 κυβικά μέτρα ανά GJ, ενώ το καλαμπόκι απαιτήσε ποσότητα 76,46 και 85,81 κυβικά μέτρα ανά GJ, αντίστοιχα. Με τη μέθοδο HEFA ασχολήθηκαν, επιπλέον,

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

στην έρευνά τους οι Diniz et al. (2018), υπολογίζοντας ότι απαιτούνται 5 χιλιάδες λίτρα νερού ανά ώρα παραγωγικής λειτουργίας, για κάθε τόνο ελαίου που χρησιμοποιείται στην παραγωγική διαδικασία. Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες έλαια από καμελίνας, καρινάτας και φυτού *jatropha*, έχοντας και τα τρία εξ αυτών τα ίδια αποτελέσματα (Πίνακας 8).

Όπως είναι λογικό, οι μονάδες παραγωγής θα πρέπει να βρουν τρόπους εξοικονόμησης νερού κατά τη διαδικασία παραγωγής. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να υπάρξει μέριμνα ώστε να επιτυγχάνεται ψύξη στις μονάδες παραγωγής με εναλλακτικούς τρόπους, και όχι με χρήση νερού. Επιπλέον, μια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων θα μπορούσε να επεξεργάζεται το χρησιμοποιούμενο νερό με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή του.

Σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία, 3,6 δις άτομα παγκοσμίως αντιμετωπίζουν δυσκολία στην πρόσβαση σε καθαρό νερό για διάρκεια τουλάχιστον ενός μήνα ετησίως. Το νούμερο αυτό προβλέπεται να φτάσει τα 5 δις έως το 2050 (Taalas, 2023).

Πίνακας 8 Στοιχεία κατανάλωσης νερού βασικών μεθόδων παραγωγής καυσίμων αεροσκαφών

Μέθοδος Παραγωγής Καυσίμου	Πρώτη Ύλη	Κατανάλωση Νερού m ³ /GJ	Κατανάλωση Νερού kL/h/Ton,oil
HEFA	Έλαιο μικροφυκιών	6,4-13,9	-
	Έλαιο ινδικής οξιάς	5,5-11,8	-
	Καμελίνα	-	5
	Καρινάτα	-	5
	<i>Jatropha</i>	-	5
SIP	Ζαχαροκάλαμο	15,6-147	-
	Ζαχαροκάλαμο	71,73-86,57	-
	Γρασίδι	92,39-104,74	-
	Καλαμπόκι	76,46-85,81	-

Πολιτικές Προώθησης Εναλλακτικών καυσίμων

Όλες οι παραπάνω προσπάθειες έρευνας και αντικατάστασης των συμβατικών καυσίμων γίνονται όπως έχει αναφερθεί στα πλαίσια της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τον αεροπορικό τομέα, ώστε να οριστούν σταδιακά οι βάσεις για την μείωση της περιβαλλοντικής μόλυνσης.

Για να συνοψίσουμε τις επίσημες κινήσεις που είχαν γίνει χρονικά μέχρι τώρα από φορείς και οργανισμούς, μπορούμε να επικεντρωθούμε στους εξής σημαντικούς σταθμούς αποφάσεων:

- Το 2010, με την 37η Συνεδρίαση του ICAO αποφασίζεται η δημιουργία ενός πλαισίου για τις επιτρεπόμενες ποσότητες εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες θα πρέπει να εφαρμόζονται στη σύγχρονη αεροπλοΐα.
- Το 2012 τίθεται η οδηγία για περιορισμό των εκπομπών κατά το ήμισυ συγκριτικά με το έτος 2005 για την χρονική περίοδο 2020-2050, έχοντας την πλήρη υποστήριξη της IATA.
- Το 2016, ο ICAO συμφωνεί στην δημιουργία ενός νέου GMBM (Global Market Based Measure) για την τήρηση ορισμένων στόχων έως το έτος 2020.

Επιπλέον, είναι ουσιαστικό να αναφερθεί πως και εκτός ΕΕ, η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος, στις Η.Π.Α., επεδίωξε τη σύμπραξή της με τον ICAO, ώστε να δημιουργηθούν κανόνες για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, από την χρήση συμβατικών καυσίμων στους αεροπορικούς κινητήρες (Κοράκης, 2021).

- Η Διεθνής Ένωση Αεροπορικών Μεταφορών (IATA) έχει δεσμευτεί να επιτύχει ανάπτυξη ουδέτερη ως προς τον άνθρακα από το 2020 και 50% συνολική μείωση των εκπομπών CO₂ έως το 2050³.
- Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) έχει αναπτύξει ένα σχέδιο αντιστάθμισης και μείωσης άνθρακα για τη διεθνή αεροπορία (CORSIA). Ο ICAO

³ [Council and Parliament agree to decarbonise the aviation sector \(press release, 25 April 2023\)](https://www.consilium.europa.eu), βλ. ηλεκτρονικές πηγές (<https://www.consilium.europa.eu>)

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

έθεσε τον φιλόδοξο στόχο της μείωσης των εκπομπών GHG κατά 50% έως το 2050 (σε σύγκριση με το 2005). Το σχέδιο CORSIA στοχεύει να εφαρμόσει ότι κάθε αεροπορική εταιρεία πρέπει να αντισταθμίζει τις εκπομπές της, πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο βάσης. Μια πρώτη πιλοτική φάση ξεκίνησε το 2021 και προγραμματίζεται μέχρι το 2023, ακολουθούμενη από μια εθελοντική φάση από το 2024-2026 και, τέλος, μια υποχρεωτική φάση εφαρμογής από το 2027-2035. Στόχος αυτού του προγράμματος είναι να αντισταθμίσει το 80% της αύξησης της εναέριας κυκλοφορίας μετά το 2020.

