



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΚΥΚΛΟ ΖΩΗΣ ΤΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Παναγιώτης Φράγκος

Επιβλέπων : Κ. Μαθιουδάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2023





Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Παναγιώτης Φράγκος



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ
ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΚΥΚΛΟ ΖΩΗΣ ΤΟΥ**

Διπλωματική εργασία

ΦΡΑΓΚΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων : ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η εκτίμηση του ανθρακικού αποτυπώματος στροβιλοκινητήρων για τον κύκλο ζωής τους. Ο κύκλος ζωής περιλαμβάνει τα στάδια κατασκευής, λειτουργίας και απόσυρσης, ενώ το ανθρακικό αποτύπωμα αφορά τις εκπομπές αερίων που επιδρούν αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Για το σκοπό αυτό, ο στροβιλοκινητήρας αναλύεται στα πρότυπα της ανάλυσης κύκλου ζωής, ως ένα προϊόν. Τα πρώτα βήματα της μελέτης περιλαμβάνουν την οριοθέτηση του συστήματος και στη συνέχεια ακολουθούν οι προσπάθειες για τον προσδιορισμό των ροών μάζας και ενέργειας που εισέρχονται και εξέρχονται από αυτό. Αυτός επιτυγχάνεται με την εύρεση της κατανομής της μάζας του στροβιλοκινητήρα, των κατεργασιών των τμημάτων του, των τρόπων μεταφοράς του, των χαρακτηριστικών λειτουργίας και χειροτέρευσης του, των μεθόδων απόσυρσης του και των ειδών των καυσίμων και λιπαντικών ελαίων που καταναλώνει.

Από την ειδική μελέτη του γνωστού στροβιλοκινητήρα CFM56, δημιουργείται ένα υπολογιστικό εργαλείο προγραμματισμένο σε γλώσσα Visual Basic. Έτσι, η διαδικασία που αναπτύσσεται μπορεί να γενικευθεί ώστε να γίνει η μελέτη στροβιλοκινητήρων διαφορετικών επιδόσεων ή τεχνολογίας. Η βιβλιογραφική αναζήτηση σε έντυπο τύπο και στο διαδίκτυο εμπλουτίζει το υπολογιστικό εργαλείο, δίνοντας του τη δυνατότητα εξέλιξης και χρήσης σε άλλα προϊόντα, εκτός από στροβιλοκινητήρες.

Η μελέτη οδηγεί σε συμπεράσματα που επιβεβαιώνουν την ανησυχία για το μέγεθος της επιρροής των αερομεταφορών στην κλιματική αλλαγή και την ανάγκη για την υιοθέτηση μεθόδων αντιστάθμισης των εκπομπών, όπως είναι τα βιοκαύσιμα και η προώθηση αεροσκαφών με υδρογόνο.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES

**ESTIMATION OF JET ENGINE CARBON FOOTPRINT
FROM DURING ITS LIFE CYCLE**

Diploma Thesis

FRAGKOS PANAGIOTIS

Advisor: MATHIOUDAKIS KONSTANTINOS

Abstract

In this thesis, the carbon footprint assessment of turbine engines for their life cycle is carried out. The life cycle includes the stages of construction, operation and disposal, while the carbon footprint refers to the emissions of gases that have a negative effect on the greenhouse effect.

For this purpose, the turbine engine is analyzed in the life cycle analysis standards, as a product. The first steps in the study involve delineating the system, followed by efforts to determine the fluxes of mass and energy into and out of it. This is achieved by finding the mass distribution of the turbo engine, the methods of processing its parts, its transportation methods, its operating and deterioration characteristics, its withdrawal methods and the types of fuels and lubricating oils it consumes.

From the primary case study of the well-known CFM56 turbofan engine, a computing tool programmed in the Visual Basic language is created. Thus, the procedure developed can be generalized to study various turbine engines of different performance or technological advancements. Researching relevant bibliography and scientific papers may enrich the computational tool, enabling it to be improved and used in products other than turbine engines.

The study leads to conclusions that confirm the concern about the magnitude of the influence of aviation on climate change and the need for the adoption of methods to offset emissions, such as biofuels and the promotion of hydrogen-powered aircraft.





Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, τον κύριο Μαθιουδάκη Κωνσταντίνο, ο οποίος αρχικά με εμπιστεύθηκε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία και στη συνέχεια με καθοδήγησε ώστε να καταφέρω να την ολοκληρώσω.

Επίσης ευχαριστίες στέλνω στους γονείς και στην αδελφή μου, οι οποίοι έχουν σταθεί πλάι σε κάθε προσπάθεια μου.

Τέλος, ελπίζω αυτή η εργασία να αποτελέσει βοήθημα και έρεισμα για νέες μελέτες και ιδέες.

Φράγκος Παναγιώτης

Ιούνιος 2023





Αρκτικόλεξα - Συμβολισμοί

A.P.U. : Auxiliary Power Unit
A.S.T.M. : American Society for Testing Materials
A.T.J. : Alcohol-to-Jet
B.A.D.A.: Base of Aircraft Data
Bio-SPK: Bio-derived Synthetic Paraffinic Kerosene
C.A.D. : Computer Aided Design
C.A.M.A.C.M.: Commercial Aircraft's Mission Analysis Computational Model
CH₄ : Μεθάνιο
CO : Μονοξείδιο του άνθρακα
CO₂ : Διοξείδιο του άνθρακα
C.D.A. : Continuous Descent Approach
C.D.O. : Continuous Descent Operation
C.N.C. : Computer Numerical Controlled
E.F.C. : Engine Flight Cycles
E.F.H. : Engine Flight Hour
E.G.T. : Exhaust Gas Temperature
E.U. E.T.S: European Union Emissions Trading System
F.E.G.P. : Fixed Electrical Ground Power
GH.G. : Greenhouse Gases
G.W.P. : Global Warming Potential
H.E.F.A.: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
I.A.T.A: International Air Transport Association
I.C.A.O.: International Civil Aviation Organization
I.J.E.A.B. : International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology
I.L.C.D. : International Life Cycle Database
I.P.C.C. : Intergovernmental Panel on Climate Change
L.C.A. : Life Cycle Assessment
L.T.O. : Landing and Take-Off (Cycle)
M.I.T. : Massachusetts Institute of Technology
NO_x : Οξείδια του αζώτου
O.E.F. : Organisational Environmental Footprint
P.A.S. : Publicly Available Specifications
P.E.F. : Product Environmental Footprint
SO_x : Οξείδια του θείου
S.F.C. : Specific Fuel Consumption
W.A.T.E. : Weight Analysis of Turbo Engine
Z.F.W. : Zero Fuel Weight
Ε.Μ.Π. : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο





Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	14
1.1	Αντικείμενο της εργασίας.....	15
1.2	Ανασκόπηση τεχνολογίας αεροσκαφών και στροβιλοαντιδραστήρων.....	16
1.3	Έρευνα στο πεδίο των ανθρακικών εκπομπών της αεροπορίας.....	18
1.4	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	27
1.5	Δομή της εργασίας.....	28
2.	Ανθρακικό αποτύπωμα και ανάλυση κύκλου ζωής.....	30
2.1	Σύγχρονες τάσεις στην ανάλυση των ανθρακικών εκπομπών.....	31
2.1.1	Ανάλυση του Κύκλου Ζωής.....	31
2.1.2	Ανάλυση του Ανθρακικού Αποτυπώματος.....	33
2.2	Αρχές των μεθοδολογιών και διεθνή πρότυπα.....	34
2.2.1	Στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής.....	34
2.2.2	Διεθνές Σύστημα Αναφοράς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	36
2.2.3	Βάση Συντελεστών Εκπομπών.....	37
2.2.4	Στάδια της Ανάλυσης Ανθρακικού Αποτυπώματος.....	37
2.3	Παραδείγματα εφαρμογής των μεθόδων.....	40
2.3.1	Ανάλυση Ανθρακικού Αποτυπώματος αεροσκάφους.....	40
2.3.2	Ανάλυση Κύκλου Ζωής αεροσκάφους.....	43
2.4	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	45
3.	Ανάλυση της μάζας και των διαστάσεων του στροβιλοκινητήρα.....	47
3.1	Βασικά στοιχεία συστήματος.....	47
3.1.1	Άμεσες ανθρακικές εκπομπές.....	48
3.1.2	Έμμεσες ανθρακικές εκπομπές.....	49
3.1.3	Δομή του συστήματος.....	49
3.1.4	Εκτίμηση διαστάσεων του στροβιλοκινητήρα.....	50
3.2	Κατανομή μάζας.....	53
3.2.1	Έρευνα πάνω στον προσδιορισμό της μάζας στροβιλοκινητήρα.....	53
3.2.2	Προσδιορισμός κατανομής της μάζας ενός στροβιλοκινητήρα.....	55
3.3	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	57
4.	Παραγωγή υλικών, κατεργασίες, μεταφορά και απόσυρση του στροβιλοκινητήρα.....	59
4.1	Δημιουργία κραμάτων και σύνθετων υλικών.....	59
4.1.1	Εξόρυξη και επεξεργασία υλικών.....	60
4.1.2	Παραδοχές υπολογισμών εξόρυξης και επεξεργασίας υλικών.....	65
4.2	Κατεργασία εξαρτημάτων και τμημάτων στροβιλοκινητήρα.....	65
4.2.1	Παραδοχές υπολογισμών κατεργασιών.....	72
4.3	Μεταφορές και διανομή των εξαρτημάτων του στροβιλοκινητήρα.....	73
4.4	Απόσυρση στροβιλοκινητήρα και των εξαρτημάτων του.....	76
4.4.1	Παραδοχές υπολογισμών απόσυρσης κινητήρα.....	79
4.5	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	79
5.	Λειτουργία και συντήρηση του στροβιλοκινητήρα.....	81
5.1	Απλοποιημένο μοντέλο λειτουργίας στροβιλοαντιδραστήρα.....	81
5.2	Απλοποιημένο μοντέλο λειτουργίας αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος.....	83
5.3	Απλοποιημένο μοντέλο χειροτέρευσης του στροβιλοκινητήρα.....	84
5.4	Παραδοχές υπολογισμών λειτουργίας και χειροτέρευσης κινητήρα.....	87
5.5	Συντήρηση και λοιπές εκπομπές παραγωγής.....	88



5.5.1	Παραγωγή καυσίμων – Συμβατικών και προηγμένων.....	88
5.5.2	Παραγωγή λιπαντικών και ψυκτικών ελαίων	91
5.5.3	Συντήρηση του στροβιλοκινητήρα.....	91
5.6	Παραδοχές υπολογισμών συντήρησης, παραγωγής καυσίμων-λιπαντικών	93
5.7	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	93
6.	Επαλήθευση και αξιολόγηση της υπολογιστικής μεθόδου.....	95
6.1	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ενοτήτων υλικών και κατεργασιών	95
6.2	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων της λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα	100
6.2.1	Συζήτηση.....	111
6.3	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων άλλων κατηγοριών.....	113
6.4	Δοκιμή υπολογισμού ανθρακικού αποτυπώματος ανεμογεννήτριας	114
6.5	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	118
7.	Εφαρμογή σε συγκεκριμένους αεροπορικούς κινητήρες	120
7.1	Υλικά και κατανομή μάζας του στροβιλοκινητήρα CFM56-5A.....	121
7.2	Ανθρακικό αποτύπωμα κατεργασιών του CFM56-5A	123
7.3	Ανθρακικό αποτύπωμα μεταφορών CFM56-5A.....	128
7.4	Ανθρακικό αποτύπωμα λειτουργίας CFM56-5A.....	129
7.4.1	1 ^η Περίπτωση.....	129
7.4.2	2 ^η Περίπτωση.....	131
7.5	Ανθρακικό αποτύπωμα χειροτέρευσης του CFM56-5A	134
7.5.1	1η Περίπτωση.....	134
7.5.2	2η Περίπτωση.....	135
7.6	Ανθρακικό αποτύπωμα συντήρησης και καυσίμων του CFM56-5A	136
7.6.1	1 ^η Περίπτωση.....	136
7.6.2	2η Περίπτωση.....	138
7.7	Ανθρακικό αποτύπωμα απόσυρσης του CFM56-5A	138
7.8	Ανθρακικό αποτυπώματος κύκλου ζωής CFM56-5A.....	140
7.8.1	1 ^η Περίπτωση.....	141
7.8.2	2 ^η Περίπτωση.....	146
7.9	Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής V2500.....	148
7.9.1	Μεταβλητές εισαγωγής.....	149
7.9.2	Ανθρακικό αποτύπωμα εξόρυξης και παρασκευής υλικών I.A.E. V2500	154
7.10	Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής CFM LEAP με κηροζίνη.....	155
7.10.1	Μεταβλητές εισαγωγής.....	155
7.10.2	Ανθρακικό αποτύπωμα εξόρυξης και παρασκευής υλικών CFM LEAP	159
7.11	Ενδεικτική παρουσίαση ανθρακικού αποτυπώματος κύκλου ζωής των κινητήρων ...	160
7.12	Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής CFM LEAP με υδρογόνο	164
7.12.1	Μεταβλητές εισαγωγής.....	164
7.12.2	Ανθρακικό αποτύπωμα CFM LEAP 1-A με υδρογόνο.....	165
7.12.3	Παραγωγή υδρατμών.....	168
7.13	Ανθρακικό αποτύπωμα CFM LEAP 1-A με εναλλακτικά καύσιμα	169
7.14	Συζήτηση	171
7.15	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	172
8.	Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα	174
9.	Κατάλογος Πινάκων	178
10.	Κατάλογος Εικόνων.....	181



11. Κατάλογος Αναφορών.....	186
12. Παράρτημα I : Εισαγωγή στην Κλιματική Αλλαγή	203
12.1 Φαινόμενο και αέρια του θερμοκηπίου.....	203
12.1.1 Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	205
12.1.2 Μεθάνιο (CH ₄)	206
12.1.3 Υποξείδιο του αζώτου (N ₂ O)	207
12.1.4 Υδρατμοί (H ₂ O)	208
12.1.5 Όζον (O ₃) και Φθοροχλωράνθρακες (CFCs).....	209
12.2 Ιδιότητες και εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου	210
12.3 Μέτρα αντιρρύπανσης και αειφόρος ανάπτυξη	213
12.3.1 Τιμολόγηση του άνθρακα	215
12.3.2 Τεχνολογία απαγωγής διοξειδίου του άνθρακα.....	216
12.3.3 Ανανεώσιμες και Εναλλακτικές Πηγές Ενέργειας	219
12.3.4 Μεταφορές και Μέσα Μεταφοράς.....	222
13. Παράρτημα II : Κλιματική αλλαγή και αεροπορία.....	226
13.1.1 Βιομάζα και Βιοκαύσιμα	227
13.1.2 Ηλεκτρική πρόωση και ηλεκτρικά αεροσκάφη.....	229
13.1.3 Υδρογόνο	231
13.1.4 Καινοτόμος σχεδιασμός στροβιλοκινητήρων και αεροσκαφών.....	233
13.2 Δεδομένα για την αεροπορία	236
13.3 Περιορισμός των ανθρακικών εκπομπών των αεροσκαφών	239
14. Παράρτημα III : Παρουσίαση υπολογιστικού εργαλείου	243
14.1 Microsoft Excel και Visual Basic for Applications (V.B.A.)	243
14.2 Παρουσίαση υπολογιστικού εργαλείου	245
14.2.1 Εκτίμηση μάζας κινητήρα (Engine Weight Estimation).....	247
14.2.2 Βιβλιοθήκη στροβιλοκινητήρων (Engine Library)	249
14.2.3 Δημιουργός κραμάτων (Alloy Creator).....	250
14.2.4 Κατανομή υλικών και μάζας (Materials-Weight)	251
14.2.5 Κατεργασίες – Συναρμολόγηση (Processing-Machining).....	253
14.2.6 Μεταφορές και διανομή των εξαρτημάτων (Logistics-Distribution)	256
14.2.7 Λειτουργία Στροβιλοαντιδραστήρα (Operation)	258
14.2.8 Συντήρηση, παραγωγή καυσίμων και λιπαντικών (Maintenance)	262
14.2.9 Ανακύκλωση- αποτέφρωση- χρήση χωματερής (Recycling-Landfilling).....	264
14.2.10 Παράρτημα (Appendix)	266
14.3 Δείγμα υπολογιστικού κώδικα	266



1. Εισαγωγή

Η ανθρωπότητα έχει έρθει πολλές φορές σε σύγκρουση με το φυσικό περιβάλλον κατά τον αδιάκοπο αγώνα της για εξέλιξη. Η, σαφώς σπουδαία, πορεία της από την εποχή του λίθου έως τη τωρινή ψηφιακή εποχή, έχει δημιουργήσει πολλούς εχθρούς της φύσης, όπως η αποψίλωση, η ρύπανση των υδάτων και η ατμοσφαιρική ρύπανση. Ένα από τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η σύγχρονη γενιά είναι η κλιματική αλλαγή, η οποία οφείλεται κατά βάση σε βιομηχανικούς παράγοντες.

Καθώς η απειλή της μεγαλώνει, η παγκόσμια κοινότητα επιχειρεί να την καταπολεμήσει περιορίζοντας τις δραστηριότητες εκείνες που την ενισχύουν καθημερινά και προσπαθώντας να ευαισθητοποιήσει τις χώρες οι οποίες φέρουν το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης. Το εικοστό έκτο Συνέδριο για την Κλιματική Αλλαγή των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Climate Change Conference) θέτει τους παρακάτω στόχους για το μέλλον :

- Εξασφάλιση ενός ισοζυγίου στα παραγόμενα αέρα που προκαλούν τα φαινόμενα κλιματικής αλλαγής, έως το 2030.
- Αποτροπή αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά ενάμιση βαθμούς Κελσίου.
- Ενεργή δράση για την προστασία του οικοσυστήματος των περιοχών που αναμένονται να επηρεαστούν σοβαρά από την κλιματική αλλαγή.
- Χρηματοδότηση 100 δισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως, από τις ισχυρότερες χώρες, ώστε οι παραπάνω στόχοι να μπορούν να είναι εφικτοί.
- Καλλιέργεια ενός πνεύματος συνεργασίας και τήρηση των κανονισμών της Συμφωνίας του Παρισιού (Paris Agreement) [1].

Συγκεκριμένα η Συμφωνία του Παρισιού αφορά, προς το παρόν, τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και έχει απώτερο σκοπό να μετατρέψει την Ευρώπη στην πρώτη κλιματικά ουδέτερη οικονομία και κοινωνία έως το 2050. Για να συμβεί αυτό, οι χώρες οφείλουν :



- Να σταματήσουν να χρησιμοποιούν λιγνίτη και να επενδύσουν σε ανανεώσιμες και εναλλακτικές πηγές ενέργειας.
- Να φροντίσουν ώστε να μην καταστρέφονται οι δασικές εκτάσεις και η βιοποικιλότητα.
- Να εδραιώσουν την ηλεκτροκίνηση [2].

Οι λόγοι για τους οποίους οι μεγάλες χώρες, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Κίνα αρνούνται να συμμορφωθούν με τις προτάσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι κυρίως οικονομικής φύσεως. Η ανάπτυξη τους έχει στηριχθεί σε συμβατικές πηγές ενέργειας και σε ορυκτά καύσιμα. Η απεξάρτηση είναι δαπανηρή και διόλου συμφέρουσα. Οι απόψεις μάλιστα δίστανται για το αν τελικά η κλιματική αλλαγή θα οδηγήσει στο δυσσιώνιο μέλλον που προβλέπεται, υψηλών θερμοκρασιών και φυσικών καταστροφών, και για το αν δύναται να την αποτρέψει η αλλαγή στις μέχρι τώρα συνήθειες της βιομηχανίας.

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη και ο προσδιορισμός των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια ζωής ενός στροβιλοκινητήρα. Το λεγόμενο ανθρακικό αποτύπωμα φανερώνει τα ποσά παραγόμενων αερίων του θερμοκηπίου εξαιτίας της κατασκευής, της λειτουργίας και της απόσυρσης ενός προϊόντος. Οι θερμικές στροβιλομηχανές αντιμετωπίζουν λιγότερα προβλήματα σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος διότι κατά τη λειτουργία τους παράγουν λιγότερους ρύπους σε σχέση με τους εμβολοφόρους κινητήρες. Όμως πλέον η απειλή της κλιματικής αλλαγής δημιουργεί νέες προκλήσεις για τους μηχανικούς, οι οποίοι καλούνται να λάβουν σοβαρά υπόψη την επίδραση των αέριων του θερμοκηπίου κατά τον σχεδιασμό των μηχανών αυτών.

Η εργασία περιορίζεται στις εφαρμογές των θερμικών στροβιλομηχανών στην πολιτική αεροπορία, ενώ γίνεται και αναφορά στους αεριοστρόβιλους μηχανικής ισχύος οι οποίοι παρουσιάζουν δομικές ομοιότητες αλλά έχουν σημαντικές λειτουργικές διαφορές. Δε γίνεται μελέτη της χρήσης τους σε πλοία όπου ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές. Επίσης δε γίνεται μελέτη για τα άλλα είδη εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούνται σε χαμηλών ταχυτήτων αεροσκάφη.