- Άλλα έργα και πρωτοβουλίες, όπως το «Bioport Holland»⁴ ή η IATA στοχεύουν επίσης στη στήριξη της παραγωγής SAF στην Ευρώπη (ICAO, 2013-2019). Π.χ. Η IATA εισήγαγε τρεις στόχους εκπομπών για ολόκληρη την αεροπορική βιομηχανία. Ένας βασικός από αυτούς είναι και η μείωση των καθαρών εκπομπών στο μισό έως το 2050 σε σύγκριση με το 2005⁵.

⁴ 'Bioport for Jet Fuels in the Netherlands' (Bioport Holland): συνεργάτες/προμηθευτές από τον τομέα των βιοκαυσίμων και των αερομεταφορών που έχουν δεσμευτεί να προωθήσουν τη μετάβαση από μεμονωμένα έργα στη συνεχή παραγωγή και προμήθεια βιώσιμων καυσίμων αεροσκαφών στην Ολλανδία και την Ευρώπη, με στόχο την αναβάθμιση της ανάπτυξης βιώσιμων βιοκαυσίμων στον τομέα των αερομεταφορών.

⁵ Βλ. πηγές ETIP BIOENERGY- European technology and innovation platform

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

στον τομέα των αερομεταφορών και έχουν δημιουργηθεί πλέον αρκετές πρωτοβουλίες, με τα εξής ουσιώδη σημεία:

- Ο συντονισμός των προγραμμάτων RED II⁸ και CORSIA θα είναι ζωτικής σημασίας για τον τομέα των αερομεταφορών καθώς βασικά στοιχεία και των δύο πολιτικών είναι ο ορισμός των ελάχιστων κριτηρίων βιωσιμότητας και τον τρόπο με τον οποίο θα διασφαλίζονται και πιστοποιούνται. Ορισμένα κράτη μέλη μάλιστα ήδη ανακοίνωσαν τα υποχρεωτικά μέτρα- εντολές για τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων. Επιπλέον, ο όγκος των εναλλακτικών καυσίμων που παράγονται θα πρέπει να καταχωρούνται, και να λογιστικοποιούνται και στα δύο, RED II και CORSIA⁹, καθώς ο υπολογισμός της εξοικονόμησης διοξειδίου του άνθρακα χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στις μετρήσεις εφόσον υπάρχουν διαφορές στην καταμέτρηση εκπομπών ανά κράτος. Πρέπει να διασφαλιστεί ότι η ένταξη αυτών των δύο συστημάτων στη νομοθεσία των κρατών μελών το λαμβάνει αυτό υπόψη, ώστε να αποφευχθούν συγκρούσεις στην καταμέτρηση ανθρακικού αποτυπώματος στο μέλλον. Ωστόσο, οι απαιτήσεις μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου είναι αρκετά διαφορετικές στο πως ορίζονται ακόμη μεταξύ τους (10% για την CORSIA, 65% για το RED II).
- Η Ομάδα Υψηλού Επιπέδου (High Level Group) για την Έρευνα στην Αεροπορία της ΕΕ θέτει φιλόδοξους στόχους, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης κατά 75% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της μείωσης κατά 90 % των εκπομπών NO_x¹⁰ ανά επιβάτη ανά χιλιόμετρο το 2050. Το ίδιο έγγραφο υποστηρίζει επίσης

⁸ Το σχέδιο RED II (Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001) ορίζει μια σειρά κριτηρίων βιωσιμότητας και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με τα οποία πρέπει να συμμορφώνονται τα βιορευστά που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές για να συνυπολογίζονται στον συνολικό στόχο μείωσης τους και να είναι επιλέξιμα για οικονομική στήριξη από τις δημόσιες αρχές

⁹ Το σχέδιο CORSIA αφορά ουσιαστικά ένα σύστημα αντιστάθμισης του αποτυπώματος του άνθρακα, ενώ το RED II προωθεί την απορρόφηση περισσότερης ανανεώσιμης ενέργειας.

¹⁰Nitrogen Oxides (NO_x): Αυτά τα αέρια σχηματίζονται όταν καύσιμο καίγεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ρύπανση των NO_x εκπέμπεται από αυτοκίνητα, φορτηγά και διάφορα μη οδικά οχήματα (π.χ. εξοπλισμός κατασκευών, βάρκες κ.λπ.) καθώς και από βιομηχανικές πηγές όπως μονάδες παραγωγής ενέργειας, βιομηχανικοί λέβητες, κλιβάνοι τσιμέντου και τουρμπίνες. Συχνά εμφανίζονται ως καφετί αέριο στην ατμόσφαιρα. Βλ. βιβλιογραφία European Environment Agency (EEA)

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

ότι η Ευρώπη πρέπει να καθιερωθεί ως πρότυπο κέντρο βιώσιμων εναλλακτικών καυσίμων, στη βάση μιας ισχυρής ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής.