Στην εργασία ερευνώνται όλα τα βήματα της διαδικασίας παραγωγής, λειτουργίας και τελικής απόσυρσης των στροβιλοκινητήρων, σύμφωνα με τα πρότυπα της ανάλυσης κύκλου ζωής (life cycle assessment). Για το σκοπό αυτό, αξιοποιούνται βιβλιογραφικές πηγές, επιστημονικές μελέτες και αναπτύσσεται κατάλληλη εφαρμογή επεξεργασίας δεδομένων σε υπολογιστικό περιβάλλον.



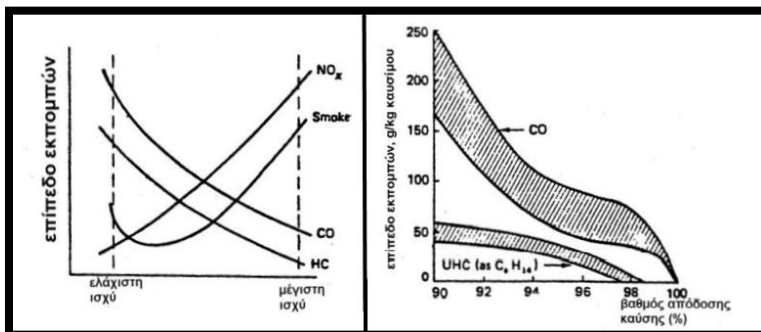
1.2 Ανασκόπηση τεχνολογίας αεροσκαφών και στροβιλοαντιδραστήρων

Τα σύγχρονα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας εξοπλίζονται με στροβιλοαντιδραστήρες διπλού ρεύματος, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν:

- Μεγαλύτερη άνεση σε πτήσεις διαφόρων ταχυτήτων, υψηλών ή χαμηλών.
- Ισχυρή ώση με ασθενέστερη (σε σχέση με τους κινητήρες απλού ρεύματος) κύρια δέσμη πρόωσης, άρα μικρότερη ηχορύπανση.
- Μείωση της κατανάλωσης του καύσιμου (fuel consumption) χάρη στον επιπλέον αέρα που παρακάμπτει τον θάλαμο καύσης και δημιουργεί τη δέσμη ώσης.
- Μικρότερο μέγεθος, ειδικά σε σχέση με τους στροβιλοκινητήρες απλού ρεύματος παλαιότερης τεχνολογίας.

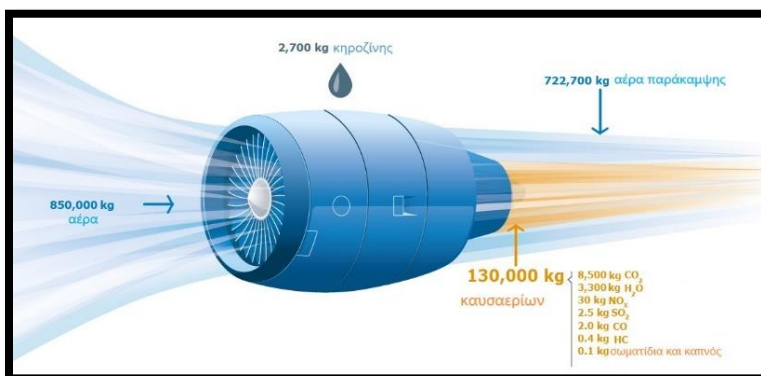
Κύριοι ρύποι τους είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και τα οξείδια του θείου (SO_x). Οξείδια του θείου εμφανίζονται αν το καύσιμο περιέχει θείο, που συμβαίνει στη κηροζίνη. Επειδή τα οξείδια αυτά είναι επικίνδυνα, κατά τη διύλιση λαμβάνονται μέτρα ώστε να αφαιρεθεί μεγάλη ποσότητα του θείου από το καύσιμο. Οι υπόλοιποι ρύποι αναπόφευκτα εμφανίζονται με το πέρας της καύσης. Η δημιουργία των οξειδίων του αζώτου ευνοείται από τις υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 1.800° Κελσίου), ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα και οι υδρογονάνθρακες από την ατελή καύση. Μέτρα, επομένως, αντιμετώπισης τους είναι η ψύξη (με νερό) ή η καύση σε στάδια (ώστε η θερμοκρασία να είναι επαρκής αλλά ταυτόχρονα όσο το δυνατόν χαμηλή). Επίσης ωφέλιμη είναι η κατάλληλη διαμόρφωση του θαλάμου καύσης ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη πραγματοποίηση των φαινομένων μεταφοράς της καύσης. Η επίτευξη των παραπάνω βοηθά όχι μόνο το περιβάλλον αλλά και την καλύτερη απόδοση των μηχανών, οπότε το κέρδος είναι διπλό.

Συνολικά, οι θερμικές στροβιλομηχανές έχουν δέκα φορές μικρότερο επίπεδο εκπομπών ρύπων σε σχέση με τις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης [3]. Στην [Εικόνα 1-1](#) φαίνεται η σχέση εκπομπής των ρύπων με τις επιδόσεις των διεργασιών στον θάλαμο καύσης. Οι εναλλαγές της ισχύος εξαρτώνται από τις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρισκεται ένα αεροσκάφος: την απογείωση (take-off), την άνοδο (ascent), την πλεύση (cruise), την κάθοδο (descent) και την προσγείωση (landing). Όλες μαζί αποτελούν την αποστολή (mission) του αεροσκάφους. Είναι σαφές ότι κάθε είδος αεροσκάφους έχει κινητήρες με διαφορετικές προδιαγραφές ανάλογα την αποστολή του (μαχητικό αεροσκάφος ή πολιτικό αεροσκάφος). Οι προδιαγραφές μπορεί να είναι η μέγιστη δυνατή ταχύτητα κατά τη διάρκεια της πορείας, ή ο ρυθμός μεταβολής της ανόδου. Είναι επίσης σαφές ότι κατά τη διάρκεια της ανόδου και της καθόδου οι εξωτερικές συνθήκες αλλάζουν ραγδαία λόγω της διαφοράς υψομέτρου.



Εικόνα 1-1 : Σχέση παραγωγής ρύπων με την ποιότητα καύσης (Πηγή : "Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων"¹).

Σε χαμηλές θερμοκρασίες (λόγω υψομέτρου) οι εκπεμπόμενοι υδρατμοί συμπυκνώνονται σχηματίζοντας τη γνωστή νεφώδη ουρά των αεροπλάνων, που ονομάζεται ίχνος συμπύκνωσης (contrail). Οι συμπυκνωμένοι ατμοί έχουν μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης ακτινοβολίας στο χρονικό διάστημα που παραμένουν σε αυτή (Πίνακας 12-2). Οπότε οι καθημερινές, χιλιάδες πτήσεις που πραγματοποιούνται, συνεισφέρουν στη στιγμιαία υπερθέρμανση του πλανήτη αλλά και στη διαμόρφωση του τοπικού καιρού (σχηματισμός νεφών).



Εικόνα 1-2 : Ρύποι ενός αεροσκάφους με δύο κινητήρες διπλού ρεύματος (Πηγή: Ευρωπαϊκή υπηρεσία ασφαλείας αεροπορίας²)

Η **Εικόνα 1-2** δείχνει το ποσοστό του κάθε ρύπου που εκλύει συνολικά ένα αεροσκάφος (με δύο στροβιλοκινητήρες) κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού μίας ώρας με εκατό πενήντα επιβάτες.

¹ Μαθιουδάκης Κ., Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων, Ε.Μ.Π., 2016

² <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/overview-aviation-sector/emissions> (Τελευταία πρόσβαση: 22/12/2021)



1.3 Έρευνα στο πεδίο των ανθρακικών εκπομπών της αεροπορίας

Η έρευνα πάνω στη μείωση των ανθρακικών εκπομπών της αεροπορίας έχει δύο κλάδους:

- Δημιουργία αεροσκαφών πλήρως ανεξάρτητων του άνθρακα (carbon free). Ο στόχος αυτός είναι εφικτός αν οι κινητήρες είναι ηλεκτρικοί ή αξιοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο.
- Βελτίωση της υπάρχουσας τεχνολογίας των στροβιλοκινητήρων, προς μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και της ποσότητας των ρύπων. Αλληλένδετη είναι και η προσπάθεια δημιουργίας νέων τύπων αεροσκαφών.

Στο εδάφιο αυτό θα εξεταστούν επιστημονικές μελέτες που εμπίπτουν στον δεύτερο κλάδο και αφορούν το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Η μελέτη τους, σε συνδυασμό με τις πληροφορίες των προηγούμενων κεφαλαίων θα αποτελέσουν τη βάση για την ανάπτυξη του υπολογιστικού τμήματος της εργασίας και θα αναδείξουν την αξία της.

Για την αεροπορία, οι ποσότητες παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα είναι συγκρίσιμες για όλες τις χώρες. Η κατηγοριοποίηση τους, μάλιστα, ανά χώρα, δεν έχει πολλή σημασία. Η παραγωγή ενέργειας μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους ανάλογα τις επιθυμίες της κάθε χώρας, είτε με συμβατικές μεθόδους, είτε μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η επίγεια μετακίνηση μπορεί επίσης να γίνει με αρκετούς δυνατούς τρόπους, σε ατομικό επίπεδο (βάδισμα, ποδήλατο, αυτοκίνητο) ή χρησιμοποιώντας τα δημόσια μέσα μεταφοράς.

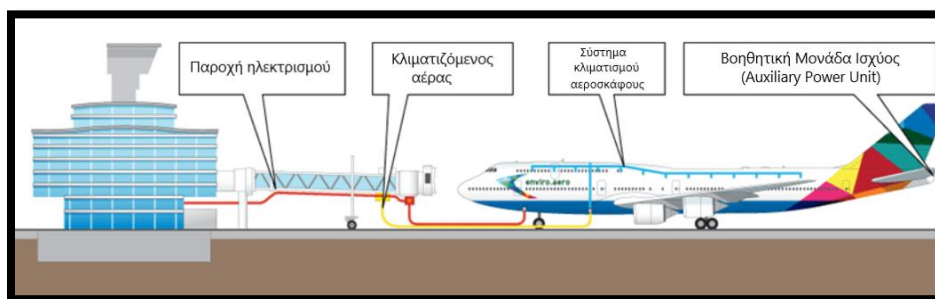
Για τις εναέριες μετακινήσεις του, ωστόσο, το επιβατικό κοινό δεν έχει επιλογή και στηρίζεται σε ιδιωτικές αεροπορικές εταιρείες. Οι εταιρείες αλλά και οι κατασκευαστές αεροσκαφών πρέπει να ακολουθήσουν μια κοινή γραμμή για το μέλλον, προκειμένου να αποφευχθούν οι δυσάρεστες συνέπειες του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ένα πρώτο συμπέρασμα, τότε, είναι ότι η μείωση των εκπομπών της αεροπορίας είναι σε μεγάλο βαθμό ευθύνη του ίδιου του μηχανικού που σχεδιάζει το αεροσκάφος και ειδικότερα τη μηχανή που το κινεί. Για να είναι εφικτή η διακριτοποίηση της ευθύνης που φέρει το επιβατικό κοινό και ο σχεδιαστής, θα πρέπει η διερεύνηση των εκπομπών να γίνει προς ένα στοιχείο αναφοράς, που για την εργασία αυτή αποτελεί ο ίδιος ο στροβιλοκινητήρας.

Ας εξεταστεί πρώτα η συνολική εικόνα της αεροπορίας, από τη σκοπιά της αντιμετώπισης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η μελέτη περίπτωσης (case study) του Glenn Baxter για το Παγκόσμιο Περιοδικό Περιβάλλοντος, Γεωργίας και Βιοτεχνολογίας (I.J.E.A.B.) [4] δείχνει πως οι σύγχρονοι φορείς της αεροπορίας αναγνωρίζουν τις περιβαλλοντικές ανησυχίες των καιρών και πράττουν αναλόγως. Στον όρο «φορείς της αεροπορίας»

συμπεριλαμβάνονται όλοι οι παράγοντες που αποτελούν κομμάτι του κύκλου ζωής ενός αεροσκάφους: κατασκευαστές, αεροδρόμια, εταιρείες μεταφορών και εταιρείες πολιτικής αεροπορίας. Σημαντικό εργαλείο αποτελεί η μελέτη του ανθρακικού αποτύπωματος, η οποία αναλύεται εκτενώς στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας.

Η περιπτωσιολογική μελέτη αναλύει τις μεθόδους με τις οποίες οι φορείς επιδιώκουν να μειώσουν τον ανθρακικό τους αποτύπωμα. Αυτές είναι:

- Μείωση του πρόσθετου βάρους του αεροσκάφους, με τον βέλτιστο εφοδιασμό τροφίμων, νερού, προσωπικού και άλλου υλικού παροχής εξυπηρέτησης των επιβατών. Αυτό συνεπάγεται και μείωση του φορτίου που καλούνται να κινήσουν οι στροβιλοαντιδραστήρες.
- Χρήση ηλεκτρικών οχημάτων (μεταφοράς αποσκευών για παράδειγμα) στα αεροδρόμια ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα του τοπικού αέρα. Οπότε είναι απαραίτητη η διακριτοποίηση της συνεισφοράς των αεροδρομίων και των αεροσκαφών στις εκπομπές της αεροπορίας (και στη μελέτη της διπλωματικής εργασίας).



Εικόνα 1-3 : Επίγεια Σταθερή Ηλεκτρική Ισχύς (Πηγή : Aviation Benefits³)

- Βελτιστοποίηση των διαδικασιών απογείωσης και προσγείωσης προς ελάττωση των εκπομπών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η επίτευξη διαδικασίας συνεχούς προσγείωσης (C.D.O. : Continuous Descent Operation). Όταν το αεροσκάφος επιχειρεί μία C.D.O., προσγειώνεται με τους στροβιλοκινητήρες σε μηδενικό φορτίο (ρελαντί) και μειώνονται οι ανθρακικές εκπομπές. Πρόκειται για μια διαδικασία βέβαια που απαιτεί καλό προγραμματισμό και συντονισμό πύργου ελέγχου και πιλότων.

³ <https://aviationbenefits.org/case-studies/fixed-electrical-ground-power/> (Τελευταία πρόσβαση : 31/3/2022)



- Χρήση Επίγειας Σταθερής Ηλεκτρικής Ισχύος (F.E.G.P. : Fixed Electrical Ground Power) για τις διαδικασίες καθαρισμού και κλιματισμού (πριν την απογείωση) του αεροσκάφους, η οποία παρέχεται από τον αερολιμένα και μπορεί να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η χρήση της γίνεται για περιορισμό των εκπομπών της Βοηθικής Μονάδας Ισχύος (A.P.U. : Auxiliary Power Unit). Σημειώνεται ότι εξετάζονται και μέθοδοι αντικατάστασης της δεύτερης με κυψέλες υδρογόνου. Στην **Εικόνα 1-3** παρουσιάζεται η εγκατάσταση F.E.G.P.
- Καθολική εφαρμογή μεθόδων διαγνωστικής και συντήρησης στροβιλοκινητήρων. Οι στροβιλοκινητήρες των αεροσκαφών εκτίθενται σε βλαβερούς παράγοντες όπως σκόνη, άλας, αιθάλη και έντομα. Ο επιμελής και έγκαιρος καθαρισμός τους οδηγεί σε καλύτερες επιδόσεις και μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου.

Επιδίωξη υπολογισμού των ρύπων σε αεροδρόμιο γίνεται στην εργασία των Chilongola και Ahyudanari, η οποία βασίστηκε στη παλαιότερη μελέτη των Vujonvic και Todorovic. Παρουσιάστηκε στο Διεθνές Συνέδριο για την Αεροδιαστημική και την Αεροπορία (International Conference on Aerospace and Aviation) το 2019 [5]. Η εργασία χρησιμοποιεί τον τυποποιημένο Κύκλο Προσγείωσης και Απογείωσης (L.T.O. : Landing and Take-off Cycle) του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας. Ο Κύκλος παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα (**Πίνακας 1-1**) και αφορά όλες τις ενέργειες του αεροσκάφους κάτω από 914 μέτρα (3.000 πόδια).

Πίνακας 1-1 : Κύκλος Προσγείωσης και Απογείωσης⁴

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΒΑΘΜΟΣ ΩΣΗΣ (%)	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ [min]
ΜΗΔΕΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ, ΤΡΟΧΟΔΡΟΜΗΣΗ (TAXI/IDLE)	100	26
ΚΑΘΟΔΟΣ, ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗ	30	4
ΑΝΑΒΑΣΗ	85	2,2
ΑΠΟΓΕΙΩΣΗ	100	0,7

Πηγή : «Aviation and Aircraft Engine Emissions at Juanda [5]»

Για τον προσδιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιείται η εξίσωση:

⁴ Τα δεδομένα παρουσιάζονται όπως ακριβώς είναι στην εργασία των Chilongola και Ahyudanari



$$E_j = \sum (TIM_{jk} \cdot 60) \cdot EF_{CO_2} \cdot FC_{jk} \cdot N_j \quad (1.1)$$

Όπου :

TIM_{jk} : Ο χρόνος που ένα αεροσκάφος j περνά σε λειτουργία k , σύμφωνα με τον Πίνακα 1-1 (Πίνακας 1-1) (min).

FC_{jk} : Η κατανάλωση καυσίμου σε κάθε λειτουργία k ενός αεροσκάφους j (kg/s).

N_j : Αριθμός στροβιλοαντιδραστήρων διπλού ρεύματος (turbofan) στο αεροσκάφος j .

EF_{CO_2} : Η παραγόμενη μάζα διοξειδίου του άνθρακα ανά χιλιόγραμμο καυσίμου που καίγεται (g/kg). Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από το μοντέλο του κινητήρα που μελετάται, από το αεροσκάφος και τις συνθήκες λειτουργίας. Το καύσιμο θεωρείται κηροζίνη και ο δείκτης ισούται με 3,155.

Μεγάλο μέρος της μελέτης, επομένως, στηρίχθηκε στον υπολογισμό της κατανάλωσης του καυσίμου. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με δεδομένα από το Διεθνές Αεροδρόμιο της Χουάντα (Juanda International Airport) (Ινδονησία). Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα :

Πίνακας 1-2 : Ποσοστό παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα στο αεροδρόμιο

ΣΤΑΔΙΟ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ CO ₂ [%]
ΕΠΙΓΕΙΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗ (ΕΚΚΙΝΗΣΗ-ΤΕΛΟΣ)	40
ΑΠΟΓΕΙΩΣΗ	12
ΑΝΟΔΟΣ-ΑΝΑΒΑΣΗ	30
ΚΑΘΟΔΟΣ-ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗ	18

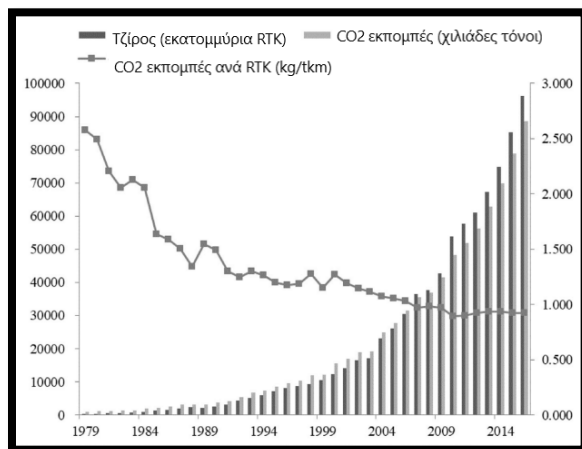
Πηγή : Aviation and Aircraft Engine Emissions at Juanda International Airport [5]

Είναι εμφανής η επίδραση του συνδυασμού της ώσης και της χρονικής διάρκειας λειτουργίας του κινητήρα, με την ποσότητα του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα.

Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανοδική ή συνθετική («bottom-up»), διότι χρησιμοποιούνται δεδομένα για τα αεροσκάφη (για τους στροβιλοκινητήρες δηλαδή) και για τις πτήσεις τους. Στην εργασία των Jinglei Yu, Chaofeng Shao, Chenyang Xue και Huaqing Hu για το περιοδικό Energy Policy [6] όπου το ζήτημα είναι οι οικονομικές επιπτώσεις της παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα, χρησιμοποιείται η πιο απλή, πανοραμική προσέγγιση («top-down») :

$$E_{CO_2} = AR_f \cdot EF_{CO_2} \quad (1.2)$$

Με AR_f να είναι η ετήσια κατανάλωση καυσίμου και E_{CO_2} η συνολική παραγόμενη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα από τον τομέα της αεροπορίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ενώ υπάρχει μεγάλη αυξητική τάση στις εκπομπές, η διαχείριση τους είναι καλύτερη τα τελευταία χρόνια (δείκτης CO_2 προς RTK).



Εικόνα 1-4 : Παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα κινεζικού αεροπορικού στόλου (Πηγή : China's aircraft-related CO2 emissions: Decomposition analysis, decoupling status, and future trends)

Η μελέτη των εκπομπών κατά την πτήση είναι πιο σύνθετη διαδικασία. Ως παράδειγμα δίνεται η εργασία των Antonio Filippone, Nicholas Bojdo, Shreya Mehta και Ben Parkes που παρουσιάστηκε στο ένατο συνέδριο του συνδέσμου OpenSky [7]. Το OpenSky είναι ένας μη κερδοσκοπικός σύνδεσμος με έργο τη δημιουργία μιας συλλογής δεδομένων από διάφορα αμερικάνικα και ευρωπαϊκά αεροσκάφη [8]. Η εθελοντική δορυφορική λήψη δεδομένων είναι αυτόματη και περιλαμβάνει τις διαδρομές των αεροσκαφών, τις συνθήκες πτήσης, καιρού και την εναέρια κίνηση (air-traffic).

Συνοπτικά, η εργασία τους περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα :

- 1) Συλλογή δεδομένων από το OpenSky. Συχνά αυτά περιέχουν μερικά κενά (για παράδειγμα για χαμηλά υψόμετρα) τα οποία πρέπει να εκτιμηθούν με προσομοιώσεις.
- 2) «Φιλτράσιμα» και κατάλληλη προσαρμογή των δεδομένων (θόρυβος, μη αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα). Η δουλειά αυτή μπορεί να γίνει και μέσω machine-learning.
- 3) Χρησιμοποίηση μοντέλων για τη συμπεριφορά των αεροσκαφών, που χαρακτηρίζονται από τις εξισώσεις :

$$W = ZFW + \max W_f \cdot \left(\frac{X}{X_{design}} \right) \quad (1.3)$$



$$F_N = D + \left(\frac{W}{g}\right) \cdot \frac{dW}{dt} + W \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{dz}{dt} \right) \right) \quad (1.4)$$

Η εξίσωση 1.3 δίνει το βάρος σε συναρτήση με :

Το βάρος δίχως το καύσιμο (Zero Fuel Weight : ZFW), τη μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα σε καύσιμο ($maxWf$), την εμβέλεια του αεροσκάφους X και την εμβέλεια στο σημείο σχεδίασης X_{design} .

Η εξίσωση 1.4 δίνει την ώση σε συνάρτηση με :

Την οπισθέλκουσα δύναμη του αεροσκάφους D , το βάρος W από τη σχέση 1.3, ενώ το διαφορικό dz/dt εκφράζει είτε την άνοδο, είτε την κάθοδο του αεροσκάφους .

4) Αντίστροφος υπολογισμός θερμοδυναμικών και ρευστομηχανικών δεδομένων (ολικές θερμοκρασίες, παροχή καυσίμου, δείκτες έκλυσης ρυπογόνων παραγόντων) μέσω της ώσης και του βάρους. Ειδικά για τους δείκτες, αξιοποιείται η τράπεζα δεδομένων του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (I.C.A.O. Databank). Όμως αυτοί παρέχονται για συνθήκες αναφοράς και στο επίπεδο της θάλασσας, οπότε απαιτούνται ορισμένες προσεγγίσεις για διάφορους αριθμούς Mach, υψόμετρο και τα χαρακτηριστικά του καιρού.

5) Οργάνωση των αποτελεσμάτων βάσει αποστολής ή αεροσκάφους.

Οι ανθρακικές εκπομπές έχουν μεγάλο εύρος τιμών. Για μια αποστολή μεγάλης εμβέλειας μπορεί να παράγονται κατά μέσο όρο 7,35 kg έως 106 kg διοξειδίου του άνθρακα ανά (ναυτικό) μίλι (περίπου 3,5 με 50 kg ανά χιλιόμετρο). Υπάρχει ξεκάθαρη εξάρτηση από την ποσότητα καυσίμου που καίγεται ανά περίπτωση. Για την περίπτωση ενός ελικοπτέρου (με κινητήρα αναφοράς τον Turbomeca Arriel 2B1), οι εκπομπές ανέρχονται στα 806 kg για μία πτήση (αναφοράς) πενήντα πέντε λεπτών.

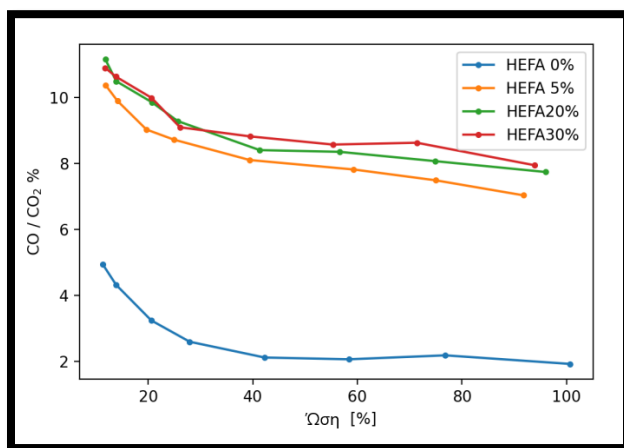
Σημειώνεται ότι έχουν αναπτυχθεί πολλά υπολογιστικά προγράμματα για τον προσδιορισμό των ρύπων ενός αεροσκάφους. Ένα από αυτά είναι το C.A.M.A.C.M. (Commercial Aircraft's Mission Analysis Computational Model) του εργαστηρίου Στροβιλομηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το πρόγραμμα μπορεί να δώσει πληροφορίες για την κατανάλωση του καυσίμου και τους ρύπους, παρέχοντας ευχέρεια στον χρήστη να ορίσει ως μεταβλητές χαρακτηριστικά της λειτουργίας και της αποστολής του αεροσκάφους. Εκτενέστερη μελέτη του C.A.M.A.C.M. γίνεται στη παράγραφο 6.2.

Περνώντας στον ίδιο τον στροβιλοκινητήρα, περιγράφονται δύο αντιπροσωπευτικές εργασίες. Η ομάδα των Przynowa R., Gawron B., Bialecki, T., Łegowik A., Merkisz J. και Jasinski R. πραγματοποίησε ένα εργαστηριακό πείραμα σε στροβιλοαντιδραστήρα DGEN 380 [9]. Είναι ο μικρότερος, μελλοντικά διαθέσιμος στροβιλοαντιδραστήρας και προορίζεται για μικρά υποηχητικά αεροσκάφη (4-5 θέσεων) [10]. Βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και εκκρεμεί να λάβει πιστοποίηση για ενσωμάτωση σε αεροσκάφη.

Σκοπός της έρευνας τους είναι η δοκιμή νέων βιοκαυσίμων, η οποία πραγματοποιείται σε μικρούς στροβιλοαντιδραστήρες (microturbines). Η χρήση μεγάλων στροβιλοαντιδραστήρων δεν είναι πρακτική, γιατί είναι η μικρή ποσότητα βιοκαυσίμου που είναι δυνατόν να δημιουργηθεί. Το ενδιαφέρον σημείο είναι ότι οι μετρήσεις των ρύπων (CO, NO_x, HC, CO₂) γίνεται απευθείας από τη πηγή, με τη χρήση του αναλυτή SemTech DS. Ο αναλυτής λειτουργεί ως μετρητής παροχής και μπορεί να διαχωρίζει ποσότητες διαφορετικών αερίων. Στην [Εικόνα 1-5](#) παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη:



Εικόνα 1-5 : Πειραματική διάταξη ανάλυσης βιοκαυσίμου (Πηγή: Performance and Emissions of a Microturbine and Turbofan Powered by Alternative Fuels)

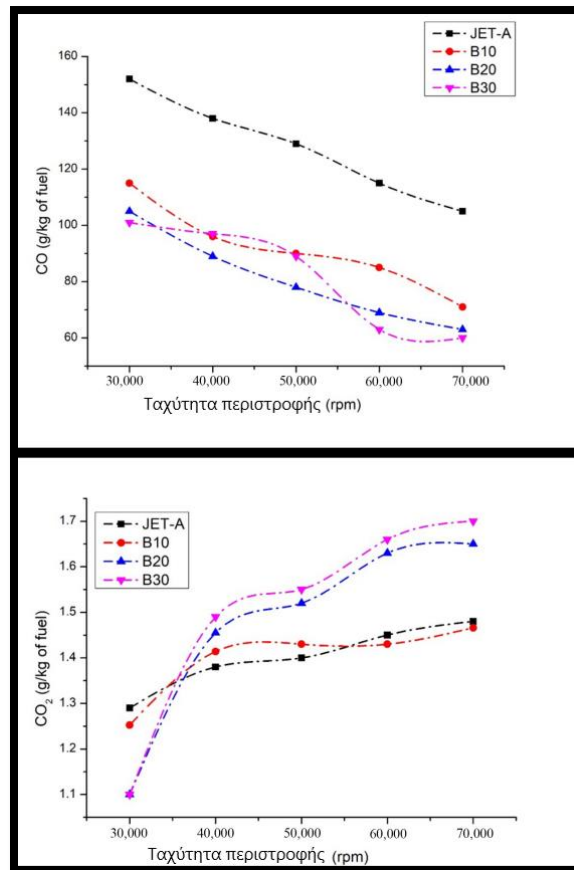


Εικόνα 1-6 : Συμπεράσματα για υδρογονοκατεργασμένους εστέρες και λιπαρά οξέα (Πηγή: Performance and Emissions of a Microturbine and Turbofan Powered by Alternative Fuels)

Τα βιοκαύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα A.T.J και H.E.F.A. με διαρκώς μεγαλύτερη αύξηση της ανάμιξης με το συμβατικό καύσιμο και αυξομείωση των στροφών σύμφωνα με τον κύκλο Προσγείωσης και Απογείωσης. Και στις δύο εφαρμογές διαπιστώθηκε μείωση στην παραγωγή υδρογονανθράκων, αλλά αύξηση στην παραγωγή του μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Η παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα είχε μία αρκετά μικρή αύξηση ([Εικόνα 1-6](#)). Το φαινόμενο δε μπορεί να ερμηνευτεί με βεβαιότητα, αλλά η κυρίαρχη υπόθεση είναι ότι οφείλεται στις ιδιότητες του του στροβιλοαντιδραστήρα

(υψηλή τιμή S.F.C. (specific fuel consumption) λόγω μεγάλου ακτινικού διακένου (tip clearance)).

Σε πειραματική διάταξη ενός μικρού στροβιλοκινητήρα με μονοβάθμιο φυγοκεντρικό συμπιεστή και μονοβάθμιο αξονικό στρόβιλο, οι Balaji V., Kaliappan S, Madhuvanesan D.M., Ezhumalai D.S., Boorathi S., Patil Pravin P. και Saiprakash M. κατέληξαν σε διαφορετικά συμπεράσματα [11].



Εικόνα 1-7 : Συμπεράσματα χρήσης βιοκαυσίμου με νανοσωματίδια (Πηγή: Combustion analysis of biodiesel-powered propeller engine for least environmental concerns in aviation industry [11])

Για τη μελέτη τους δημιούργησαν ένα ιδιαίτερο βιοκαύσιμο, το οποίο αποτελείται από μίγμα φυτικών ελαίων (H.E.F.A.) με νανοσωματίδια οξειδίου του αργιλίου. Τα νανοσωματίδια δημιουργούν επιφάνειες πλούσιες σε οξυγόνο ώστε να εμπλουτίσουν το καύσιμο και να διευκολύνουν την καύση.

Όπως φαίνεται από την **Εικόνα 1-7** η χρήση του βιοκαυσίμου οδήγησε σε καλύτερη καύση (μείωση του παραγόμενου CO), αλλά αύξησε τις παραγωγές διοξειδίου του άνθρακα λόγω τις μεγαλύτερης περιεκτικότητας του καυσίμου σε οξυγόνο.



Τέλος, παρουσιάζεται η εργασία των Tuzcu H., Sohret Y. και Caliskan H., η οποία αφορά τις επιδόσεις ενός στροβιλοαντιδραστήρα διπλού ρεύματος ως προς την θερμική απόδοση, τις εκπομπές και το κόστος των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [12]. Ο στροβιλοαντιδραστήρας αποτελείται από στρόβιλο υψηλής και χαμηλής πίεσης και τα σημαντικά θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον Πίνακα 1-3 (Πίνακας 1-3).

Πίνακας 1-3 : Χαρακτηριστικά στροβιλοαντιδραστήρα της έρευνας

ΣΗΜΕΙΟ	ΡΕΥΣΤΟ	ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ (KG/S)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (Κ)	ΠΙΕΣΗ (ΚΡΑ)
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	Αέρας	-	288,1	101,3
ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ	Αέρας	70,33	288,1	100,3
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ (ΕΙΣΟΔΟΣ)	Αέρας	70,33	453,6	397,2
ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ (ΕΙΣΟΔΟΣ)	Αέρας	70,33	701,1	1.608
ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	Κηροζίνη	2,97	288,1	101,3
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	Καυσαέριο	73,3	1.217	1.544
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	Καυσαέριο	73,3	941,5	578
ΕΞΟΔΟΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	Καυσαέριο	73,3	705,2	180

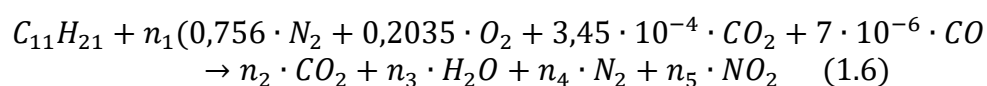
Πηγή : Energy, environment and enviroeconomic analyses and assessments of the turbofan engine used in aviation industry [12]

Η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται δίνεται από την εξίσωση:

$$X_{CO_2} = Y_{CO_2} \cdot t_{working} \quad (1.5)$$

Η οποία εκφράζεται ως η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα σε χιλιόγραμμα ανά μία χρονική περίοδο, με Y_{CO_2} την παροχή διοξειδίου του άνθρακα μετά τον θάλαμο καύσης και $t_{working}$ την χρονική διάρκεια της λειτουργίας ενός στροβιλοαντιδραστήρα (κατά μέσο όρο δέκα ώρες την ημέρα).

Για τον προσδιορισμό της Y_{CO_2} χρησιμοποιείται η αναλυτική εξίσωση της καύσης της κηροζίνης :



Με n_i τις ποσότητες σε moles, ενώ το κόστος του διοξειδίου του άνθρακα για μία χρονική περίοδο (σε δολάρια) είναι:



$$C_{CO_2} = X_{CO_2} \cdot c_{CO_2} \quad (1.7)$$

Με c_{CO_2} να είναι η τιμή του άνθρακα (σε δολάρια) ανά τόνο το 2018. Τα αποτελέσματα της μελέτης φαίνονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 1-4):

Πίνακας 1-4 : Ανθρακικό και οικονομικό κόστος στροβιλοαντιδραστήρα

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Y_{CO_2}	9,969	kg/s
$t_{working}$	10	h/day
X_{CO_2}	359	tonCO ₂ /day
c_{CO_2}	16	US\$/tonCO ₂
C_{CO_2}	5743	US\$/day

Πηγή : Energy, environment and enviroeconomic analyses and assessments of the turbofan engine used in aviation industry [12]

Οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι τα δεδομένα που προκύπτουν από την προσωπική τους μελέτη είναι ακριβή, διότι προκύπτει πως ένα χιλιόγραμμο κηροζίνης εκλύει 3,35 χιλιόγραμμο διοξειδίου του άνθρακα. Τα δεδομένα της NASA δίνουν την ίδια ποσότητα ως 3,15 kg/kgCO₂, που είναι σχετικά κοντά (6% απόκλιση). Επομένως και ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός στροβιλοαντιδραστήρα μπορεί να δώσει ικανοποιητικά στοιχεία για τις εκπομπές των ρύπων του κατά τη λειτουργία του.

Συμπερασματικά υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να εκτιμηθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ενός συστήματος (αεροδρόμιο) ή ενός προϊόντος (αεροσκάφος – αεροπορικός κινητήρας). Το σύστημα μεταβάλλει τις εκπομπές του ανάλογα το είδος των εισροών ενέργειας και υλικών (χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, χρήση βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας). Επίσης φαίνεται ότι τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν αν οι πειραματικές διατάξεις παρουσιάζουν διαφορές.

Η πλειονότητα των μελετών επικεντρώνονται στις άμεσες εκπομπές των στροβιλοκινητήρων, ενώ λίγες εξετάζουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Μάλιστα, είναι σύνηθες οι μελέτες να εξετάζουν το αεροσκάφος ολόκληρο ως προς τον περιβαλλοντικό του αντίκτυπο. Η εργασία αυτή είναι ιδιαίτερα ξεχωριστή από τις άλλες, επομένως, αφού μελετάται ο στροβιλοκινητήρας ως ένα ανεξάρτητο προϊόν.

1.4 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μία εισαγωγή στο κομμάτι της μελέτης αέριων ρύπων στις θερμικές στροβιλομηχανές. Αρχικά παρουσιάστηκε η λειτουργία του στροβιλοκινητήρα και ο σχηματισμός και το είδος των αέριων ρύπων. Στη συνέχεια έγινε εστίαση στην επιστημονική έρευνα που πραγματοποιείται για την αντιμετώπιση τους μέσω της βελτίωσης του σχεδιασμού της λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα.



Η έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στο αεροδρόμιο και το αεροσκάφος συνολικά ή να αφοσιωθεί αποκλειστικά στον στροβιλοκινητήρα. Τα είδη των μελετών που μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίζονται κυρίως σε θεωρητικές μελέτες περιπτώσεων (case studies) αλλά και πραγματικές εργαστηριακές δοκιμές θαλάμων καύσης και καυσίμων.

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η μελέτη των ανθρακικών εκπομπών των στροβιλοκινητήρων συμπίπτει με τη βελτίωση της ποιότητας των διεργασιών καύσης και των επιδόσεων του κινητήρα. Η μελέτη μπορεί να είναι πολύπτυχη, ανάλογα τα όρια του συστήματος που έχουν οριστεί, ενώ επίσης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στο εργαστήριο, είτε υποθετικά «στο χαρτί».

1.5 Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια και τρία παραρτήματα τα οποία την εξυπηρετούν με σημαντικές συμπληρωματικές πληροφορίες.

Στο πρώτο κεφάλαιο που προηγήθηκε, παρουσιάστηκε μια εικόνα των επιστημονικών μελετών που παρατηρούνται στη διεθνή βιβλιογραφία, σχετικές με τις ανθρακικές εκπομπές των στροβιλομηχανών. Η πλειονότητα τους αφορά τη λειτουργία στροβιλοαντιδραστήρων με διάφορα καύσιμα, συμβατικά και μη, και τη χρήση εναλλακτικών τεχνολογιών για μείωση των εκπομπών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της μελέτης του ανθρακικού αποτυπώματος, ενώ δίνονται οι ορισμοί της ανάλυσης του κύκλου ζωής προϊόντων ή υπηρεσιών. Με αυτά τα δεδομένα, παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα επιστημονικών ερευνών ανάλυσης κύκλου ζωής και ανθρακικού αποτυπώματος αεροσκαφών, που αποτελούν βάση της εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο ξεκινά η περιγραφή της διαδικασίας προσδιορισμού του ανθρακικού αποτυπώματος ενός στροβιλοκινητήρα. Επιλέγεται ο στροβιλοαντιδραστήρας CFM56, ο οποίος είναι ο πιο διάσημος και διαδεδομένος κινητήρας αεροσκαφών μεσαίας και μικρής εμβέλειας. Το κεφάλαιο περιλαμβάνει τα βήματα μέσω των οποίων προσδιορίζεται η ποσοστιαία κατανομή της μάζας του κινητήρα η οποία είναι ο σημαντικότερος παράγοντας εκτίμησης των έμμεσων εκπομπών του στροβιλοκινητήρα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία προσδιορισμού των έμμεσων εκπομπών που περιλαμβάνουν τις μάζες των εξαρτημάτων του κινητήρα. Αυτές περιλαμβάνονται στα στάδια των υλικών, των κατεργασιών, των μεταφορών και της απόσυρσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία προσδιορισμού των άμεσων εκπομπών, της λειτουργίας και της χειροτέρευσης δηλαδή, καθώς και οι σχετιζόμενες εκπομπές της συντήρησης και της παραγωγής καυσίμων.

Στο έκτο κεφάλαιο αξιολογούνται όλες οι προαναφερόμενες μεθοδολογίες με σύγκριση των ευρημάτων με άλλες μελέτες και με τη χρήση άλλων υπολογιστικών εργαλείων ανθρακικού αποτυπώματος. Επίσης εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης του υπολογιστικού



εργαλείου που αναπτύχθηκε για τη μελέτη του ανθρακικού αποτυπώματος άλλων προϊόντων, εκτός από στροβιλοκινητήρες.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ευρήματα της εργασίας. Αναλύεται το ανθρακικό αποτύπωμα τριών στροβιλοκινητήρων και ο αντίκτυπος τους στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Εξετάζεται επίσης η χρήση εναλλακτικών καυσίμων, όπως τα βιοκαύσιμα και το υδρογόνο. Τέλος, εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας.

Στο πρώτο παράρτημα γίνεται μία εισαγωγή στις βασικές έννοιες της κλιματικής αλλαγής και στους λόγους για τους οποίους είναι απαραίτητη η μελέτη και η αποτροπή της. Δίνεται μία πλήρης εικόνα τόσο για τον μεταφορικό, όσο και για τον ενεργειακό τομέα.