- Το 2011, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, σε συντονισμό με αεροπορικές εταιρείες και παραγωγούς βιοκαυσίμων, ξεκίνησε την πρωτοβουλία «European Advanced Biofuels Flightpath» ως οδικό χάρτη για την παραγωγή 2 εκατομμυρίων τόνων εναλλακτικών καυσίμων ετησίως έως το 2020. Η πρωτοβουλία Flightpath υποστηρίζει και προωθεί την παραγωγή, αποθήκευση και διανομή των SAF. Ωστόσο, ο στόχος παραγωγής, όπως φάνηκε, δεν εκπληρώθηκε. Ως μεγαλύτερα εμπόδια φάνηκαν να είναι τα οικονομικά, θέματα πολιτικής και αγοράς.

Ενδιαφέροντα σημεία της πολιτικής προώθησης της Ευρωπαϊκής Κομισιόν που αναφέρονται στη πρωτοβουλία ReFuelEU Aviation (European Federation for Transport and Environment, 2022) είναι πως:

- Αποκλείει τη χρήση βιοκαυσίμων με βάση τις καλλιέργειες τροφίμων και ζωοτροφών, τα οποία έχουν υψηλότερο προφίλ εκπομπών από τα ορυκτά καύσιμα και προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και τις τοπικές κοινωνίες.
- Η εντολή ισχύει για όλα τα καύσιμα που πωλούνται στα αεροδρόμια της ΕΕ, επομένως καλύπτει όλες τις πτήσεις, συμπεριλαμβανομένου των πτήσεων μεγάλων αποστάσεων (Η κάλυψη όλων των πτήσεων εντός και αναχωρούντων από την ΕΕ αποτελεί σημαντική διάκριση από άλλα μέτρα για το κλίμα που έχουν υιοθετηθεί μέχρι σήμερα, όπως το ETS¹¹, τα οποία καλύπτουν μόνο πτήσεις εντός της ΕΕ (λιγότερο από το 40% των εκπομπών))

¹¹ “ETS”: Emissions trade system (μορφή cap and trade system)

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι τιμολόγησης άνθρακα: συστήματα εμπορίας εκπομπών (ETS) και φόροι άνθρακα (carbon taxes): Ένα ETS – που μερικές φορές αναφέρεται ως σύστημα ανώτατων ορίων και εμπορίας – περιορίζει το συνολικό επίπεδο των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και επιτρέπει στις βιομηχανίες με χαμηλές εκπομπές να πωλούν τα επιπλέον δικαιώματα τους σε μεγαλύτερους εκπομπούς. Δημιουργώντας προσφορά και ζήτηση για δικαιώματα εκπομπών, ένα ETS καθορίζει μια τιμή αγοράς για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Το ανώτατο όριο βοηθά να διασφαλιστεί ότι θα πραγματοποιηθούν οι απαιτούμενες μειώσεις εκπομπών για να διατηρηθούν οι εκπομπές (συγκεντρωτικά) εντός του προκαθορισμένου προϋπολογισμού άνθρακα.

Ένας φόρος άνθρακα καθορίζει άμεσα μια τιμή στον άνθρακα ορίζοντας έναν φορολογικό συντελεστή για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ή – σινηθέστερα – για την περιεκτικότητα σε άνθρακα των ορυκτών καυσίμων. Είναι διαφορετικό από ένα ETS στο ότι το αποτέλεσμα μείωσης των εκπομπών ενός φόρου άνθρακα δεν είναι προκαθορισμένο αλλά η τιμή του άνθρακα είναι.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

- Ο κανονισμός περιλαμβάνει χρηματική ποινή για μη συμμόρφωση

Ένα καθοριστικό, όμως, πρόγραμμα με ουσιαστικό ρόλο στη μερική ή ολική απανθρακοποίηση των αεροπορικών καυσίμων φαίνεται να είναι και η αυξητική τάση του κόστους των δικαιωμάτων του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση θέλοντας να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών, έχει συμπεριλάβει τις αεροπορικές μεταφορές στο ΣΕΔΕ (EU-ETS) -τη μεγαλύτερη αγορά «cap-and-trade» συστήματος παγκοσμίως- για την εμπορία αδειών εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Από το 2012, συνεπώς, οι εκπομπές όλων των πτήσεων από, προς και εντός του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (ΕΟΧ), ο οποίος αποτελείται από τα 28 κράτη-μέλη της ΕΕ συν την Ισλανδία, το Λιχτενστάιν και τη Νορβηγία, συμπεριλαμβάνονται στο Κοινοτικό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ της ΕΕ).

Είναι γνωστό πως τα νομοθετικά όργανα των ηπείρων συνεργάζονται και αλληλοεπηρεάζονται σε καίρια θέματα όπως το κλίμα και η εναέρια κυκλοφορία, ωστόσο διαφέρουν ως προς τον τρόπο υλοποίησης και της πολιτικής που θα εφαρμόσουν με τις εκάστοτε συμφωνίες.