Στο δεύτερο παράρτημα περιγράφονται οι τρόποι με τους οποίους η απειλή της κλιματικής αλλαγής επηρεάζει την αεροπορία και την ταυτόχρονη ανάπτυξη της τεχνολογίας για την αναχαίτησή της.

Στο τρίτο παράρτημα παρουσιάζεται το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας και μέσω του οποίου έγιναν οι υπολογισμοί για την εκτίμηση του ανθρακικού αποτυπώματος.



2. Ανθρακικό αποτύπωμα και ανάλυση κύκλου ζωής

Στο Κεφάλαιο 1 αναφέρθηκε πρώτη φορά το ανθρακικό αποτύπωμα. Για πληρότητα, ο ορισμός που δίνει η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι ο ακόλουθος:

«Το ανθρακικό αποτύπωμα ενός προϊόντος, αγαθού ή μίας υπηρεσίας είναι το σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται κατά την παραγωγή ή κατανάλωση του/της»

Η έννοια του ανθρακικού αποτυπώματος χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό προσδιορισμό των επιπτώσεων μίας δραστηριότητας, ενός ατόμου ή μίας χώρας στην κλιματική αλλαγή [13]. Δηλαδή ένα αεροδρόμιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αναλλοίωτο σύστημα στο οποίο επιδρούν ως παράγοντες εκπομπών οι επιβάτες (π.χ. λιγότερα ταξίδια, μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα). Άλλη σκοπιά είναι να θεωρηθεί το πλήθος των επιβατών δεδομένο και να βρεθούν οι τρόποι με τους οποίους το ίδιο το αεροδρόμιο μπορεί να μειώσει τις εκπομπές του (1.3). Γενικά, το ανθρακικό αποτύπωμα μπορεί να οριστεί για όποιο σύστημα επιθυμεί ο μελετητής οπότε και συχνά υπάρχουν αντιφάσεις ως προς τον ακριβή προσδιορισμό του.

Επιπλέον, σύμφωνα με το Παράρτημα I (Κεφάλαιο 12), αν και ονομάζεται «ανθρακικό αποτύπωμα», η ανάλυση του πρέπει να περιλαμβάνει και τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου, εκφρασμένα σε ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Για παράδειγμα, το μεθάνιο (CH_4) δε σχετίζεται με τη μελέτη του ανθρακικού αποτυπώματος ενός κινητήρα αυτοκινήτου, αλλά αποκτά ουσία όταν πρόκειται για μία ενεργειακή μονάδα που λειτουργεί με φυσικό αέριο. Είναι σύνηθες, βέβαια, να γίνεται αποκλειστική μελέτη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα θεωρώντας τις παραγόμενες ποσότητες των άλλων αερίων αμελητέες (1.3). Η παράλειψη τους όμως δεν είναι σωστή για μια επίσημη μελέτη εκπομπών βάσει των κανονισμών της ανάλυσης του κύκλου ζωής.

Στην περίπτωση της εργασίας, το αεροσκάφος και συγκεκριμένα οι κινητήρες του θεωρούνται οι παράγοντες των εκπομπών και αναζητείται το ανθρακικό αποτύπωμα τους. Σύμφωνα με τον ορισμό η μελέτη δεν πρέπει να περιοριστεί μόνο στη διάρκεια

λειτουργίας τους (1.3) αλλά και στην κατασκευή, μεταφορά και απόσυρση τους. Οπότε είναι απαραίτητη μία πλήρης εικόνα του κύκλου ζωής τους [14].

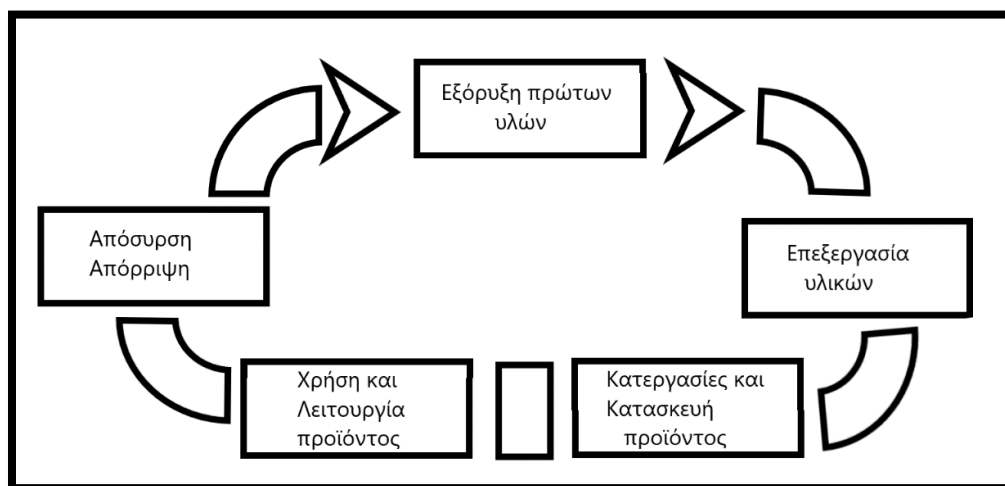
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων που μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να προσδιοριστεί το ανθρακικό αποτύπωμα μίας υπηρεσίας ή ενός προϊόντος και θα γίνει η σύνδεση τους με το σκοπό της εργασίας.

2.1 Σύγχρονες τάσεις στην ανάλυση των ανθρακικών εκπομπών

2.1.1 Ανάλυση του Κύκλου Ζωής

Η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η ανάλυση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment: L.C.A.). Η ανάλυση κύκλου ζωής αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχει ένα προϊόν ή μία υπηρεσία λόγω της ύπαρξής της. Οπότε η ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος πρόκειται για μία ανάλυση του κύκλου ζωής, εστιασμένη μόνο στα παραγόμενα αέρια του θερμοκηπίου. Δεν καταγράφονται, λόγω χάρη, τα ποσά της πιθανής εκπεμπόμενης ραδιενέργειας κατά την παρασκευή ενός προϊόντος.

Η **Εικόνα 2-1** δείχνει σχηματικά τα μέρη του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Είναι κατανοητό ότι αν ένα προϊόν κατασκευάζεται από ανακυκλώσιμα υλικά, τότε έχει λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στον κύκλο ζωής του. Επιπλέον στις εκπομπές περιλαμβάνονται και οι εκπομπές από τις μεταφορές μεταξύ των βασικών σταδίων του κύκλου ζωής (σημειώνονται ως βέλη στην **Εικόνα 2-1**).



Εικόνα 2-1 : Ανάλυση του κύκλου ζωής προϊόντος

Πολλές επιχειρηματικές ενώσεις και εταιρείες χρησιμοποιούν την ανάλυση του κύκλου ζωής στο πλαίσιο της βιωσιμότητας. Η χρήση της συμβάλλει στη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας των προϊόντων. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται ως εργαλείο για τη βελτίωση του σχεδιασμού των προϊόντων, στην επιλογή υλικών, στην επιλογή τεχνολογιών, και στην εδραίωση της ανακύκλωσης. Πέρα από τα περιβαλλοντικά της οφέλη, η ανακύκλωση λειτουργεί ως καλή τακτική μάρκετινγκ και μέσο εξοικονόμησης πόρων και χρήματος. Επίσης, επειδή η ανάλυση κύκλου ζωής είναι μία επαναληπτική



διαδικασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αποφάσεων και να καθορίσει την πορεία διαφόρων επενδύσεων.

Μειονέκτημα της ανάλυσης, βέβαια, είναι το γεγονός ότι κάθε μελέτη εστιάζει σε συγκεκριμένο πτυχή ενός περιβαλλοντικού προβλήματος. Δεν λαμβάνει υπόψη πιθανές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, καθώς και τοπικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Μια μελέτη που θα περιλάμβανε όλους τους παράγοντες και όλους τους τρόπους με τους οποίους αυτοί επηρεάζουν το οικοσύστημα θα ήταν μακροσκελής και η ολοκλήρωση της πολύ δύσκολη. Ως εκ τούτου, η ανάλυση του κύκλου ζωής δε μπορεί να θεωρηθεί το «απόλυτο» εργαλείο για τη βελτίωση όλων των περιβαλλοντικών και κοινωνικών προβλημάτων, αλλά σίγουρα μπορεί να στρέψει τους μηχανικούς και τις πολιτείες προς μία σωστή κατεύθυνση για την αντιμετώπιση τους [15].

Κυριότερα παραδείγματα υιοθέτησης της μεθόδου είναι η αμερικάνικη κοινότητα των Ομοσπονδιακών Πρακτικών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Federal Life Cycle Assessment Commons) και η Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (European Platform for Life Cycle Assessment).

Η πρώτη αποσκοπεί στη συνεργασία και στην παροχή τεχνογνωσίας για τις μεθόδους ανάλυσης κύκλου ζωής, μέσω της διάθεσης ενός αποθετηρίου δεδομένων στο αμερικάνικο κοινό και στους ενδιαφερόμενους φορείς. Η κοινότητα έχει επισημοποιηθεί από τα Υπουργεία Γεωργίας, Ενέργειας και Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών. Το αποθετήριο είναι συμβατό με το λογισμικό OpenLCA και οι χρήστες μπορούν να λαμβάνουν τα δεδομένα απευθείας από αυτό [16].

Η δεύτερη επίσης στοχεύει στην προώθηση των μεθόδων ανάλυσης κύκλου ζωής στις ευρωπαϊκές επιχειρήσεις, εταιρείες και κοινότητες. Η σημαντική συνεισφορά της Ευρωπαϊκής Πλατφόρμας για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι η παροχή του Διεθνούς Συστήματος Αναφοράς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (I.L.C.D) που αναλύεται στο εδάφιο 2.2.2.

Αναφορά πρέπει να γίνει στα λογισμικά που έχουν κάνει την εμφάνιση τους τα τελευταία χρόνια και βοηθούν στην υλοποίηση της ανάλυσης. Το OpenLCA είναι ένα δωρεάν και ελεύθερου πηγαίου κώδικα (open) λογισμικό, γραμμένο σε γλώσσα JAVA, το οποίο δημιουργήθηκε από την GreenDelta το 2006. Υποστηρίζει την ανταλλαγή και επεξεργασία δεδομένων από άλλα αντίστοιχα λογισμικά αλλά και από το Excel ή τις βάσεις του Διεθνούς Συστήματος Αναφοράς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [17]. Επίσης δημοφιλές είναι το λογισμικό SimaPro, που είναι δημιουργία της εταιρείας PRé και έχει το πλεονέκτημα της έτοιμης βιβλιοθήκης δεδομένων (π.χ. για την εξόρυξη ενός συγκεκριμένου υλικού), βοηθώντας να ξεπεραστούν πιο γρήγορα τα αρχικά στάδια της διαδικασίας [18].

Τέλος, σημειώνεται ότι έχουν αναπτυχθεί και νέα μοντέλα ανάλυσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων και της βιομηχανίας, όπως το μοντέλο Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος Προϊόντος (Product Environmental Footprint : P.E.F.) και το μοντέλο του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος Οργανισμού (Organisation Environmental Footprint : O.E.F.). Είναι νέα Ευρωπαϊκά Μοντέλα με αυστηρότερους



κανονισμούς και μια πιο ενδεδειγμένη διαδικασία ανάλυσης κύκλου ζωής (Πίνακας 2-2). Η δημιουργία τους οφείλεται στις καίριες ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή και την ανάγκη για καλύτερη ενημέρωση του καταναλωτικού κοινού.

2.1.2 Ανάλυση του Ανθρακικού Αποτυπώματος

Η ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος πρόκειται για μία ανάλυση κύκλου ζωής που περιορίζεται στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ενός ορισμένου συστήματος. Ο περιορισμός της περιβαλλοντικής μελέτης ενός προϊόντος ή μια υπηρεσίας μόνο στις ανθρακικές εκπομπές είναι μία σχετικά καινούρια τάση, δεδομένης της απειλής της κλιματικής αλλαγής.

Το ανθρακικό αποτύπωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό των εκπομπών που εκλύονται λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Άρα οι κανονισμοί που θέτουν τα μοντέλα ανάλυσης του κύκλου ζωής δεν εφαρμόζονται πάντοτε. Εξ ορισμού, θα χρειαζόταν να γνωρίζουμε όλες τις δραστηριότητες με τις οποίες ασχολείται ένα άτομο σε όλη του τη ζωή. Έτσι η ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος μπορεί απλά να σημαίνει ο υπολογισμός των έμμεσων ανθρακικών εκπομπών ενός ταξιδιώτη λόγω ενός αεροπορικού ταξιδιού.

Η ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος έχει μερικά μειονεκτήματα:

- Οι κατασκευαστές και οι βιομηχανίες δεν είναι υποχρεωμένες να παρέχουν δεδομένα για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τουλάχιστον στο ευρύ κοινό. Αρκετές μελέτες του ανθρακικού αποτυπώματος γίνονται μέσω υπολογισμών και παραδοχών που ενδεχομένως αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές.
- Όταν πραγματοποιείται μία μελέτη ενός μεγάλου συστήματος, είναι δύσκολο να υπολογιστούν επακριβώς οι εκπομπές που δεν οφείλονται αποκλειστικά στο κύριο μέρος του συστήματος. Ένα παράδειγμα είναι οι ανεμογεννήτριες. Φαινομενικά είναι ανθρακικά-ουδέτερες (carbon-neutral) αλλά η κατασκευή, η μεταφορά και η απόσυρση τους επιβαρύνει το περιβάλλον με ανθρακικές εκπομπές.
- Στον αντίποδα, μια ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος δίνει μια μονόπλευρη εικόνα ενός περιβαλλοντικού προβλήματος. Μια ανεμογεννήτρια έχει πράγματι ένα ποσό ανθρακικών εκπομπών στη διάρκεια του κύκλου ζωής της, αλλά δεν παύει να είναι μία σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.
- Στο ίδιο μήκος κύματος, μία ανάλυση ανθρακικού αποτυπώματος δεν μπορεί να δείξει πόσο «οικολογική» είναι μία πρακτική σε σχέση με μία άλλη. Η πυρηνική ενέργεια είναι επίσης μία ανθρακικά-ουδέτερη μορφή ενέργειας, αλλά δε παύει να έχει προβλήματα στη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων (τα οποία δε θα λάβει υπόψη της η ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος) [19], [20].



2.2 Αρχές των μεθοδολογιών και διεθνή πρότυπα

2.2.1 Στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής

Η ανάλυση κύκλου ζωής στηρίζεται στα πρότυπα ISO-14040:2006 και ISO-14044 τα οποία συντάχθηκαν με στόχο την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής (βλέπε κεφάλαιο 12). Σύμφωνα με αυτά, ορίζεται ως ο προσδιορισμός και η αξιολόγηση των εισροών (inputs), εκροών (outputs) και των επιπτώσεων που μπορεί να έχει το υπό μελέτη σύστημα (ή προϊόν) στο περιβάλλον [21], [22].

Τα βήματα που ακολουθεί μία αντίστοιχη μελέτη φαίνονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2-1):

Πίνακας 2-1 : Βήματα της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

ΒΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΣΤΟΧΟΣ - ΣΚΟΠΟΣ	Ορισμός του προϊόντος ή συστήματος που μελετάται. Ορισμός του σκοπού της εργασίας και το κοινό στο οποίο απευθύνεται. Ορισμός της χρήσης/λειτουργίας του προϊόντος/συστήματος (χρόνος λειτουργίας, τρόπος λειτουργίας, όρια λειτουργίας). Ορισμός των κατηγοριών επιδράσεων που θα μελετηθούν (impact).
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LIFE CYCLE INVENTORY)	Προσδιορισμός και συγκέντρωση όλων των εισροών/εκροών για το σύστημα ή προϊόν που μελετάται για όλα τα στάδια της Εικόνας 2-1 (Εικόνα 2-1). Οι εισροές και οι εκροές αφορούν την κατανάλωση ενέργειας, τα υλικά, τα παραπροϊόντα και τις εκπομπές στο περιβάλλον.
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT)	Κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων του καταλόγου ανάλυσης κύκλου ζωής (προηγούμενο βήμα) με βάση την επίδραση τους στο περιβάλλον ή στην κοινότητα και αναγωγή της επίδρασης τους στις ίδιες μονάδες μέτρησης.
ΕΡΜΗΝΕΙΑ (LIFE CYCLE INTERPRETATION PHASE)	Μελέτη των τελικών αποτελεσμάτων ως προς την ορθότητα και την ακρίβεια τους. Σύγκριση με άλλες μελέτες.

Πηγή : Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής⁵

Η δημιουργία του Καταλόγου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής περιλαμβάνει και κάποια άλλα βήματα, τα οποία περιγράφονται στον πίνακα 2-2 (Πίνακας 2-2).

⁵ <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleastessment.html> (Τελευταία πρόσβαση : 1/5/2022)



Πίνακας 2-2 : Λεπτομέρειες τις Ανάλυσης Επίδρασης του Κύκλου Ζωής

ΒΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΚΑΤΑΤΑΞΗ (CLASSIFICATION)	Αντιστοίχιση εισροών/εκροών με μία κατηγορία (Εικόνα 2-2).
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ & ΑΝΑΓΩΓΗ ΜΕΓΕΘΩΝ (CHARACTERISATION)	Πολλαπλασιασμός ή αναγωγή των μεγεθών με έναν παράγοντα (συγκεκριμένο για κάθε κατηγορία) ώστε να μπορεί να είναι κάθε εισροή/εκροή συγκρίσιμη με τις υπόλοιπες.
ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ (NORMALISATION)	Προαιρετικό βήμα (ISO-14040). Πολλαπλασιασμός με παράγοντες κανονικοποίησης ώστε να προκύψουν αδιάστατα μεγέθη τα οποία μπορούν να συγκριθούν με ορισμένες τιμές αναφοράς.
ΣΤΑΘΜΙΣΗ (WEIGHTING)	Προαιρετικό βήμα (ISO-14040). Ακολουθεί το βήμα της κανονικοποίησης, εφόσον γίνει. Αφορά την ολική ποσοστιαία επίδραση της κατηγορίας που επιλέχθηκε (λόγου χάρη της κλιματικής αλλαγής) στο περιβάλλον. Χαρακτηρίζει το πόσο άμεσα επιβλαβής είναι σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες.

Πηγή : Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής⁶

Σημειώνεται ότι για άλλα είδη μελετών όπως η μελέτη του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος Προϊόντος (Product Environmental Footprint : P.E.F.) και η μελέτη του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος Οργανισμού (Organisation Environmental Footprint : O.E.F.) τα βήματα της κανονικοποίησης και της στάθμισης δεν είναι προαιρετικά (Πίνακας 2-2). Επίσης, άλλα είδη ανάλυσης κύκλου ανάλυσης (κοινωνικός (social) και κόστους (cost)) μπορούν να περιλαμβάνουν άλλες κατηγορίες επίδρασης, διαφορετικές της Εικόνας 2-2 (Εικόνα 2-2). Παραδείγματα είναι οι συνθήκες της εργασίας και το κόστος των απαιτούμενων υλικών [23].

Για τη μελέτη των ανθρακικών εκπομπών, το ενδιαφέρον στρέφεται στην επίδραση που έχουν οι εισροές και οι εκροές στην Κλιματική Αλλαγή.

⁶ <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html> (Τελευταία πρόσβαση : 1/5/2022)



Εικόνα 2-2 : Κατηγορίες επίδρασης της ανάλυσης κύκλου ζωής στο περιβάλλον (Πηγή: Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής⁷)

Επιπλέον είναι σαφές ότι σε μία μελέτη που επικεντρώνεται στο ανθρακικό αποτύπωμα κύριο μέλημα είναι ο προσδιορισμός των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές αυτές σχετίζονται με τις ενεργειακές πηγές που αξιοποιούνται για την ολοκλήρωση κάθε σταδίου του κύκλου ζωής. Διαφορετικά αποτελέσματα θα προκύψουν αν η παραγωγή ενέργειας (για τις κατεργασίες για παράδειγμα) γίνει μόνο από ανανεώσιμες πηγές. Οι εκπομπές όμως που οφείλονται στις μεταφορές (φορτηγά οχήματα, πλοία) αναμένονται να είναι κοινές σε κάθε περίπτωση. Η ηλεκτροκίνηση, τουλάχιστον στις μεταφορές (logistics), είναι πρώιμη τεχνολογία και δεν θα έχει εξαπλωθεί στο άμεσο μέλλον.

Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη οι περιπτώσεις στις οποίες είναι εφικτή η απαγωγή των εκπομπών του άνθρακα. Η ανάλυση του κύκλου ζωής απαιτεί ωστόσο να επισημανθούν όλες οι πιθανές εισροές και εκροές από ένα σύστημα, άρα δε παραλείπονται εκπομπές που μπορούν να εξαγοραστούν μέσω της τιμολόγησης του άνθρακα.