Το Κογκρέσο των ΗΠΑ, για παράδειγμα, με το νόμο για τους αειφόρους ουραμούς (Sustainable Skies Act, Μάιος 2021), που έχει ως στόχο την ενίσχυση των κινήτρων για χρήση των εναλλακτικών καυσίμων, θα ξεκινήσει επιδότηση ύψους 1,50 δολάριο ανά γαλόνι για παραγωγούς που παρέχουν εναλλακτικά καύσιμα με αποδεδειγμένη 50% ή μεγαλύτερη εξοικονόμηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και ανταμοιβές για υψηλότερη εξοικονόμηση αερίων του θερμοκηπίου, με έως και 2.00 δολάρια ανά γαλόνι. Η νομοθεσία απαιτεί

Η επιλογή του μέσου θα εξαρτηθεί από τις εθνικές και οικονομικές συνθήκες. Υπάρχουν επίσης πιο έμμεσοι τρόποι ακριβέστερης τιμολόγησης του άνθρακα, όπως μέσω φόρων καυσίμων, κατάργησης των επιδοτήσεων ορυκτών καυσίμων και κανονισμών που μπορεί να ενσωματώνουν ένα «κοινωνικό κόστος του άνθρακα». Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου μπορούν επίσης να τιμολογηθούν μέσω πληρωμών για μειώσεις εκπομπών. Οι ιδιωτικές οντότητες ή οι κρατικοί φορείς μπορούν να αγοράσουν μειώσεις εκπομπών για να αντισταθμίσουν τις δικές τους εκπομπές (τα λεγόμενα αντισταθμιστικά) ή για να υποστηρίξουν δραστηριότητες μετριασμού μέσω χρηματοδότησης βάσει αποτελεσμάτων.

Περίπου 40 χώρες και περισσότερες από 20 πόλεις, πολιτείες και επαρχίες χρησιμοποιούν ήδη μηχανισμούς τιμολόγησης του άνθρακα, με περισσότερους προγραμματισμούς για την εφαρμογή τους στο μέλλον. Μαζί τα συστήματα τιμολόγησης του άνθρακα που εφαρμόζονται τώρα καλύπτουν περίπου το ήμισυ των εκπομπών τους, που μεταφράζεται σε περίπου 13 τοις εκατό των ετήσιων παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

τα επιλέξιμα εναλλακτικά καύσιμα να χρησιμοποιούν το πλήρες σύνολο των κριτηρίων βιωσιμότητας του ICAO ως μία από τις διατάξεις διασφάλισης της περιβαλλοντικής ακεραιότητας. Μια συμπληρωματική πρόταση περιλαμβάνει επίσης επιχορήγηση 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων σε διάστημα πέντε ετών για την επέκταση του αριθμού εγκαταστάσεων παραγωγής των εναλλακτικών καυσίμων στις Η.Π.Α.

Μάλιστα, η κυβέρνηση Μπάιντεν ανακοίνωσε τις πολιτικές εναλλακτικών καυσίμων στις αρχές Σεπτεμβρίου 2021, όπου ανακοινώθηκε ένας νέος στόχος βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων με σκοπό να αυξηθεί η παραγωγή εναλλακτικών καυσίμων σε τουλάχιστον 3 δις γαλόνια ετησίως έως το 2030.

Πιο συγκεκριμένα οι νέες δράσεις θα περιλαμβάνουν:

- ✓ Προτεινόμενη έκπτωση φόρου για τα εναλλακτικά καύσιμα, που στοχεύει στη μείωση κόστους και ταχεία αύξηση της εγχώριας παραγωγής των SAF.
- ✓ Συνεχείς ευκαιρίες χρηματοδότησης για υποστήριξη έργων που αφορούν τα εναλλακτικά καύσιμα και των παραγωγών καυσίμων, προωθώντας μια μεγαλύτερη νέα πρόκληση στον τομέα των εναλλακτικών καυσίμων για την ενίσχυση της εγχώριας παραγωγής τους.
- ✓ Στενή συνεργασία με διεθνείς εταίρους για την υποστήριξη της παγκόσμιας κλίμακας και διαθεσιμότητας των εναλλακτικών καυσίμων.

Οι πολιτικές αυτές έρχονται σε συμφωνία με τις επιλογές πολιτικής της IATA, η οποία δεν εγκρίνει έναν υποχρεωτικό χαρακτήρα για την προώθηση της εμπορικής εξάπλωσης των εναλλακτικών καυσίμων, ειδικά όταν οι υποχρεωτικές διατάξεις δεν συνοδεύονται από θετικά μέτρα όπως η διάθεση δημόσιων πόρων που θα συμβάλουν στη μείωση του χάσματος των τιμών μεταξύ των εναλλακτικών καυσίμων και των συμβατικών αεροπορικών καυσίμων.

Συμπεράσματα

Είναι εμφανές ότι τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες, ώστε να υπάρξει σταδιακή αποδέσμευση από τα ορυκτά καύσιμα, στόχος ο οποίος πηγάζει από την ανάγκη αντιστροφής των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Ο στόχος για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας της γης απαιτεί σημαντικές μεταρρυθμίσεις, με πολύ σημαντική τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων σε μεγαλύτερη κλίμακα στο τομέα μεταφορών. Ωστόσο, στον τομέα των βιοκαυσίμων και ειδικότερα στον αεροπορικό τομέα, δεν έχει υπάρξει επί του παρόντος κάποια λύση η οποία να προκρίνεται ξεκάθαρα, κυρίως λόγω του αυξημένου κόστους για την παραγωγή βιοκαυσίμων, συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη εδώ και δεκαετίες. Ένας ακόμη λόγος για αυτή την καθυστερημένη εξέλιξη είναι η φύση του αεροπορικού τομέα, στον οποίο τα κριτήρια επιλογής και ελέγχου ενός καυσίμου θα πρέπει να είναι πολύ αυστηρά, ώστε να εξασφαλίζεται η συνεχής και δίχως προβλήματα λειτουργία των κινητήρων. Με τα έως τώρα δεδομένα, οι μέθοδοι που έχουν εγκριθεί για χρήση στα αεροσκάφη από τον ASTM, μαζί με τις υποκατηγορίες αυτών, είναι εννιά, έχοντας απαιτούμενο μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης με κηροζίνη 50%. Ωστόσο, οι τρεις εξ αυτών φαίνεται πως βρίσκονται σε πιο προχωρημένο επίπεδο στους περισσότερους τομείς τους οποίους εξετάζουμε ως προς τη βιωσιμότητά τους. Αυτές είναι οι HEFA, FT, ATJ.

Η μέθοδος HEFA φαίνεται να είναι η πιο ενδιαφέρουσα όσον αφορά τον οικονομικό τομέα, έχοντας χαμηλό αρχικό κόστος κεφαλαίου, χαμηλά λειτουργικά κόστη και χαμηλή ελάχιστη τιμή πώλησης καυσίμου, και κατατάσσεται πρώτη στα οικονομικά κριτήρια σε σχέση με τις υπόλοιπες. Στον αντίποδα, η μέθοδος HEFA παρουσιάζει ικανοποιητική ποσότητα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όχι όμως την καλύτερη, έχοντας υψηλότερο εύρος εκπομπών από τη μέθοδο FT. Επιπλέον, σημαντικό μειονέκτημά της είναι η κατανάλωση νερού για την παραγωγική διαδικασία. Με βάση τα παραπάνω, η μέθοδος HEFA θεωρείται σήμερα η καλύτερη μέθοδος παραγωγής βιοκαυσίμων και δικαίως είναι αυτή τη στιγμή η πιο διαδεδομένη στην εμπορία βιοκαυσίμων παγκοσμίως.

Στη δεύτερη θέση των μεθόδων παραγωγής κατατάσσεται η μέθοδος FT, η οποία παρουσιάζει το χαμηλότερο εύρος εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου, ωστόσο, είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου που απαιτείται για τη δημιουργία μιας

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

αντίστοιχης μονάδας παραγωγής, συνεπώς απαιτείται έρευνα για τη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης. Επιπλέον, πολύ σημαντικό περιορισμό για τη μέθοδο αυτή αποτελεί η χρήση και εκμετάλλευση βασικών πόρων της γης. Αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση πρώτων υλών και καλλιεργειών δεύτερης γενιάς, τα οποία δεν επηρεάζουν την κατάσταση της αγροτικής γης. Επί του παρόντος, τα αστικά στερεά απόβλητα αποτελούν την καλύτερη επιλογή για τη μέθοδο FT, διότι έχουν μηδενικά κόστη εύρεσης πρώτων υλών, ενώ εξοικονομούν απόβλητα από το περιβάλλον, τα οποία θα έπρεπε να διοχετευθούν σε χώρους απόθεσης ή να ανακυκλωθούν. Φαίνεται, όμως, η ποσότητα στερεών αποβλήτων, μολονότι αυτά αυξάνονται κάθε χρόνο, να μην επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών σε πρώτες ύλες, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη για πρόσθετη παραγωγή ή/και με άλλες πρώτες ύλες, ώστε να καλυφθεί η ζήτηση.

Η μέθοδος ATJ είναι μια αξιοσημείωτη μέθοδος, που όμως υπολείπεται στους περισσότερους τομείς σε σχέση με τις μεθόδους HEFA και FT. Η εξοικονόμηση εκπομπών στη μέθοδο αυτή παρουσιάζει μεγάλο εύρος, κυρίως λόγω των διαφορετικών πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται, καθώς και των ενδιάμεσων προϊόντων της παραγωγικής διαδικασίας (αιθανόλη, ισοβουτανόλη κλπ.) Στον οικονομικό τομέα, η μέθοδος παρουσιάζει σχετικά χαμηλό κόστος κεφαλαίου, και ελάχιστη τιμή πώλησης χαμηλότερη από τη μέθοδο FT. Ωστόσο, μεγάλο αρνητικό στοιχείο της μεθόδου είναι η χρήση κυρίως καλλιεργειών τροφής ως πρώτη ύλη, όπως το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο κ.α., καλλιέργειες οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως τροφή για σημαντικό μέρος του πληθυσμού, ειδικά σε περιοχές οι οποίες πάσχουν από έλλειψη τροφής.