2.2.2 Διεθνές Σύστημα Αναφοράς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Ο κατάλογος ανάλυσης κύκλου ζωής που δημιουργεί για την εργασία του ο ερευνητής ή η εταιρεία που παίρνει κάποια πρωτοβουλία, μπορεί να διαφέρει σε σχέση με αυτούς που έχουν κατασκευαστεί για άλλες μελέτες. Οι μικροδιαφορές αυτές δυσχεραίνουν την ανταλλαγή πληροφοριών και την εξέταση των αποτελεσμάτων ως προς την ανταπόκριση τους με τη πραγματικότητα. Άλλο πρόβλημα που εμφανίζεται συχνά στην πράξη είναι ότι πολλές βιομηχανίες και οργανισμοί δε συλλέγουν δεδομένα για την επιβάρυνση στο περιβάλλον από τις υπηρεσίες ή τα προϊόντα τους. Οπότε για μια ολοκληρωμένη έρευνα θα χρειαζόταν ο ερευνητής να επισκεφθεί έναν μεγάλο αριθμό εργοστασίων και

⁷ <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html> (Τελευταία πρόσβαση : 1/5/2022)



υπηρεσιών, να εφαρμόσει πειραματικές διαδικασίες και να αποκτήσει δικά του δεδομένα τα οποία θα έπρεπε να συγκρίνει με τα δεδομένα άλλων ερευνών. Όπως φάνηκε στο εδάφιο 1.3 τα πειράματα μπορεί να έχουν μη αναμενόμενα αποτελέσματα και τελικά να αμφισβητείται η ορθότητα της τελικής ανάλυσης.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δημιουργήσει το Διεθνές Σύστημα Αναφοράς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (International Life Cycle Data System : I.L.C.D.) ώστε υπό την καθοδήγηση των προτύπων ISO να δημιουργούνται βιβλιοθήκες δεδομένων που έχουν συνοχή. Στην Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για το Περιβάλλον, που είναι διαθέσιμη διαδικτυακά, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να βρουν πλούσιο υλικό σε μορφή ηλεκτρονικών βιβλίων, σχετικό με τη δημιουργία καταλόγων ανάλυσης αλλά και για τη συνολική διαδικασία της ανάλυσης κύκλου ζωής [24].

Ταυτόχρονα, αναπτύσσεται το Δίκτυο Δεδομένων του Διεθνούς Συστήματος Αναφοράς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (I.L.C.D. Data Network) στο οποίο οι φορείς που πραγματοποιούν αναλύσεις κύκλου ζωής μπορούν να παρέχουν τα δεδομένα τους και να αποκτούν πρόσβαση σε άλλα αντίστοιχα. Εννοείται ότι όλα τα διαθέσιμα δεδομένα ακολουθούν τις αρχές που θέτει το Διεθνές Σύστημα Αναφοράς για την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής [25].

2.2.3 Βάση Συντελεστών Εκπομπών

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change : I.P.C.C.) έχει δημιουργήσει έναν ηλεκτρονικό κατάλογο με συντελεστές εκπομπών αερίων. Ο κατάλογος είναι διαθέσιμος μέσω διαδικτύου και ο χρήστης μπορεί να αναζητήσει πληροφορίες για όλα τα αέρια του θερμοκηπίου σε διάφορες συνθήκες εκπομπής [26].

Όμοια, υπάρχει κατάλογος και οδηγίες για τη χρήση των συντελεστών εκπομπών στην ιστοσελίδα του Πρωτοκόλλου των Αερίων του Θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Protocol), μαζί με οδηγίες για τη χρήση τους και τον υπολογισμό των εκπομπών. Οι οδηγίες αυτές είναι επίσης διαθέσιμες μέσω διαδικτύου.

Τέλος, χρήσιμη για την εργασία είναι η βάση δεδομένων του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας για τους συντελεστές εκπομπών αεροπορικών κινητήρων.

2.2.4 Στάδια της Ανάλυσης Ανθρακικού Αποτυπώματος

Το πρότυπο ISO-14064 αποτελεί τη βάση για την καταγραφή του ανθρακικού αποτυπώματος μίας εταιρείας ή μίας κοινότητας. Παρέχει οδηγίες για την ορθή καταγραφή των ρύπων, τη μείωση τους και την επιτυχή επαλήθευση της έρευνας. Η ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί βάσει ορισμένων κανόνων που θέτονται είτε από το πρότυπο PAS 2060 (Publicly Available Specification 2060) του Ινστιτούτου Βρετανικών Προτύπων (BSI : British Standards Institute), είτε από το πρότυπο Καταγραφής και Αναφοράς του Κύκλου Ζωής ενός Προϊόντος (Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard) του Πρωτοκόλλου των Αερίων του Θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Protocol : GH.G. Protocol). Τα δύο πρότυπα εκδόθηκαν περίπου την ίδια εποχή (το 2010 το πρότυπο PAS 2060, το 2011 το πρότυπο του GHG) και είναι όμοια.



Παρουσιάζουν διαφορές στους περιοριστικούς κανονισμούς που θέτουν ανάλογα τον τομέα του προϊόντος ή συστήματος που εξετάζεται. Και τα δύο πρότυπα έχουν κοινό σκοπό την εδραίωση βιώσιμων και οικολογικών πρακτικών [27].

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν τα βήματα μίας ανάλυσης ανθρακικού αποτυπώματος σύμφωνα με το πρότυπο του GHG, μιας και γενικά η διαδικασία είναι η ίδια και για τα δύο πρότυπα (Πίνακας 2-3, Πίνακας 2-4). Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στους αντίστοιχους οδηγούς των προτύπων που είναι διαθέσιμοι διαδικτυακά [28], [29].

Πίνακας 2-3 : Βήματα του Προτύπου Καταγραφής και Αναφοράς του Κύκλου Ζωής Προϊόντος

ΒΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΩΝ	Προστασία του περιβάλλοντος, Βελτίωση προϊόντος, Προσδιορισμός εκπομπών για στατιστικούς σκοπούς, Μάρκετινγκ, Ενημέρωση καταναλωτικού κοινού, κλπ.
ΤΗΡΗΣΗ ΚΑΝΟΝΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	Ο κατάλογος που θα δημιουργηθεί θα πρέπει να είναι έγκυρος, ακριβής, αληθής και χωρίς ελλείψεις
ΤΗΡΗΣΗ ΚΑΝΟΝΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	Μελετάται ο κύκλος ζωής του προϊόντος, ακολουθώντας το «καλούπι» της ανάλυσης κύκλου ζωής.
ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑΛΟΓΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ	Καθορισμός του υπό μελέτη προϊόντος (studied product), της λειτουργίας που πραγματοποιεί (unit of analysis) και της ποσότητας του (reference flow)
ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΙΩΝ	Δημιουργία ενός χάρτη διεργασιών. Ο χάρτης διεργασιών περιλαμβάνει κάθε διεργασία που σχετίζεται με το προϊόν και αποτελείται από τα στάδια του κύκλου ζωής και κάθε εργασία, υλικά και ροή ενέργειας που τα αποτελούν.
ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	Γίνεται με δύο τρόπους : α) Απευθείας μέτρηση με πειραματικές μεθόδους, β) Προσομοίωση των διαδικασιών και υπολογισμός μεγεθών όπως ενέργεια, μάζα, όγκο, διατομή, απόσταση, χρόνο και πολλαπλασιασμός τους με κάποιον συντελεστή εκπομπής.
ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	Για παράδειγμα, αν μια γραμμή παραγωγής δίνει πολλά εξαρτήματα του προϊόντος, ή και εξαρτήματα άσχετα με τη μελέτη, θα πρέπει με κάποιο τρόπο να γίνει κατανομή των εκπομπών (μέσω μάζας ή όγκου, λόγου χάρη).
ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ	Έλεγχος του καταλόγου για σφάλματα στατιστικού χαρακτήρα.
ΤΕΛΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	Χρήση εξισώσεων ώστε να γίνει κατάλληλη αναγωγή σε τόνους διοξειδίου του άνθρακα.
ΤΕΛΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ, ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ, ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ	Σύγκριση με άλλες μελέτες ή διαθέσιμα δεδομένα από οργανισμούς και εταιρείες.

Πηγή : Πρωτόκολλο των Αερίων του Θερμοκηπίου⁸

⁸ https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf (Τελευταία πρόσβαση : 7/5/2022)



Πίνακας 2-4 : Είδη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

ΕΙΔΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (EMISSION)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΑΜΕΣΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (DIRECT)	Εκπομπές οι οποίες ανήκουν ή ελέγχονται από την υπό μελέτη μονάδα.
ΕΜΜΕΣΗ ΕΚΠΟΜΠΗ (INDIRECT)	Εκπομπές οι οποίες πραγματοποιούνται από άλλες πηγές εξαιτίας της λειτουργίας ή των δραστηριοτήτων της μονάδας.

Πηγή : Πρωτόκολλο των Αερίων του Θερμοκηπίου⁹

Για μια μελέτη ανάλυσης ανθρακικού αποτυπώματος οι εκπομπές χωρίζεται σε τρεις άλλες υποκατηγορίες σύμφωνα με τον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2-5):

Πίνακας 2-5 : Κατηγορία εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

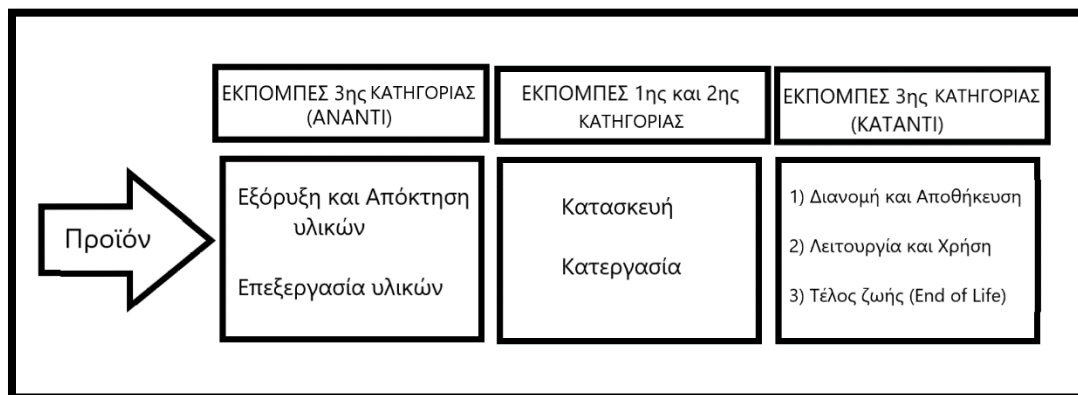
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ (SCOPE)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
ΠΡΩΤΗ (SCOPE 1)	Όλες οι άμεσες εκπομπές. Εκπομπές που παράγονται από τα εργοστάσια/τις υπηρεσίες (που δημιουργούν το προϊόν/το αγαθό) και τα οχήματα τα οποία εξυπηρετούν τα εργοστάσια/τις υπηρεσίες και ανήκουν σε αυτές. Οι εκπομπές που παράγονται από τον στροβιλοκινητήρα.
ΔΕΥΤΕΡΗ (SCOPE 2)	Οι έμμεσες εκπομπές που αφορούν τις ανάγκες για ηλεκτρισμό, ατμό, θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό, του εργοστασίου/υπηρεσίας/προϊόντος.
ΤΡΙΤΗ (SCOPE 3)	Οι υπόλοιπες έμμεσες εκπομπές. Παραδείγματα: η εξόρυξη και δημιουργία των αναγκαίων υλικών, οι μεταφορές υλικών/υπαλλήλων σε οχήματα που δεν ανήκουν στο εργοστάσιο/υπηρεσία, η απόσυρση υλικών και η διαχείριση απορριμμάτων. Οποιαδήποτε εκπομπή δεν είναι δυνατόν να ελέγξει άμεσα η μονάδα που μελετάται.

Πηγή : Πρωτόκολλο των Αερίων του Θερμοκηπίου

Μία μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής η οποία περιλαμβάνει μόνο τις ανθρακικές εκπομπές μπορεί να ονομαστεί και Ανάλυση Ανθρακικών Εκπομπών Κύκλου Ζωής (Life Cycle Carbon Emissions Assessment : L.C.C.E.A.) και συνδυάζει τις μεθόδους ανάλυσης ανθρακικού αποτυπώματος με την ανάλυση του κύκλου ζωής.

Στην **Εικόνα 2-3** φαίνεται σχηματικά ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος και η κατηγορία των εκπομπών που παράγονται στα στάδια της ζωής του.

⁹ <https://ghgprotocol.org/> (Τελευταία πρόσβαση :7/5/2022)



Εικόνα 2-3 : Σχέση κατηγορίας εκπομπών και κύκλου ζωής ενός οργανισμού κατά την παραγωγή προϊόντων

Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση που μελετάται το ίδιο το προϊόν (Εικόνα 2-3), το είδος των εκπομπών θα είναι διαφορετικό. Για έναν στροβιλοκινητήρα θα υπάρχουν κυρίως εκπομπές 2^{ης} κατηγορίας στην κατασκευή και την κατεργασία (εκτός αν γίνουν δοκιμές) και επίσης 1^{ης} κατηγορίας στο στάδιο της λειτουργίας και της χρήσης.

2.3 Παραδείγματα εφαρμογής των μεθόδων

2.3.1 Ανάλυση Ανθρακικού Αποτυπώματος αεροσκάφους

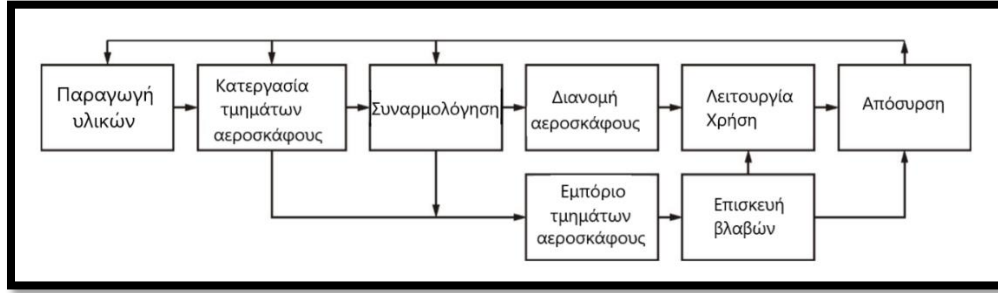
Κίνητρο της εργασίας των Ivan Jakovljevic, Radomir Mijailovic και Petar Miroslavljevic [30] (Πανεπιστήμιο Βελιγραδίου), είναι η υποβάθμιση της επίδοσης των αεροσκαφών, η οποία προκαλεί μεγάλη κατανάλωση καυσίμου (εξαιτίας της μεγαλύτερης οπισθέλκουσας και της μικρότερης ώσης) και μεγαλύτερη ποσότητα ανθρακικών εκπομπών.

Η χειροτέρευση δε λαμβάνεται συχνά υπόψη σε ανάλογες εργασίες. Οι εκπομπές λόγω χειροτέρευσης χωρίζονται σε αεροδυναμικά (αρχιτεκτονική αεροσκάφους) και θερμοδυναμικά (στροβιλοκινητήρας) αίτια.

Η φάση της χειροτέρευσης παράγει περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με τα άλλα στάδια ζωής του κινητήρα (με εξαίρεση τη χρήση). Για τη μελέτη χρησιμοποιούνται αεροσκάφη A320 και απαιτούνται:

- συντελεστές υποβάθμισης (υπολογίζονται στη διάρκεια ενός χρόνου),
- παράμετροι χρήσης (διάρκεια πτήσης, κύκλοι πτήσης (flight cycles), ατμοσφαιρικές συνθήκες),
- μοντέλα συντήρησης σύμφωνα με τους κατασκευαστές.

Τα στάδια του κύκλου ζωής φαίνονται στην Εικόνα 2-4 :



Εικόνα 2-4 : Κύκλος ζωής ενός αεροσκάφους (Πηγή : Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft)

Αρχικά, για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής υπολογίζονται οι εκπομπές του άνθρακα. Για παράδειγμα, για το στάδιο της «Παραγωγής Υλικών», οι εκπομπές δίνονται από την εξίσωση :

$$E_1 = \frac{44}{12} \cdot Ma \cdot \sum_{i=1}^{nm} qm_i \cdot [ec_i^{v.m.} \cdot (1 - reuse_i - rec_{ovi} - rec_{ym_i}) + ec_i^{r.m.} \cdot rec_{ym_i}] \cdot \sum_{j=1}^{nen} e_{fj} \cdot pm_{j,i} \quad [tCO_2] \quad (2.1)$$

Όπου : Ma [kg] η μάζα του αεροσκάφους,

nm ο αριθμός των διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του αεροσκάφους, ενώ nen αριθμός ειδών ενέργειας που δημιουργήσαν το υλικό i ,

qm_i η συμμετοχή του υλικού i στη μάζα του αεροσκάφους, $pm_{j,i}$ συμμετοχή ενέργειας j στη δημιουργία υλικού i ,

ec_i [kJ/kg] ενέργεια που αναλώνεται για τη δημιουργία νέου (v.m.) ή ανακυκλωμένου (r.m.) υλικού, ρυθμοί επαναχρησιμοποίησης, ανάκτησης και ανακύκλωσης υλικού i , $reuse$, rec_{ov} , rec_{ym} , αντίστοιχα,

ενώ e_{fj} [kgC/MJ] ο συντελεστής εκπομπών της συγκεκριμένης ενέργειας j (από τη βιβλιογραφία)

Με όμοιας λογικής εξισώσεις γίνονται οι υπολογισμοί για τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής, εξετάζοντας σε κάθε περίπτωση τις εισροές και εκροές ενέργειας, καθώς και ποια εξαρτήματα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν. Για το στάδιο των μεταφορών, εκτιμώνται οι εκπομπές για μία πτήση δίχως πρόσθετο βάρος, ενώ για τη συντήρηση πρέπει να εκτιμηθεί τότε αυτές γίνονται και τι ποσότητα μάζας του αεροσκάφους πρέπει να αντικατασταθεί.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο προσδιορισμός των εκπομπών κατά τη διάρκεια της χρήσης – λειτουργίας :

$$E_5 = E_{5,1} + E_{5,2} + E_{5,3} \quad (2.2)$$

Οι δείκτες 1,2,3 αναφέρονται στη φυσιολογική λειτουργία, στην υποβάθμιση του αεροσκάφους και στη χειροτέρευση του στροβιλοκινητήρα αντίστοιχα. Το πρώτο μέγεθος δίνεται από την εξίσωση :



$$E_{5,1} = efc \cdot T \cdot F_c \quad [tCO_2] \quad (2.3)$$

Όπου efc είναι ο δείκτης εκπομπών διοξειδίου άνθρακα, από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας, ίσος με $3,16 \text{ tCO}_2/\text{tfuel}$,

T είναι ο χρόνος λειτουργίας από τη στιγμή που έγινε η πρώτη πτήση, μετρημένος σε έτη, ενώ F_c [t/year] είναι η κατανάλωση καυσίμου που δίνεται από τον κατασκευαστή (σχετίζεται με τη παροχή του καυσίμου και τις ώρες πτήσης από την πρώτη πτήση).

Η υποβάθμιση του αεροσκάφους (γήρανση, ζημιές, σκόνη, άλας) προσδιορίζεται με τη μέθοδο της Airbus. Βάσει αυτής, συγκρίνονται παράμετροι της πτήσης που έχουν δοθεί από τον κατασκευαστή, με τις αντίστοιχες που υπολογίζονται εν ώρα πτήσης (παροχή καυσίμου, στροφές, παράμετροι ώσης, θερμοκρασίες).

Όσον αφορά τη χειροτέρευση του στροβιλοκινητήρα, αυτή επηρεάζεται από την ίδια την καύση (θερμική καταπόνηση), ζημιές (πιθανώς λόγω αναρρόφησης ξένων σωματιδίων), τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τη γήρανση. Για τη διαπίστωση της χειροτέρευσης μελετήθηκε η ικανότητα παραγωγής ώσης του κινητήρα.

Οι συγγραφείς πριν παρουσιάσουν τα τελικά αποτελέσματα, ερμήνευσαν τους υπολογισμούς τους και τους συγκρίναν με άλλα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, όπως ορίζουν οι μέθοδοι της ανάλυσης κύκλου ζωής και των προτύπων GHG και PAS 2050. Η ανάληψη απαραίτητων δεδομένων έγινε από τα ίδια τα αεροσκάφη, A320-232 με κινητήρες CFM 56-3B.

Τέσσερα τέτοια αεροσκάφη μελετήθηκαν και παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα για ένα από αυτά. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι το 99% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα παράγονται στο στάδιο της λειτουργίας Συμπεραίνεται ότι η μελέτη των εκπομπών ενός αεροσκάφους μπορεί να αναχθεί στη μελέτη των εκπομπών του στροβιλοκινητήρα που το κινεί και τα αποτελέσματα θα έχουν ακρίβεια.



Πίνακας 2-6 : Ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα για τον κύκλο ζωής αεροσκάφους

ΣΤΑΔΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ [%]
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΛΙΚΩΝ	0,027
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ	0,014
ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ	0,022
ΔΙΑΝΟΜΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ	0,0025
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ – ΧΡΗΣΗ	99,7
ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	93,3
ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ	5,1
ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ	1,3
ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΒΛΑΒΩΝ	0,26
ΕΜΠΟΡΙΟ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ	0,011
ΑΠΟΣΥΡΣΗ	0,00039

Πηγή : Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft

Όμως υπήρξε απόκλιση στα ποσά των εκπομπών μεταξύ των τεσσάρων αεροσκαφών, παρόλο που ήταν όλα ίδια (Πίνακας 2-7):

Πίνακας 2-7 : Εκπομπές κύκλου ζωής αεροσκαφών

ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ A320-AIRBUS	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (tCO ₂)
ΠΡΩΤΟ	513.700
ΔΕΥΤΕΡΟ	449.200
ΤΡΙΤΟ	323.600
ΤΕΤΑΡΤΟ	376.600

Πηγή : Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft

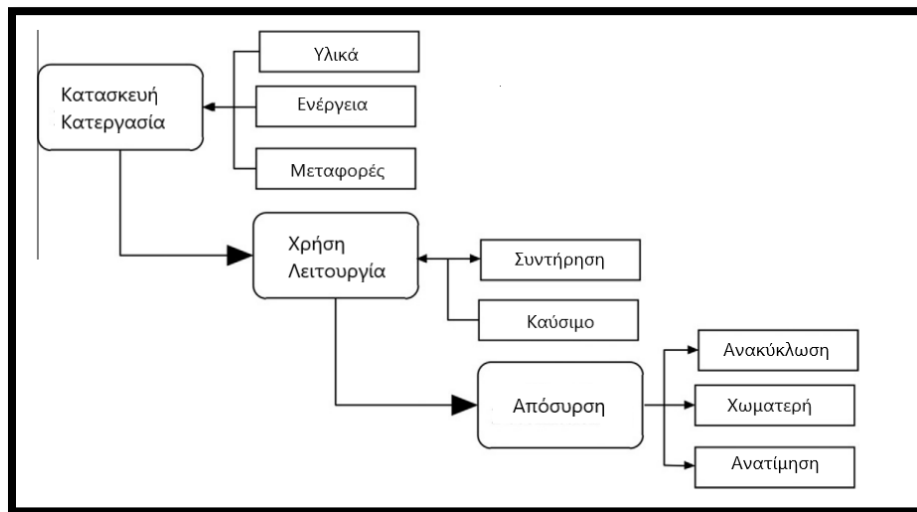
2.3.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής αεροσκάφους

Στη μελέτη τους οι Howe S., Kolios A.J. και Brennan F.P. (Πανεπιστήμιο του Cranfield) [31] εφαρμόζουν τη μέθοδο της ανάλυσης κύκλου ζωής σε ένα αεροσκάφος A320-Airbus, με κινητήρες CFM56-5B. Ο κύκλος ζωής του αεροσκάφους εκτιμάται στα είκοσι χρόνια.

Λόγω του μεγέθους ενός αεροσκάφους και των εκατομμυρίων τμημάτων του, πρέπει να χωριστεί σε έξι τμήματα τα οποία είναι : τα πτερύγια, η άτρακτος, ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος σταθεροποιητής, τα εργαλεία προσγείωσης και ο στροβιλοκινητήρας. Αυτά με τη σειρά τους αναλύονται σε άλλες υποκατηγορίες και αυτές φτάνουν να είναι 75 συνολικά.

Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών υπήρξαν μερικοί περιορισμοί, όπως για παράδειγμα στα στάδια δημιουργίας των συσσωρευτών, για τα οποία υπήρξε έλλειψη δεδομένων. Άλλος περιορισμός είναι η καταγραφή των μεθόδων κατεργασιών οι οποίες ενδεχομένως διέφεραν από άλλες της βιβλιογραφίας ή της βιομηχανίας.

Οι μετακινήσεις κατά το στάδιο της κατασκευής του αεροσκάφους σε Ευρωπαϊκά εργοστάσια, λήφθηκαν υπόψη με υπολογισμό της μέσης διαδρομής των μεταφορών, ενώ επίσης αναλύθηκαν οι περιπτώσεις απόσυρσης σε χωματερή (25% της μάζας) ή η ανακύκλωση (75% της μάζας).



Εικόνα 2-5 : Κύκλος ζωής του αεροσκάφους (Πηγή: Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners)

Είναι σημαντικό να καταταχθούν τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται (τιτάνιο, χάλυβας, σύνθετα υλικά και αλουμίνιο) ως προς τη ποσότητα και τη μάζα. Επίσης καθένα από τα έξι κομμάτια που απαρτίζουν το αεροσκάφος κατατάσσονται ανάλογα της μάζας τους σε σχέση με την ολική μάζα του αεροσκάφους.

Για το στάδιο της Λειτουργίας, εκτιμήθηκε πόσο καύσιμο καταναλώνεται μέσω της σχέσης:

$$FC = \frac{FCC_{AFD}}{Maxcap \cdot LF \cdot AFD} \left[\frac{kg}{PSK} \right] \quad (2.4)$$

Όπου :

Maxcap: Μέγιστη χωρητικότητα αεροσκάφους, 152 επιβάτες (Passengers),

LF: Συντελεστής φόρτισης (βάρος προς άνωση) ίσος με 81,25 %. Ο μέσος όρος των αεροσκαφών A320 του Ηνωμένου Βασιλείου για το έτος 2010,

AFD : Μέσο διάστημα πτήσης στα 1.485 χιλιόμετρα (km)



FCC_{AFD}: Μέση κατανάλωση καυσίμου για το παραπάνω διάστημα από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (2.007).

Η τιμή που προέκυψε ήταν 0,0270 kg/PSK (Passenger Kilometres).

Τα τελικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μεγαλύτερος παράγων επίδρασης ήταν η Κλιματική Αλλαγή και στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2-8) συνοψίζονται τα αποτελέσματα για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, κατά το στάδιο των κατεργασιών.

Πίνακας 2-8 : Ποσοστιαία κατανομή για το ανθρακικό αποτύπωμα των κατεργασιών - συναρμολόγησης

ΤΜΗΜΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ((%)
ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗΣ	7
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗΣ	6
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗΣ	10
ΑΤΡΑΚΤΟΣ	23
ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	19
ΠΤΕΡΥΓΙΑ	35

Πηγή : Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners

Σημειώνεται ότι η εργασία ισχύει για δεδομένα προ δεκαετίας (έτος δημοσίευσης 2013) και πιθανώς αρκετά δεδομένα πλέον να έχουν πλέον αλλάξει.

2.4 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μία περιγραφή των εννοιών του ανθρακικού αποτυπώματος και της ανάλυσης του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μίας υπηρεσίας. Το ανθρακικό αποτύπωμα είναι μία υποκατηγορία της ανάλυσης του κύκλου ζωής και μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα τα διαθέσιμα δεδομένα και το σύστημα το οποίο μελετάται. Επίσης έχει το μειονέκτημα της μονόπλευρης παρουσίασης ενός οικολογικού ζητήματος, αγνοώντας άλλους εξίσου σημαντικούς ρυπογόνους παράγοντες.

Για τη τήρηση των κανονισμών που διέπουν μία σωστή ανάλυση κύκλου ζωής, έχουν δημιουργηθεί αντίστοιχοι φορείς, βάσεις δεδομένων και πρότυπα, τα οποία καλείται να συμβουλευτεί ο μελετητής. Σύμφωνα με αυτούς και αυτά, τα βασικά χαρακτηριστικά μίας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής πρέπει να είναι η διαφάνεια και η εγκυρότητα των υπολογισμών. Για το ανθρακικό αποτύπωμα ειδικότερα, οι ανθρακικές εκπομπές μπορούν να χωριστούν σε άμεσες και έμμεσες, ενώ συνολικά κατατάσσονται σε εκπομπές πρώτης, δεύτερης και τρίτης κατηγορίας, ανάλογα τη φάση του κύκλου ζωής στην οποία εμφανίζονται.



Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζονται δύο βασικές εργασίες πάνω στο ανθρακικό αποτύπωμα, οι οποίες αποτελούν και αφορμή για την παρούσα. Η πρώτη εξετάζει το ανθρακικό αποτύπωμα ενός στόλου αεροσκαφών, ενώ η δεύτερη αναλύει τον κύκλο ζωής ενός αεροσκάφους. Οι δύο εργασίες ακολουθούν τους κανόνες που περιγράφονται στην αρχή του κεφαλαίου.

Συμπέρασμα του κεφαλαίου είναι ότι η μελέτη του ανθρακικού αποτυπώματος είναι ένα σχετικά νέο είδος επιστημονικής μελέτης, η οποία πρέπει να ακολουθεί πιστά αρκετούς κανονισμούς και πρότυπα, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί εποικοδομητικά. Είναι σημαντικό τα ευρήματα της μελέτης να είναι έγκυρα και να μπορούν με κάποιο τρόπο να πιστοποιηθούν. Επιβεβαιώνεται επίσης το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για το ανθρακικό αποτύπωμα του ενός από τους πιο επιβαρυντικούς κλάδους, της αεροπορίας.



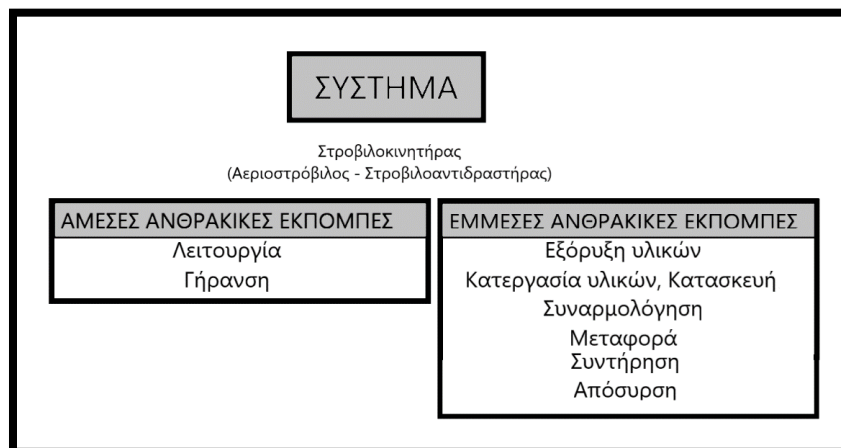
3. Ανάλυση της μάζας και των διαστάσεων του στροβιλοκινητήρα

Όπως έχει αναφερθεί, στόχος της εργασίας είναι ο προσδιορισμός του οικολογικού αντίκτυπου μίας θερμικής στροβιλομηχανής. Το σύστημα το οποίο μελετάται είναι η θερμική στροβιλομηχανή η οποία μπορεί να είναι δύο ειδών : αεριοστρόβιλος μηχανικής ισχύος ή στροβιλοαντιδραστήρας. Τα δύο είδη στροβιλομηχανών διαφέρουν σε λίγα σημεία σε δομικό επίπεδο, αλλά προφανώς επειδή προορίζονται για τελείως διαφορετική λειτουργία, διαφέρουν αρκετά στο μέγεθος και στα υλικά κατασκευής. Οι διαφορές αυτές αλλάζουν και την ποσότητα των ανθρακικών εκπομπών κατά τη δημιουργία τους.

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά ορίζεται το σύστημα του οποίου θα μελετηθεί το ανθρακικό αποτύπωμα. Στη συνέχεια η μελέτη αρχίζει με την ανάπτυξη μίας μεθόδου για τον προσδιορισμό των διαστάσεων και της μάζας του στροβιλοκινητήρα, όταν αυτά τα δεδομένα δεν είναι άμεσα διαθέσιμα.

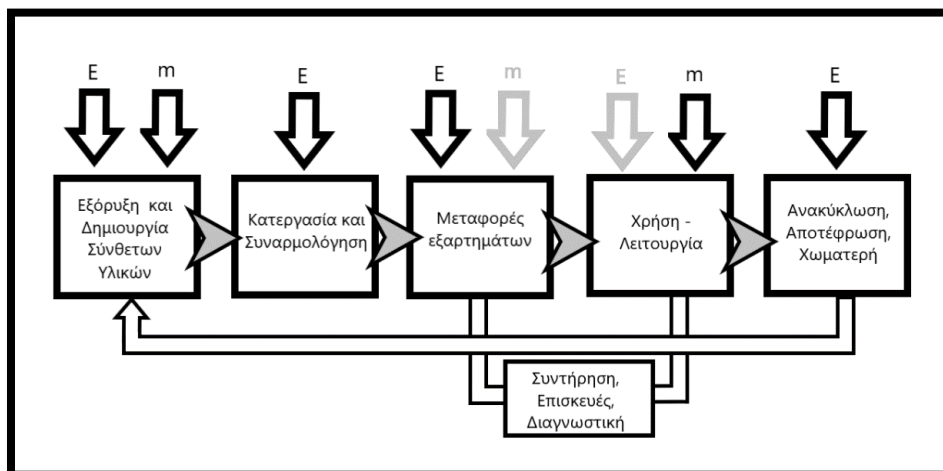
3.1 Βασικά στοιχεία συστήματος

Αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν οι τρόποι με τους οποίους η ύπαρξη ενός στροβιλοκινητήρα και η χρήση του επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα στοιχεία του συστήματος παρουσιάζονται στην [Εικόνα 3-1](#).



Εικόνα 3-1 : Εκπομπές του συστήματος "Στροβιλοκινητήρας"

Επιπλέον στην Εικόνα 3-2 φαίνεται η πορεία της ζωής του συστήματος και οι μεταβλητές που το μεταβάλλουν.



Εικόνα 3-2 : Κύκλος ζωής του συστήματος στροβιλοκινητήρας

3.1.1 Άμεσες ανθρακικές εκπομπές

Οι εκπομπές αυτές ανήκουν στις εκπομπές 1^{ης} κατηγορίας (2.2.4). Στις άμεσες ανθρακικές εκπομπές περιλαμβάνονται οι φάσεις της **λειτουργίας** και της **γήρανσης/χειροτέρευσης** του κινητήρα. Αφορούν οποιοδήποτε αέριο του θερμοκηπίου πηγάζει από τον ίδιο τον στροβιλοκινητήρα. Όπως έχει διαπιστωθεί στη βιβλιογραφία (2.3.1) αυτές οφείλονται για τη πλειονότητα των ανθρακικών εκπομπών στη διάρκεια ζωής ενός αεροσκάφους (άρα και ενός στροβιλοκινητήρα). Αναμένονται ίδια συμπεράσματα για τη λειτουργία ενός οποιουδήποτε αεριοστρόβιλου. Η ποσότητα των ανθρακικών εκπομπών αλλάζει ανάλογα τη λειτουργία της μηχανής (ή της αποστολής του αεροσκάφους). Επίσης έχει ενδιαφέρον να υπολογιστούν οι ανθρακικές εκπομπές στη περίπτωση χρήσεως εναλλακτικών καυσίμων, όπως το υδρογόνο.

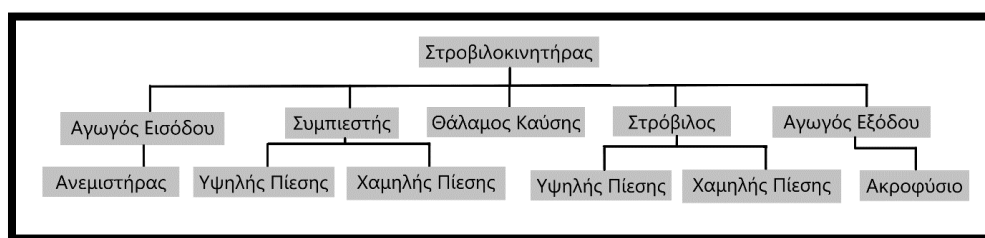
3.1.2 Έμμεσες ανθρακικές εκπομπές

Στις έμμεσες ανθρακικές εκπομπές περιλαμβάνεται μία μεγάλη γκάμα του κύκλου ζωής του κινητήρα. Η **εξόρυξη των υλικών** αφορά όλη τη διαδικασία παραγωγής πρώτων υλών για τη δομή του κινητήρα και περιλαμβάνει όλων των ειδών τις εκπομπές (από οχήματα, από εργαλεία και μηχανές, από κατανάλωση ενέργειας) που προκαλούνται εξαιτίας της. Στο στάδιο αυτό μπορεί να συμπεριληφθεί και η διαδικασία χρήσης **ανακυκλωμένων υλικών**, με οικονομικό και οικολογικό όφελος. Η **κατεργασία των υλικών** και η **συναρμολόγηση** του κινητήρα περιλαμβάνει κυρίως την απαιτούμενη ενέργεια για κάθε κατεργασία. Οι **μεταφορές** αφορούν αυτές του τελικού κινητήρα στο χώρο όπου θα χρησιμοποιηθεί (σε ένα αερολιμένα για παράδειγμα). Η **συντήρηση** μπορεί να περιλαμβάνει την απαιτούμενη ενέργεια ή τις εκπομπές των οχημάτων και μηχανών που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες διαγνωστικής και ελέγχου της λειτουργίας του κινητήρα. Μελετώνται επίσης οι εκπομπές κατά την **απόσυρση** του στροβιλοκινητήρα στο τέλος της ζωής του. Τέλος, μπορούν να προσδιοριστούν και οι εκπομπές λόγω **χρήσης της κηροζίνης και των λιπαντικών** αλλά και οι εκπομπές λόγω **συντήρησης** του κινητήρα. Αυτές αποτελούν ξανά έμμεσες ανθρακικές εκπομπές, αλλά συμπεριλαμβάνονται στο στάδιο της λειτουργίας του κινητήρα.

3.1.3 Δομή του συστήματος

Αρχικά γίνεται η επιλογή μελέτης ενός στροβιλοκινητήρα. Το υπολογιστικό εργαλείο δύναται να επεκταθεί ώστε να είναι εφικτή η εκτίμηση των ανθρακικών εκπομπών για άλλους κινητήρες. Για αρχή, ο στροβιλοκινητήρας που επιλέγεται είναι ο CFM56 (

Εικόνα 3-4).



Εικόνα 3-3 : Τμήματα του συστήματος "Στροβιλοκινητήρας"

Ο στροβιλοκινητήρας CFM56 χωρίζεται στα βασικά του δομικά τμήματα. Εκτιμάται ότι και αυτά αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του. Στοιχεία όπως κοχλίες και έδρανα ολίσθησης μπορούν να συμπεριληφθούν σε ξεχωριστές κατηγορίες (hardware, accessories). Ο ανεμιστήρας εξετάζεται ξεχωριστά από τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης αφού διαφέρει σημαντικά ως προς τη δομή του.



Εικόνα 3-4 : CFM International CFM56-5B

Πίνακας 3-1 : Δομικά υλικά στροβιλοκινητήρα CFM56

ΥΛΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ	Κράματα Τιτανίου (Ti-6Al-4V) βάση και πτερύγια από τιτάνιο, 36 πτερύγια
ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ Χ.Π.	Υπερκράμα Rene (Νικέλιο, χρώμιο, κοβάλτιο), Πτερύγια από τιτάνιο, 4 βαθμίδες
ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ Υ.Π.	Υπερκράμα Rene (Νικέλιο, χρώμιο, κοβάλτιο), Πτερύγια από ανοξείδωτο χάλυβα, 9 βαθμίδες
ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ	Δακτυλοειδής μονός (μία ζώνη καύσης) ή διπλός (δύο ζώνες καύσης), 20 εγχυτήρες
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ Υ.Π.	Υλικά προηγμένης τεχνολογίας, μία βαθμίδα
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ Χ.Π.	Υλικά προηγμένης τεχνολογίας, τέσσερις βαθμίδες
ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ	-
ΑΞΟΝΑΣ	Διπλός (Double Spool)
ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ	Για τον συμπιεστή Υ.Π., κατασκευασμένος από τιτάνιο και με στάτορες από χάλυβα. Για το gearbox, κράμα αλουμινίου.

Πηγές : «CFM 56 5B Description 1¹⁰», «Titanium Alloy Aeroengine Fan Blades¹¹», «NASA : Materials for advanced turbine engines : PROJECT COMPLETION REPORT : PROJECT 1 POWDER METALLURGY RENE 95 ROTATING TURBINE ENGINE PARTS, 1979¹²», «CFM 56 : Fullfilling a need¹³», «CFM INTERNATIONAL CFM56 – JAE.JANES»

3.1.4 Εκτίμηση διαστάσεων του στροβιλοκινητήρα

Η εκτίμηση των διαστάσεων του στροβιλοκινητήρα γίνεται με τη χρήση εκπαιδευτικού υλικού στροβιλοκινητήρων από το Ε.Μ.Π. (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο), από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία των κατασκευαστών και «με το μάτι». Συγκεκριμένα ορισμένες διαστάσεις εκτιμώνται με τη χρήση αναλογιών, αξιοποιώντας το διαθέσιμο υλικό. Για

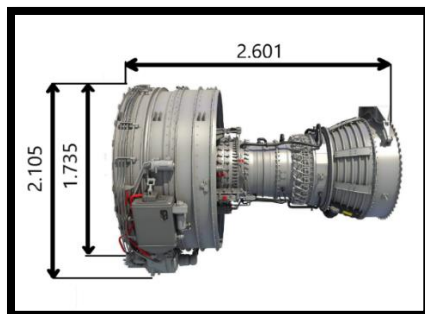
¹⁰ https://www.youtube.com/watch?v=vxctAnshyzw&list=LL&index=7&ab_channel=ims1958 (Τελευταία πρόσβαση : 3/11/2022)

¹¹ <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2004/titanium/Blades/Blades.html> (Τελευταία πρόσβαση : 3/11/2022)

¹² <https://ntrs.nasa.gov/citations/19830007141> (Τελευταία πρόσβαση : 11/11/2022)

¹³ <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/eb035818/full/pdf?title=cfm-56-fulfilling-a-need> (Τελευταία πρόσβαση : 11/11/2022)

παράδειγμα, αν είναι γνωστό το ολικό μήκος ενός στροβιλοκινητήρα και υπάρχουν μηχανολογικά σχέδια, εικόνες ή βίντεο, μπορεί να γίνει η εκτίμηση των υπολοίπων μεγεθών τα οποία δεν είναι άμεσα διαθέσιμα. Στην **Εικόνα 3-5** φαίνεται η εκτίμηση των διαστάσεων του στροβιλοκινητήρα CFM56-5B σύμφωνα με δεδομένα του Οργανισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Αεροπορική Ασφάλεια.