Τέλος, η μέθοδος SIP απαιτεί μεγάλα βήματα ώστε να καταστεί ανταγωνιστική σε σχέση με τις άλλες τρεις μεθόδους που αναφέρθηκαν. Και εδώ, μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η χρήση εδώδιμων φυτών ως πρώτη ύλη, ενώ παρουσιάζει τα μεγαλύτερα κόστη εγκατάστασης και χρήσης από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο, ενώ προς το παρόν για τη χρήση της απαιτείται μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης 10%.

Η προοπτική για τα βιοκαύσιμα κρίνεται ενθαρρυντική, ωστόσο οι περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με την παραγωγική τους διαδικασία αποτελεί το βασικότερο λόγο για την καθυστέρηση στην έως τώρα ανάπτυξή τους. Τα κόστη εγκατάστασης και παραγωγής θα πρέπει να μειωθούν αισθητά, ούτως ώστε να υπάρξει ενδιαφέρον από επενδυτές για την καθιέρωσή τους στην αεροπορική βιομηχανία.

«Καύσιμα αεροσκαφών παραγόμενα από βιομάζα»

Ακόμη, αν και γίνονται προσπάθειες καθιέρωσης κοινών πολιτικών προώθησης της χρήσης των βιοκαυσίμων στον αεροπορικό τομέα, δεν υπάρχει, προς το παρόν, ένα παγκόσμιο νομοθετικό πλαίσιο που να ορίζει σαφή κίνητρα για την εφαρμογή χρήσης τους με αποτέλεσμα να επικρατεί σύγχυση στις αεροπορικές εταιρείες.

Συνοψίζοντας, θα λέγαμε πως είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν σημαντικά βήματα για την αντιστροφή της κλιματικής κρίσης και τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ειδικότερα, τα βιοκαύσιμα στην αεροπλοΐα αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση, ωστόσο, χρήζουν περαιτέρω μελέτης για τις συνθήκες λειτουργίας τους. Η υποχρεωτική χρήση τους ενδεχομένως να αποτελεί ένα βίαιο μέτρο, δίχως το κατάλληλο πλαίσιο στήριξης. Συνολικά, προτείνεται στο άμεσο μέλλον η χρήση της οικονομικότερης μεθόδου, HEFA, παραβλέποντας τις ελαφρώς υψηλότερες εκπομπές, έναντι της μεθόδου FT, έως ότου δοθεί η δυνατότητα για περισσότερη διερεύνηση και αποτελεσματικότερα κίνητρα. Στο απώτερο βέβαια μέλλον η τελευταία φαίνεται να προκρίνεται έναντι συνολικά των υπολοίπων μεθόδων.

Βιβλιογραφία

Air Transport Action Group. (2020, September). *Facts & figures*. Atag.org. <https://www.atag.org/facts-figures.html>

Allison, C. (2017, September 18). *U.S. Energy Information Administration - EIA - Independent Statistics and Analysis*. Wwww.eia.gov; EIA. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2020\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2020).pdf)

Bureau of Transportation Statistics. (2023, May). *OST_R | BTS | Transtats*. Bts.gov. <https://www.transtats.bts.gov/fuel.asp?20=D&qv52ynB=qn6nE>

Bureau of Transportation Statistics. (2019). *Airline Fuel Cost and Consumption (U.S. Carriers - Scheduled)*. Transtats.bts.gov; U.S. Department of Transportation. <https://www.transtats.bts.gov/fuel.asp>

Claros E. and Soone J., Sustainable Aviation Fuels, infographic, EPRS, European Parliament, March 2022.

Cox, K., Renouf, M., Dargan, A., Turner, C., & Klein-Marcuschamer, D. (2014). Environmental life cycle assessment (LCA) of aviation biofuel from microalgae, *Pongamia pinnata*, and sugarcane molasses. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(4), 579–593. <https://doi.org/10.1002/bbb.1488>

Crawford, J. T., Shan, C. W., Budsberg, E., Morgan, H., Bura, R., & Gustafson, R. (2016). Hydrocarbon bio-jet fuel from bioconversion of poplar biomass: techno-economic assessment. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0545-7>

de Jong, S., Antonissen, K., Hoefnagels, R., Lonza, L., Wang, M., Faaij, A., & Junginger, M. (2017). Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0739-7>

de Jong, S., Hoefnagels, R., Faaij, A., Slade, R., Mawhood, R., & Junginger, M. (2015). The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels - a comprehensive techno-economic comparison. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(6), 778–800. <https://doi.org/10.1002/bbb.1613>

Diniz, A. P. M. M., Sargeant, R., & Millar, G. J. (2018). Stochastic techno-economic analysis of the production of aviation biofuel from oilseeds. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1158-0>

Greenfield, M. (2023a, May 26). *Airline industry worldwide - number of flights 2019 | Statistic*. Statista; Statista. <https://www.statista.com/statistics/564769/airline-industry-number-of-flights/>

Greenfield, M. (2023b, June 2). *Commercial airlines: worldwide fuel consumption 2019 | Statistic*. Statista; Statista. <https://www.statista.com/statistics/655057/fuel-consumption-of-airlines-worldwide/>

IATA. (2020). Sustainable Aviation Fuels Sustainable Aviation Fuels Fact Sheet 3. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf>

ICAO, November 2013 - December 2019 (On going). Project Dutch initiative, 'Bioport for Jet Fuels in the Netherlands' (Bioport Holland), Stakehold. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Project.aspx?ProjectID=37>