Εικόνα 3-5 : Διαστάσεις κινητήρα CFM56-5B (Πηγή : 3D Horse, RenderHub¹⁴)

Τα παραπάνω συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα (**Πίνακας 3-2**). Για τη μελέτη αυτή είναι σημαντική η ολική μάζα του κινητήρα, όπως αναλύεται στη συνέχεια (3.2).

Πίνακας 3-2 : Διαστάσεις στροβιλοκινητήρα CFM56-5B

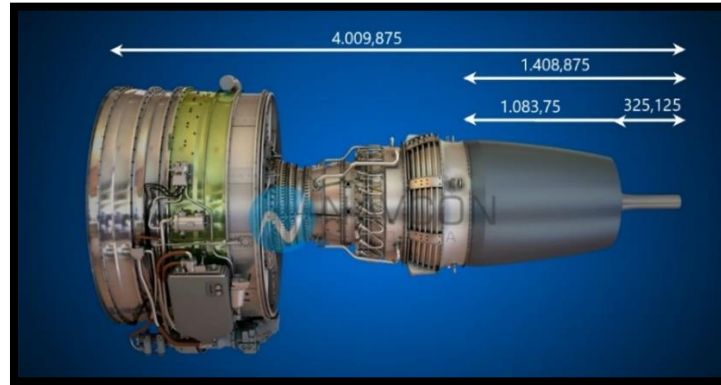
ΜΕΓΕΘΗ	ΤΙΜΗ
ΜΗΚΟΣ (mm)	2.601
ΠΛΑΤΟΣ (mm)	1.908
ΥΨΟΣ (mm)	2.105
ΜΑΖΑ (kg)	2.455 (SAC ¹⁵), 2.501 (DAC)
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ (mm)	1.735

Πηγή : «EASA Type Certificate for CMF6-5 series engines», «CFM INTERNATIONAL CFM56 – JAE.JANES»

Για την εκτίμηση άλλων διαστάσεων, όπως το μήκος και το πάχος του ακροφυσίου, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 3-6**) και τα μεγέθη εκτιμώνται αναλογικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το ολικό μήκος του στροβιλοκινητήρα της **Εικόνα 3-6** και το διαθέσιμο φωτογραφικό υλικό μπορούν να δώσουν τις βασικές διαστάσεις του ακροφυσίου του.

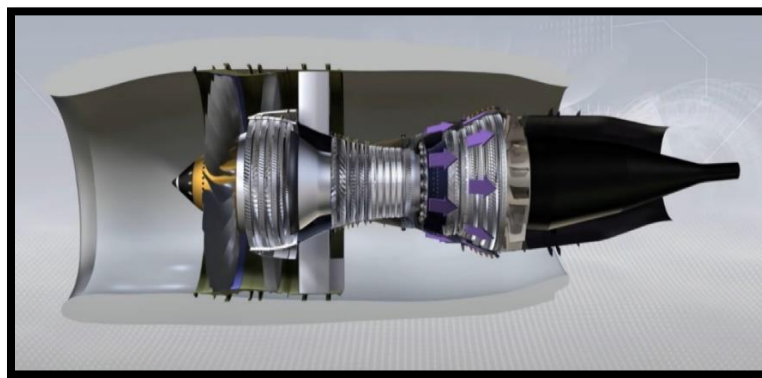
¹⁴ <https://www.renderhub.com/3d-horse/turbofan-aircraft-engine-cfm56> (Τελευταία πρόσβαση : 13/11/2022)

¹⁵ Singular Annular Combustor, Dual Annular Combustor



Εικόνα 3-6 : Διαστάσεις περιβλήματος ακροφύσιου (Πηγή : Airbus-A320 Engine General Description¹⁶)

Το εσωτερικό του ακροφύσιου φαίνεται στην Εικόνα 3-7. Όπως φαίνεται το πάχος των τοιχωμάτων είναι μικρό.



Εικόνα 3-7 : Εσωτερικά χαρακτηριστικά κινητήρα και ακροφύσιου (Πηγή : How does a CFM56-7B work?¹⁷)

Βάσει των προηγουμένων, γίνεται η εκτίμηση των παρακάτω μεγεθών στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3-3):

¹⁶ https://www.youtube.com/watch?v=osQGSFVEq2I&ab_channel=NavconAdvancedSystems (Τελευταία πρόσβαση: 14/11/2022)

¹⁷ https://www.youtube.com/watch?v=KjYw0GdRpm0&ab_channel=CFMInternational (Τελευταία πρόσβαση: 14/11/2022)



Πίνακας 3-3 : Εκτιμήσεις μεγεθών στροβιλοαντιδραστήρα

ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ	ΤΙΜΗ (mm)
ΜΗΚΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ	470
ΠΑΧΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑ	10
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΜΙΚΡΗ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ	542
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΜΙΚΡΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ	108
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΜΕΓΑΛΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ	550
ΠΑΧΟΣ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΓΩΓΟΥ ΕΙΣΟΔΟΥ	50

Πηγή : The Strength Analysis of a CFM56 Engine¹⁸

3.2 Κατανομή μάζας

Οι ανθρακικές εκπομπές συνηθίζεται να υπολογίζονται ανά μονάδα μάζας προϊόντος ή ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας. Ο στροβιλοκινητήρας είναι ένα αρκετά περίπλοκο προϊόν. Η **Εικόνα 3-3** και ο **Πίνακας 4-1** υποδεικνύουν την ανάγκη για έναν διαχωρισμό των ποσοτήτων κάθε υλικού που τον απαρτίζει. Η εκτίμηση του ποσοστού μάζας κάθε υλικού «με το μάτι» είναι υπερβολικά πρόχειρη και οδηγεί σε λανθασμένα συμπεράσματα.

3.2.1 Έρευνα πάνω στον προσδιορισμό της μάζας στροβιλοκινητήρα

Ο προσδιορισμός της μάζας ενός στροβιλοκινητήρα αποτελεί μεγάλο πεδίο μελέτης στο χώρο των θερμικών στροβιλομηχανών, μιας και είναι δείκτης της επίδοσης και της κατανάλωσης του. Οι ανάγκες αυτές είναι λιγότερο επιτακτικές στους αεριοστρόβιλους μηχανικής ισχύος, στους οποίους οι συμπιεστές και οι στρόβιλοι μπορούν να κατασκευαστούν ως τύμπανα, σε αντίθεση με τους στροβιλοαντιδραστήρες στους οποίους τα στροφεία τους έχουν δίσκους με πτερύγια για μείωση του βάρους τους.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δε ζητείται η πρόβλεψη του βάρους ενός κινητήρα για τον σχεδιασμό του, αλλά η διαίρεση του βάρους ενός υπάρχοντος κινητήρα ως προς το κάθε τμήμα που τον αποτελεί. Δεδομένου ότι το ζύγισμα των φυσικών εξαρτημάτων είναι αδύνατο και ότι δεν είναι εφικτό να βρεθούν δεδομένα για το βάρος κάθε τεμαχίου ξεχωριστά, θα πρέπει να εφαρμοστούν προσεγγιστικές μέθοδοι υπολογισμού της μάζας ανά τμήμα.

¹⁸https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/25/mateconf_icmaa2018_04001.pdf
πρόσβαση : 14/11/2022)



Μια τέτοια προσέγγιση αναπτύχθηκε από τη NASA σε συνεργασία με την Boeing. Το WATE (Weight Analysis of Turbine Engine) είναι λογισμικό υπολογιστή (αρχικά γραμμένο σε κώδικα FORTRAN) για την εκτίμηση του βάρους ενός στροβιλοκινητήρα. Υπολογίζει το βάρος και τις διαστάσεις κάθε κύριου εξαρτήματος και προβλέπει μία κατάλληλη αρχιτεκτονική δομή που να ταιριάζει με έναν επιλεγμένο θερμοδυναμικό κύκλο. Η ανάπτυξη του έχει στηριχθεί σε μία σειρά υπολογισμών για κάθε εξάρτημα του στροβιλοκινητήρα ξεχωριστά, στηριζόμενη σε μία μεγάλη λίστα δεδομένων από κατασκευαστές στροβιλομηχανών [32]. Ενδεικτικά περιλαμβάνει 29 κινητήρες, στρατιωτικούς και εμπορικούς, στροβιλοαντιδραστήρες απλού και διπλού ρεύματος. Για τον υπολογισμό της μάζας του συμπιεστή, για παράδειγμα, αναλύεται η μάζα των πτερυγίων, των βάσεων τους, του δίσκου τους και του τρόπου σύνδεσης τους. Η WATE απαιτεί πολλές μεταβλητές εισόδου (κοντά στις 80), αλλά δίνει ένα πολύ ακριβές αποτέλεσμα με σφάλμα της τάξης του 5% [33].

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3-4) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ερευνών για την κατανομή της μάζας του CFM56, από τον P. Lolis [33] δημοσιευμένη το 2014 και του Ι. Κόλια (διδάκτορα Ε.Μ.Π.) . Στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιηθεί η κατανομή μάζας που έχει βρεθεί από τον Ι. Κόλια.

Πίνακας 3-4 : Ανάλυση της κατανομής της μάζας του CFM56

ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ CFM56	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΖΑΣ (ΛΟΛΙΣ Ρ.) – CFM56-7B (%)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΖΑΣ (ΚΟΛΙΑΣ Ι.) –CFM56-5A (%)
ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (FAN)	30,8	36,71
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (LOW PRESSURE COMPRESSOR)	7,5	5,05
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (HIGH PRESSURE COMPRESSOR)	9,8	7,74
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (HIGH PRESSURE TURBINE)	4,6	5,05
ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ (COMBUSTION CHAMBER)	2,4	2,94
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (LOW PRESSURE TURBINE)	11,3	11,94
ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ¹⁹ (STRUCTURAL COMPONENTS)	31,1	21,49
CONTROLS AND ACCESSORIES	10	9,09

Πηγές : Development of a Preliminary Weight Estimation Method for Advanced Turbofan Engines [33], Ι. Κολιός Ε.Μ.Π.

¹⁹ Άξονες, αγωγοί, σασί (frame)

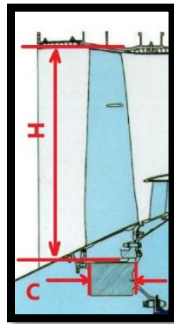
3.2.2 Προσδιορισμός κατανομής της μάζας ενός στροβιλοκινητήρα

Για ανάγκες αυτονομίας, στις περιπτώσεις όπου η κατανομή της μάζας στα διάφορα εξαρτήματα δεν είναι γνωστή, χρησιμοποιείται η εμπειρική μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Sagerser, Lieblein και Krebs για τη NASA το 1971. Επιλέγεται γιατί αφενός λαμβάνει λίγες μεταβλητές και άρα είναι σχετικά απλή, αφετέρου γιατί μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική εικόνα της κατανομής του βάρους ενός σύγχρονου στροβιλοαντιδραστήρα. Η μέθοδος προορίζεται αποκλειστικά για θερμικές στροβιλομηχανές αξονικής ροής.

Για τη μάζα της βαθμίδας/των βαθμίδων του ανεμιστήρα (fan section) χρησιμοποιείται η σχέση :

$$W_F = \frac{K_F \cdot (D_t)^{2,7} \cdot N}{(AR_{x,r})^{0,5}} \quad [kg] \quad (3.1)$$

Όπου $K_F = 135$, D_t η διάμετρος που σχηματίζουν τα πτερύγια του ανεμιστήρα, N ο αριθμός των βαθμίδων και $AR_{x,r}$ ο λόγος του μήκους ενός πτερυγίου H προς το μήκος της χορδής C στη πλήρη του. Η [Εικόνα 3-8](#) παρουσιάζει τα μεγέθη αυτά.



Εικόνα 3-8 : Διαστάσεις πτερυγίου ανεμιστήρα (Πηγή : General Electric)

Ειδικά για τον κινητήρα CFM56-5B είναι $D_t = 1,750$, $N = 1$ και $AR_{x,r} = 4,33$. Οι συγγραφείς της μεθόδου διαπίστωσαν ότι μία δεκτή γενική τιμή του $AR_{x,r}$ είναι 4,5 που είναι πολύ κοντά στον υπολογισμό.

Η μάζα του συμπιεστή εκτιμάται από τη σχέση (3.2) :

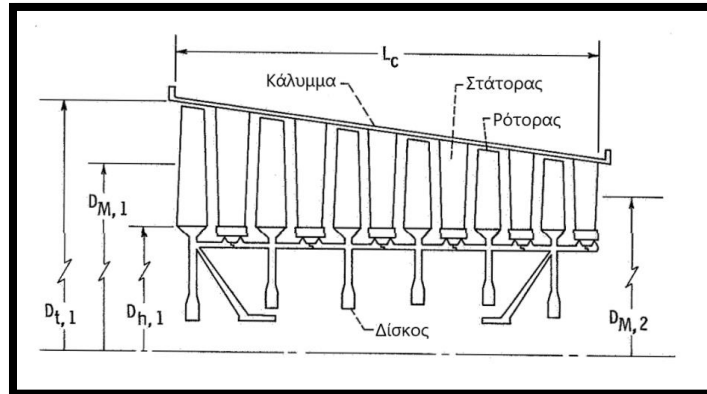
$$W_C = K_C \cdot (\overline{D_M})^{2,2} \cdot N^{1,2} \cdot \left[1 + \frac{\frac{L_C}{D_{M,1}}}{0,2 + 0,081 \cdot N} \right] \quad [kg] \quad (3.2)$$

Με $K_C = 24,2$.

Η μέση διάμετρος δίνεται από τη σχέση:

$$\overline{D_M} = \frac{1}{2} \cdot (D_{M,1} + D_{M,2}) \quad (3.3)$$

Ο προσδιορισμός των διαμέτρων μπορεί να γίνει με τη βοήθεια ενός μηχανολογικού σχεδίου του στροβιλοκινητήρα που μελετάται. Για τον CFM56 παρατηρείται ότι το μήκος του συμπιεστή προς το ολικό μήκος δίνει λόγο 0,132. Έτσι για κάθε διαφορετική έκδοση του CFM56 (άρα για διαφορετικό ολικό μήκος) μπορεί να εκτιμάται το μήκος του συμπιεστή. Με τον ίδιο τρόπο προσδιορίζονται τα υπόλοιπα απαιτούμενα μεγέθη.



Εικόνα 3-9 : Διαστάσεις ενός συμπιεστή

Οι αναλογίες αυτές καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε διαφορετικό μήκος (άρα έκδοση) του CFM56 :

Για τον θάλαμο καύσης, εφόσον αυτός είναι δακτυλιοειδής, η μάζα εκτιμάται από τη σχέση :

$$W_B = K_B \cdot \bar{D}_M^2 \quad [kg] \quad (3.4)$$

Με $K_B = 390$.

Για τον στρόβιλο η μάζα εκτιμάται από τη σχέση :

$$W_T = K_T \cdot (\bar{D}_M)^{2,5} \cdot N_T \cdot (\bar{U}_M)^{0,6} \quad [kg] \quad (3.5)$$

Με $K_T = 7,9$, ενώ U_M η μέση ταχύτητα του ακροπτερυγίου.

Για εξαρτήματα όπως τα συστήματα καυσίμου, εκκίνησης, ελέγχου και λίπανσης :

$$W_A = K_A \cdot F \cdot [1 + 13,2 \cdot (SFC)] \quad [kg] \quad (3.6)$$

**Πίνακας 3-5 :** Εκτίμηση διαστάσεων και αναλογιών του κινητήρα CFM56

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΠΡΟΣ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
Μήκος συμπιεστή χαμηλής πίεσης (LPC)	0,13
Διάμετρος συμπιεστή χαμηλής πίεσης (Inlet)	0,29
Διάμετρος συμπιεστή χαμηλής πίεσης (Outlet)	0,25
Μήκος συμπιεστή υψηλής πίεσης (HPC)	0,16
Διάμετρος συμπιεστή υψηλής πίεσης (Inlet)	0,18
Διάμετρος συμπιεστή υψηλής πίεσης (Outlet)	0,16
Μήκος στροβίλου υψηλής πίεσης (HPT)	0,05
Διάμετρος στροβίλου υψηλής πίεσης	0,24
Μήκος στροβίλου χαμηλής πίεσης (LPT)	0,08
Διάμετρος στροβίλου χαμηλής πίεσης (Inlet)	0,26
Διάμετρος στροβίλου χαμηλής πίεσης (Outlet)	0,31
Διάμετρος θαλάμου καύσης (Inlet)	0,18
Διάμετρος θαλάμου καύσης (Outlet)	0,25

Με $K_T = 7,9$, ενώ U_M η μέση ταχύτητα του ακροπτερυγίου.

Για εξαρτήματα όπως τα συστήματα καυσίμου, εκκίνησης, ελέγχου και λίπανσης :

$$W_A = K_A \cdot F \cdot [1 + 13,2 \cdot (SFC)] \quad [kg] \quad (3.7)$$

Η μάζα που καταλαμβάνουν άλλα εξαρτήματα όπως διάφοροι αγωγοί, έδρανα ολίσθησης και άξονες περιστροφής, υπολογίζονται αφαιρώντας τις μάζες που υπολογίστηκαν παραπάνω από την ολική μάζα του στροβιλοκινητήρα. Τέλος, αν ο στροβιλοκινητήρας περιλαμβάνει πολλούς συμπιεστές ή στροβίλους, οι σχέσεις (3.2) και (3.5) μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές φορές.

3.3 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό ξεκίνησε η ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος του κύκλου ζωής ενός στροβιλοκινητήρα. Αρχικά ορίζεται το σύστημα το οποίο μελετάται. Αυτό περιλαμβάνει τον στροβιλοκινητήρα ως προϊόν και εκτείνεται έως την παραγωγή όλων εκείνων των υλικών που είναι απαραίτητα για τη σωστή του λειτουργία (καύσιμα, λιπαντικά, αξεσουάρ). Εντός του συστήματος ορίζονται όλες οι ροές μάζας και ενέργειας, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις κατηγορίες της εξόρυξης και δημιουργίας υλικών, στις κατεργασίες και τη συναρμολόγηση, στις μεταφορές των εξαρτημάτων, στη λειτουργία και τη χειροτέρευση, στην παραγωγή των απαραίτητων καυσίμων, στη συντήρηση και στην απόσυρση.



Για τη μελέτη επιλέγεται ο δημοφιλής κινητήρας CFM56. Ο κύκλος ζωής ακολουθείται με τη σειρά που παρουσιάστηκε προηγουμένως και έτσι η μελέτη αρχίζει από τη φάση της εξόρυξης και δημιουργίας υλικών. Επομένως απαιτείται ο προσδιορισμός της ποσότητας των πρώτων υλών που απαιτούνται για τη δημιουργία του στροβιλοκινητήρα. Για έναν γνωστό κινητήρα όπως ο CFM56, μπορούν να βρεθούν από άλλες επιστημονικές μελέτες και κατασκευαστικά σχέδια οι διαστάσεις και η κατανομή της μάζας του. Η δεύτερη είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μελέτη της εργασίας, αφού αρκετοί από τους υπολογισμούς γίνονται συναρτήσει της μάζας. Για τις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εύρεση της κατανομής της μάζας, παρουσιάζεται μία εμπειρική μέθοδος προσδιορισμού της.

Συμπεράσματα του κεφαλαίου είναι ότι ο στροβιλοκινητήρας είναι ένα αρκετά περίπλοκο προϊόν και ότι η μελέτη της ανάλυσης του κύκλου ζωής του γίνεται πιο εύκολη αν αυτός "σπάσει" σε κομμάτια. Η ανάλυση της κατανομής της μάζας ενός στροβιλοκινητήρα αποτελεί ευρύ πεδίο επιστημονικής μελέτης και στα πλαίσια της παρούσης εργασίας παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην εγκυρότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Είναι προφανές ότι μία κακή αρχική ανάλυση της κατανομής της μάζας και των διαστάσεων του κινητήρα θα οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα για το ανθρακικό αποτύπωμα του.