ICSA. (2009). GROUP ON INTERNATIONAL AVIATION AND CLIMATE CHANGE (GIACC) FOURTH MEETING Agenda Item 2: Review of aviation emissions-related activities within ICAO and internationally AVIATION AND CLIMATE CHANGE (Presented by the International Coalition for Sustainable Aviation, ICSA) https://www.icao.int/environmental-protection/GIACC/Giacc-4/Giacc4_ip09_en.pdf

IEA. (2019, March 18). Are aviation biofuels ready for take off? IEA. <https://www.iea.org/commentaries/are-aviation-biofuels-ready-for-take-off>

IEA. (2022, September). Aviation – Analysis. IEA. <https://www.iea.org/reports/aviation>

Igini, M. (2022, March 21). *4 Sustainable Aviation Fuel Companies Leading the Way to Net-Zero Flying*. Earth.org - Past | Present | Future. <https://earth.org/sustainable-aviation-fuel-companies/>

International Energy Agency. (2022). *Transport – Topics*. IEA. <https://www.iea.org/topics/transport>

Jay, A. (2022, November 6). Number of Flights Worldwide in 2022/2023: Passenger Traffic, Behaviors, and Revenue. Financesonline.com. <https://financesonline.com/number-of-flights-worldwide/#:~:text=The%20number%20of%20domestic%20and>

Jones, S., & Milmo, D. (2008, February 25). Branson's coconut airways - but jet is on a flight to nowhere, say critics. The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2008/feb/25/biofuels.theairlineindustry>

Kandaramath Hari, T., Yaakob, Z., & Binitha, N. N. (2015). Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1234–1244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095>

Klein, B. C., Chagas, M. F., Junqueira, T. L., Rezende, M. C. A. F., Cardoso, T. de F., Cavalett, O., & Bonomi, A. (2018). Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. *Applied Energy*, 209, 290–305. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.079>

Le Feuvre, P. (2019, March). *European Commission - Have your say*. European Commission - Have Your Say. <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-%CE%92%CE%B9%CF%89%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B1-%CE%B1%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE>

B1-%CE%BA%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B1-ReFuelEU-Aviation_el

Liu, G., Yan, B., & Chen, G. (2013). Technical review on jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.025>

Mannerfelt, E. S., Dehecq, A., Hugonnet, R., Hodel, E., Huss, M., Bauder, A., & Farinotti, D. (2022). Halving of Swiss glacier volume since 1931 observed from terrestrial image photogrammetry. *The Cryosphere*, 16, 3249–3268. <https://doi.org/10.5194/tc-2022-14>

Marina Kousoulidou, Laura Lonza, "Biofuels in aviation: Fuel demand and CO2 emissions evolution in europe toward 2030," in *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, pp.166-181, 2016, doi:10.1016/j.trd.2016.03.018.

McCausland, R. (2023). *Sustainable Aviation Fuels Fact sheet*. IATA. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels/>

[National emissions reported to the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution \(LRTAP Convention\)](#), European Environment Agency (EEA), APE002 Published 29 Jan 2014 Last modified 11 May 2021, Prod-ID: IND-166-en

Nullis, C. (2023, May 15). *Global temperatures set to reach new records in next five years*. Public.wmo.int. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/global-temperatures-set-reach-new-records-next-five-years>

Paur, J. (2011, July 1). KLM Completes First Scheduled Service Flight Using Biofuel. *Wired*. <https://www.wired.com/2011/07/klm-completes-first-scheduled-service-flight-using-biofuel/>

Pavlenko, N., Searle, S., & Christensen, A. (2019, March 20). The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union. *Policycommons.net*; International Council on Clean Transportation. <https://policycommons.net/artifacts/3801821/the-cost-of-supporting-alternative-jet-fuels-in-the-european-union/4607649/>

Perry, F. (2019). *Sustainable Aviation Fuels Fact sheet*. IATA. <https://www.iata.org/contentassets/ed476ad1a80f4ec7949204e0d9e34a7f/fact-sheet-alternative-fuels.pdf>

Pires, A., Han, Y., Kramlich, J., & Garcia-Perez, M. (2018, February 20). Chemical composition and fuel properties of alternative jet fuels :: *BioResources*. *Bioresources.cnr.ncsu.edu*. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/chemical-composition-and-fuel-properties-of-alternative-jet-fuels/>

Shahabuddin, M., Alam, M. T., Krishna, B. B., Bhaskar, T., & Perkins, G. (2020). A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes. *Bioresource Technology*, 312, 123596. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123596>

Shahriar, M. F., & Khanal, A. (2022). The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). *Fuel*, 325, 124905. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124905>

Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, (2022, November 14). [Www.astm.org. https://www.astm.org/d1655-22a.html](https://www.astm.org/d1655-22a.html)

Staples, M. D., Malina, R., Olcay, H., Pearlson, M. N., Hileman, J. I., Boies, A., & Barrett, S. R. H. (2014). Lifecycle greenhouse gas footprint and minimum selling price of renewable diesel and jet fuel from fermentation and advanced fermentation production technologies. *Energy Environ. Sci.*, 7(5), 1545–1554. <https://doi.org/10.1039/c3ee43655a>

Staples, M. D., Olcay, H., Malina, R., Trivedi, P., Pearlson, M. N., Strzepek, K., Paltsev, S. V., Wollersheim, C., & Barrett, S. R. H. (2013). Water Consumption Footprint and Land Requirements of Large-Scale Alternative Diesel and Jet Fuel Production. *Environmental Science & Technology*, 47(21), 12557–12565. <https://doi.org/10.1021/es4030782>

Sustainable aviation fuels (ReFuelEU Aviation Initiative): 'Fit for 55 package', Legislative Observatory (OEIL), European Parliament.

Sustainable Aviation Fuels Stocktaking. (2019). [Www.icao.int; ICAO. https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF_Stocktaking.aspx](https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF_Stocktaking.aspx)

Taalas, P. (2023, March 21). *Inadequate Access To Water Affects 3.6 Billion People: WMO*. [Www.telesurenglish.net. https://www.telesurenglish.net/news/Inadequate-Access-To-Water-Affects-3.6-Billion-People-WMO-20230321-0019.html#:~:text=Currently%2C%20over%20100%20countries%20are](https://www.telesurenglish.net/news/Inadequate-Access-To-Water-Affects-3.6-Billion-People-WMO-20230321-0019.html#:~:text=Currently%2C%20over%20100%20countries%20are)

Tao, L., Markham, J. N., Haq, Z., & Bidy, M. J. (2017). Techno-economic analysis for upgrading the biomass-derived ethanol-to-jet blendstocks. *Green Chemistry*, 19(4), 1082–1101. <https://doi.org/10.1039/c6gc02800d>

Tao, L., Milbrandt, A., Zhang, Y., & Wang, W.-C. (2017). Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0945-3>

Tchilinguirian, P. (2022). *ACT-SAF Series #1: Introduction to Sustainable Aviation Fuels*. <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/ACT%20SAF%20series%201%20-%20Introduction%20to%20SAF%20FINAL.pdf>

Tiseo, I. (2023, May 31). *Global CO2 emissions by sector*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/276480/world-carbon-dioxide-emissions-by-sector/>

Tuominen M., 'Fit for 55' legislative package: ReFuel EU Aviation, initial appraisal of a Commission impact assessment, EPRS, European Parliament, December 2021

Unfccc.int. (2023). https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/sharm-el-sheikh-climate-change-conference-november-2022/five-key-takeaways-from-cop27?gclid=CjwKCAjwsvujBhAXEiwA_UXnAB8bFb01WHxZmzWsFYeWJ0pXsPlswbwTV2xG2328T2I_kzXkCXoDRBoCf2IQA_vD_BwE

UNFCCC. (2016). The Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change; United Nations. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

United Nations. (2021). Net Zero Coalition. United Nations. <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>

United Nations. (2021). *The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26*. Unfccc.int. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>

U.S. Energy Information Administration. (2016). *Greenhouse gases - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Eia.gov. <https://www.eia.gov/energyexplained/energy-and-the-environment/greenhouse-gases.php>

Wang, M., Dewil, Raf., Maniatis, K., Wheeldon, J., Tan, T., Baeyens, J., & Fang, Y. (2019). Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*, 74, 31–49. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.04.004>

Wei, H., Liu, W., Chen, X., Yang, Q., Li, J., & Chen, H. (2019). Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel*, 254, 115599. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.007>

WMO . (2022, November 6). WMO Statement on the State of the Global Climate. World Meteorological Organization. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

Wright, M. (2020). Fact Sheet 2 Fact Sheet 2 Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification. IATA. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>

Wright, M. (2020). Sustainable Aviation Fuels Sustainable Aviation Fuels Fact Sheet 3. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf>

Ελληνόφωνη

ΟΔΗΓΙΑ 2009/28/ΕΚ του ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ και του ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ, της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ (Κείμενο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τον ΕΟΧ), Επίσημη Εφημερίδα αριθ. L 140 της 05/06/2009 σ. 0016 – 0062).

Κοράκης, Χ., (2021). Διπλωματική εργασία: «Λειτουργία Κινητήρων Turbofan Πολιτικών Αεροσκαφών με Καύσιμα από Ανανεώσιμες Πηγές: Υδρογόνο, Βιοκαύσιμα». Ανακτήθηκε από: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/55042>, <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.22740>

Ηλεκτρονικές Πηγές:

<https://europa.eu>

<https://climate.ec.europa.eu>

<https://financesonline.com>

<https://www.visualcapitalist.com/comparing-the-carbon-footprint-of-transportation-options/>

<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2020>

<https://www.ertnews.gr/eidiseis/mono-sto-ertgr/ti-apotypoma-anthraka-echei-i-kathe-epilogi-metaforikoy-mesoy/>

http://europa.eu/documents/comm/white_papers/pdf/com97_599_en.pdf.

<https://www.astm.org/>

https://el.wikipedia.org/wiki/ASTM_International

<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/04/25/council-and-parliament-agree-to-decarbonise-the-aviation-sector/>

<https://www.etipbioenergy.eu/>

<https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/04/25/fit-for-55-council-adopts-key-pieces-of-legislation-delivering-on-2030-climate-targets/>

<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/29/fit-for-55-council-reaches-general-approaches-relating-to-emissions-reductions-and-removals-and-their-social-impacts/>

<https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>