4. Παραγωγή υλικών, κατεργασίες, μεταφορά και απόσυρση του στροβιλοκινητήρα

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε έναν στροβιλοκινητήρα είναι προηγμένης τεχνολογίας. Υπάρχουν απαιτήσεις τόσο για την ανθεκτικότητα τους σε αντίξοες συνθήκες, όσο και για το βάρος τους, το οποίο πρέπει να είναι το ελάχιστο δυνατό. Η προσπάθεια των σχεδιαστών να μειώσουν το βάρος των στροβιλοκινητήρων αφορά οικονομικούς, λειτουργικούς και οικολογικούς στόχους. Ιδιαίτερη πρόκληση αποτελεί ο επιτυχής σχεδιασμός του ανεμιστήρα του στροβιλοαντιδραστήρα διπλού ρεύματος, ο οποίος αυξάνει σημαντικά το βάρος του, αλλά παρέχει τα πλεονεκτήματα της μεγάλης ώσης.

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά γίνεται μία προσπάθεια προσδιορισμού των υλικών που απαρτίζουν τον στροβιλοκινητήρα CFM56. Παρουσιάζεται ένας τρόπος προσδιορισμού των ανθρακικών εκπομπών που τους αναλογούν. Στη συνέχεια, το ίδιο γίνεται και για τις κατεργασίες και τη συναρμολόγηση του κινητήρα, καθώς επίσης για τις μεταφορές του από το εργοστάσιο στο χώρο λειτουργίας και την απόσυρση του.

4.1 Δημιουργία κραμάτων και σύνθετων υλικών

Ο Πίνακας 4-1 περιλαμβάνει μερικά τυπικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός στροβιλοκινητήρα. Δημοφιλή είναι τα κράματα τιτανίου λόγω της χαμηλής του πυκνότητας σε σχέση με τα υπόλοιπα.



Πίνακας 4-1 : Τυπικά υλικά για τη κατασκευή ενός στροβιλοκινητήρα

ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ	ΥΛΙΚΑ
ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ	Αλουμίνιο, Τιτάνιο ή Ανοξειδωτος χάλυβας
ΠΕΡΙΒΛΗΜΑ ΑΕΡΑΓΩΓΟΥ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	Αλουμίνιο ή πολυμερή υλικά (π.χ. με βάση ανθρακικές ίνες, Carbon Fiber Reinforced Polymers)
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ	Κράματα με κυρίαρχο στοιχείο νικέλιο, κοβάλτιο ή σίδηρο. Πρόσθετα υλικά αλουμίνιο και/ή τιτάνιο και χρώμιο και ύτριο (yttrium)
ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ	Υπερκράματα πυρίμαχων μετάλλων όπως βολφράμιο (tungsten), μολυβδαίνιο, νιόβιο (niobium) και ταντάλιο (tantalum). Εναλλακτικά χρήση κεραμικών και μίγματα κεραμικών-μετάλλων
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ	Υπερκράμα με βάση το νικέλιο. Για στρόβιλο χαμηλότερης πίεσης, χρήση υπερκράματος με βάση τον σίδηρο ή ακόμα και από ανοξειδωτο χάλυβα. Μονοκρυσταλλικά μέταλλα
ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ	Κράματα ανοξειδωτου χάλυβα και υπερκράμα Inconel (βάση το νικέλιο)
ΑΞΟΝΑΣ	Ανοξειδωτος χάλυβας, υπερκράματα με κυρίαρχο στοιχείο τον σίδηρο, το νικέλιο ή το τιτάνιο

Πηγές : «SP's airbus : An exclusive magazine on civil aviation from India – Οκτώβριος, Νοέμβριος 2020²⁰», «Materials for Aircraft Engines, T.O.²¹»

4.1.1 Εξόρυξη και επεξεργασία υλικών

Για το στάδιο της εξόρυξης και επεξεργασίας των υλικών θα αξιοποιηθούν βιβλιογραφικές πηγές καθώς και οι μελέτες που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 2.2.4.

Αυτό που διαφοροποιεί κάθε στροβιλοκινητήρα είναι το είδος και η κατανομή των υλικών που τον απαρτίζουν. Ο υπολογισμός των ανθρακικών εκπομπών πρέπει, συνεπώς, να απαντά στο ερώτημα : « Τι ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου εκπέμπεται κατά την εξόρυξη και επεξεργασία ενός υλικού;». Πρώτο στάδιο είναι η εύρεση των υλικών κάθε κινητήρα ή τουλάχιστον μία εκτίμηση τους. Ο Πίνακας 4-2 περιέχει τη λίστα των κραμάτων και σύνθετων υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται στον στροβιλοκινητήρα CFM-56.

²⁰ <https://www.spsairbuz.com/ebook/75052020.pdf> (Τελευταία πρόσβαση : 11/11/2022)

²¹ [https://www.colorado.edu/faculty/kantha/sites/default/files/attached-files/73549-116619 - takehiro_okura - dec 17 2015 1027 am - asen 5063 2015 final report okura.pdf](https://www.colorado.edu/faculty/kantha/sites/default/files/attached-files/73549-116619_-_takehiro_okura_-_dec_17_2015_1027_am_-_asen_5063_2015_final_report_okura.pdf) (Τελευταία πρόσβαση : 11/11/2022)



Πίνακας 4-2 : Πληροφορίες υλικών και κραμάτων του CFM56

ΥΛΙΚΟ / ΚΡΑΜΑ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m ³)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ (kg/kg)
Ti-6Al-4V	Army Research Laboratory	4.512	Ti 90 %, Al 6 %, V 4%
René 41	General Electric	8.249	Ni 58,6%, Cr 18%, Mo 9%, Co 10%, Ti 3%
Ανοξείδωτος χάλυβας A-286	-	7.920	Fe 50,65 %, Ni 27% Cr 16%, Ti 2,35 %, Mn 2% Mo 1 %, Si 1 %
Kevlar - 149	DuPont	1.470	Συνθετικό υλικό
Inconel 718	Special Metals	8.193	Ni + Co 50 % (35 & 25%) Fe 25,45%, Cr 17% Nb 4,7 %, Mo 2,8 %
Inconel 706	Special Metals	8.050	Fe 42,5%, Ni + Co 39% Cr 14,5%, Nb + Ta 2,5% Ti 1,5 %
N-155	-	8.249	Cr 20%, Ni 19%, Co 18,5% Mo 2,5 %, Mn 1%, Si 1%

Πηγές : Techsteel Materials²², Special Metals²³, High Temp Materials²⁴, Aircraft Materials²⁵, AZO Materials²⁶, Ι. Κολιός Ε.Μ.Π.

Για έναν εύκολο προσδιορισμό των δεικτών εκπομπής κάθε κράματος, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του πίνακα 4-3 (Πίνακας 4-3) τα οποία έχουν ληφθεί από την εργασία των M.J. Eckelman, L. Ciacci, G. Kavlak, P. Nuss, B.K. Reck και T.E. Gradel [34]. Στην εργασία τους προσδιόρισαν τους δείκτες εκπομπής διαφόρων μετάλλων, χρήσιμων για την αεροπορική βιομηχανία, με τη λήψη πειραματικών μετρήσεων σε μία εγκατάσταση ανακύκλωσης και με εύρεση σχετικού υλικού από βάσεις συντελεστών εκπομπών (2.2.3).

²² <https://www.techsteel.net/alloy/stainless-steel/a286> (Τελευταία πρόσβαση : 16/11/2022)

²³ <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf> (Τελευταία πρόσβαση : 16/11/2022)

²⁴ <https://www.hightempmetals.com/techdata/hitempN155data.php> (Τελευταία πρόσβαση : 16/11/2022)

²⁵ <https://www.aircraftmaterials.com/data/nickel/718.html> (Τελευταία πρόσβαση : 16/11/2022)

²⁶ <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7697> (Τελευταία πρόσβαση : 25/11/2022)



Πίνακας 4-3 : Δείκτης εκπομπής διαφόρων μετάλλων της αεροπορικής βιομηχανίας

ΜΕΤΑΛΛΟ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (kgCO ₂ e/kg) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (kgCO ₂ e/kg)
Al	Αλουμίνιο	12	1,1
Co	Κοβάλτιο	8,3	1,4
Cr	Χρώμιο	26,7	2,6
Cu	Χαλκός	3,1	0,4
Fe	Σίδηρος	1,5	0,1
Hf	Άφνιο	16,9	56
Mg	Μαγνήσιο	73,7	55
Mn	Μαγγάνιο	2,6	0,4
Mo	Μολυβδένιο	4,8	3,2
Nb	Νιόβιο	7,1	1,1
Ni	Νικέλιο	10,9	0,6
Re	Ρήνιο	290	100
Si	Πυρίτιο	5	0,2
Ta	Ταντάλιο	260	33
Ti	Τιτάνιο	45,1	7,5
V	Βανάδιο	33,1	8,7
W	Βολφράμιο	12,6	1,8

Πηγές : «Life cycle carbon benefits of aerospace alloy recycling²⁷», «Carbon Footprint Analysis : Concepts, Methods, Implementation, and Case Studies – M.J. Franchetti, D. Aru»

Η διαδικασία για τον υπολογισμό των εκπομπών είναι η ακόλουθη :

Πρώτα εκτιμάται το ανθρακικό αποτύπωμα δημιουργίας ενός συγκεκριμένου κράματος. Στην εργασία χρησιμοποιείται η σχέση :

$$E_{materials} = \sum_{i=1}^N e_{fi} \cdot w_i \quad [kgCO_{2eq}] \quad (4.1)$$

²⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005071> (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2022)



Όπου N το πλήθος των (κυριότερων) στοιχείων που απαρτίζουν το κράμα, e_{fi} ο δείκτης εκπομπής από τον πίνακα 4-3 (Πίνακας 4-3), ενώ w_i το ποσοστό σε μάζα που καταλαμβάνει σε ένα χιλιόγραμμο (kg) κράματος, σύμφωνα με τον πίνακα 4-2 (Πίνακας 4-2). Η σχέση βασίζεται στην ερευνητική εργασία των M.J. Eckelman, L. Ciacci, G. Kavlak, P. Nuss, B.K. Reck και T.E. Gradel [34] και χάρη σε αυτήν είναι εφικτός ο υπολογισμός των εκπομπών λόγω εξόρυξης πρώτων υλών διαφόρων κραμάτων.

Πίνακας 4-4 : Δείκτες εκπομπής κραμάτων των αεριοστρόβιλων

ΚΡΑΜΑ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (kgCO ₂ e/kg) (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)
Ti-6Al-4V	42,6
Rene-41	13,8
A-286 (Ανοξειδωτος Χάλυβας)	9,2
Inconel-706	11,1
Inconel-718	11,3
N-155	9,1
AM 350 (Ανοξειδωτος Χάλυβας)	6,7
Al 2050	12,8
Greek Ascoloy-418	4,9
Hastelloy-S	12,1
Haynes Alloy 188	13,1

Πηγές : ATI Materials²⁸, NeoNickel²⁹, Haynes International³⁰, American Special Metals³¹

Με την τυπική απόκλιση των εκπομπών εξόρυξης κάθε υλικού (Πίνακας 4-3) μπορεί να υπολογιστεί το ανώτερο και κατώτερο όριο των ανθρακικών εκπομπών. Για κάθε κράμα, θεωρώντας ότι κάθε υλικό προέρχεται από κατανομή με ίσο αριθμό στοιχείων, η τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$Sd = \sqrt{\sum_{i=2}^N (e_{fi} \cdot s_i)^2} \quad [kgCO_2eq] \quad (4.2)$$

Με s_i να είναι η τυπική απόκλιση κάθε υλικού, από τον πίνακα 4-3 (Πίνακας 4-3). Για παράδειγμα, για την περίπτωση του κράματος Ti-6Al-4V, η δημιουργία 1 kg παρθένου

²⁸https://www.atimaterials.com/Products/Documents/datasheets/stainless-specialty-steel/precipitationhardening/am_350_tds_en_v2.pdf (Τελευταία πρόσβαση : 25/11/2022)

²⁹<https://www.neonickel.com/alloys/stainless-steels/greek-ascloy-418/> (Τελευταία πρόσβαση 25/11/2022)

³⁰https://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/high-temperature-alloys/brochures/s-brochure.pdf?sfvrsn=f47229d4_12 (Τελευταία πρόσβαση : 25/11/2022)

³¹<https://www.americanspecialmetals.com/Haynes188Alloy.html> (Τελευταία πρόσβαση : 25/11/2022)



προϊόντος (virgin material) αφήνει αποτύπωμα 42,634 kgCO_{2eq} με τυπική απόκλιση 6,76 kgCO_{2eq}. Με χρήση της εξίσωσης (4.7) δημιουργείται ο

Πίνακας 4-4 που παρουσιάζει τον δείκτη εκπομπής για μία γκάμα κραμάτων των αεροστροβίλων.

Στους υπολογισμούς πρέπει να ληφθούν υπόψιν και τα υλικά που ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται για τη δημιουργία νέων κινητήρων. Σύμφωνα με τη Safran, κατασκευάστρια των CFM56 και CFM-LEAP, το 99% των στροβιλοκινητήρων τους ανακυκλώνονται [35].

Πίνακας 4-5 : Δείκτες εκπομπής για την παραγωγή σύνθετων υλικών

ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (kgCO _{2e} /kg)	ΣΧΟΛΙΑ	Πηγές
Kevlar 149	98-107	Από το εύρος επιλέχθηκε η ελάχιστη.	[36]
Kevlar 49	85 - 94	Από το εύρος τιμών επιλέχθηκε η ελάχιστη.	[36]
Kevlar 29	36 - 39	Από το εύρος τιμών επιλέχθηκε η ελάχιστη	[36]
Spectra 900	80 - 89	Από το εύρος τιμών επιλέχθηκε η ελάχιστη.	[36]
Carbon Fiber (Ανθρακόνημα)	24 , 20,5 , 14,11	Διάφορες τιμές	[36], [37] , [38]
Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (C.F.R.P.)	109 , 17,2	Διάφορες τιμές. Αποτελέσματα μελέτης L.C.A. Κύριες εκπομπές λόγω κατανάλωσης ηλεκτρισμού και δημιουργίας των ινών.	[39], [38]
Υαλονήματα (Glass Fiber)	3,43		[38]
Πολυμερή ενισχυμένα με υαλονήματα (G.F.R.P.)	5,79		[38]
Σύνθετα Υλικά Κεραμικής Μήτρας (C.M.C)	147,56 -149,80 (α) 200,46 -209,45 (α)	Τιμές εξαρτώμενες από θερμικές κατεργασίες. Αποτέλεσμα μελέτης L.C.A. για τα στάδια πριν τη τελική μορφή	[40] (α)

Πηγές : «Natural fibre composites & their role in engineering», « Multicriteria optimization as enabler for Sustainable Ceramic Matrix Composites», «Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry »

Για τους δείκτες εκπομπής διαφόρων σύνθετων υλικών αντλούνται πληροφορίες από άλλες έρευνες σχετικές με την ανάλυση κύκλου ζωής ή το ανθρακικό αποτύπωμα της παραγωγής τους και παρουσιάζονται στον πίνακα 4-5 (**Πίνακας 4-5**).

Η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (GHG Emissions) για κάθε εξάρτημα που απαρτίζει τον στροβιλοκινητήρα δίνεται από τη σχέση :

$$E_{mining} = \sum_{i=1}^{N'} e'_{fi} \cdot w_i \quad [kgCO_{2eq}] \quad (4.3)$$



Η σχέση είναι η ίδια με την (4.7), με τη διαφορά ότι N' και e'_{fi} αναφέρονται στο πλήθος των κραμάτων (ή σύνθετων υλικών) και στα δεδομένα του πίνακα 4-3 (Πίνακας 4-3).

4.1.2 Παραδοχές υπολογισμών εξόρυξης και επεξεργασίας υλικών

- Έχουν χρησιμοποιηθεί οι δείκτες εκπομπών όπως προκύπτουν από την έρευνα των M.J. Eckelman, L. Ciacci, G. Kavlak, P. Nuss, B.K. Reck και T.E. Gradel [80], οι οποίοι με τη σειρά τους έλαβαν από το αρχείο του καταλόγου Ecosim. Η έρευνα αυτή είναι σχετικά παλιά (έτος δημοσίευσης 2014) οπότε και οι δείκτες ίσως να μην αντιπροσωπεύουν τα σημερινά δεδομένα. Παρόλα αυτά, λόγω της έκτασης της μελέτης τους, εκτιμάται ότι δίνουν μία καλή εικόνα της μεταλλευτικής κατάστασης των υλικών.
- Ακολουθήθηκε μία πολύ απλή μέθοδος για την εκτίμηση της ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός κράματος. Επίσης πολλά δεδομένα εκτιμήθηκαν οπότε υπάρχει ανακρίβεια στους υπολογισμούς. Η χρήση των δεικτών εκπομπής λόγω κατανάλωσης ενέργειας δίνουν την απαιτούμενη βαρύτητα ανά χώρα προέλευσης του κράματος.
- Έχουν αμεληθεί από τη μελέτη αρκετά σημαντικά τμήματα όπως για παράδειγμα οι σωληνώσεις των καυσίμων και λιπαντικών, ή τα διάφορα καλώδια και οι αισθητήρες που θα προσαρμοστούν στον στροβιλοκινητήρα. Θεωρείται ότι αυτά έχουν αμελητέα μάζα και γενικεύοντας θεωρούνται κομμάτι των αξεσουάρ (accessories) του στροβιλοκινητήρα. Στην πλειονότητα τους θεωρούνται ότι κατασκευάζονται από χάλυβα, ο οποίος έχει έναν τυπικό συντελεστή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

4.2 Κατεργασία εξαρτημάτων και τμημάτων στροβιλοκινητήρα

Η δημιουργία τμημάτων ενός στροβιλοκινητήρα περιλαμβάνει την πλειονότητα των γνωστών κατεργασιών, όπως πλαστικής παραμόρφωσης, κονιομεταλλουργίας, χύτευσης, συγκόλλησης και αποκοπής υλικού. Επίσης πολλή δουλειά γίνεται από μηχανές C.N.C. (Computer Numerical Controlled) ακολουθώντας πιστά τα αρχικά μηχανολογικά σχέδια που έχουν δημιουργηθεί σε περιβάλλον C.A.D. (Computer Aided Design). Σε μικρούς στροβίλους ή συμπιεστές συμφέρει ο δίσκος και τα πτερύγια να δημιουργούνται ως ένα ενιαίο κομμάτι με χύτευση, με σφυρηλάτηση ή με συγκόλληση περιμετρικά [41]. Τυπικές διεργασίες για τη δημιουργία στροβιλοκινητήρων παρουσιάζονται στον πίνακα 4-6 (Πίνακας 4-6).



Πίνακας 4-6 : Τυπικές διεργασίες για την κατασκευή ενός στροβιλοκινητήρα

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΞΑΡΤΗΜΑ / ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΡΑ	ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ
Χύτευση (Casting)	Πτερύγια στροβίλου, συμπίεστή	Απαιτούν μη καταστροφικό έλεγχο για την εύρεση αλλοιώσεων
Σφυρηλάτηση (Forging) Κλειστής Μήτρας	Άξονες περιστροφής, δίσκοι συμπίεστή, δίσκοι στροβίλου, συστήματα τροχών (gear trains), πτερύγια στροβίλου, πτερύγια ανεμιστήρα δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης (κάλυμμα, casing), καλύμματα συμπίεστών, στροβίλων,	Ο θάλαμος καύσης δημιουργείται με ψυχρή σφυρηλάτηση
Κονιομεταλλουργία (Powder Metallurgy)	Δίσκοι συμπίεστή, δίσκοι στροβίλου	-
Συγκόλληση (Welding)	Πτερύγια σε δίσκο, αγωγοί, καλύμματα	Τα πτερύγια ενώνονται με συγκόλληση σε μεμονωμένες περπτώσεις αεριοστροβίλων
Κοπή (Cutting)	Διάφορα καλύμματα, αγωγοί	-
Τύπωση (Stamping)	Βάσεις εδράνων ολίσθησης, διάφορα καλύμματα	-
Διάτρηση (Drilling)	Πτερύγια, καλύμματα και άλλα στοιχεία μηχανών	Για τη διάνοιξη οπών ψύξης στα πτερύγια του στροβίλου
Χρήση εργαλειομηχανών, ρομπότ και μηχανών CNC (Machining)	Κοχλίες, έδρανα ολίσθησης κοχλιοσυνδέσεις και άλλα στοιχεία μηχανών	-

Πηγές : “Gas Turbine Theory, H. Saravanamutto”, “The Jet Engine, Rolls Royce”, “How products are made : Jet Engines”³²

³² <http://www.madehow.com/Volume-1/Jet-Engine.html> (Τελευταία πρόσβαση : 2/12/2022)



Για τον CFM56 είναι γνωστά τα ακόλουθα :

Πίνακας 4-7 : Κατεργασίες σε έναν στροβιλοκινητήρα CFM56

ΕΞΑΡΤΗΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	ΕΙΔΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ
Δίσκος ανεμιστήρα (Fan Disk)	Σφυρηλάτηση
Πτερύγια ανεμιστήρα	Σφυρηλάτηση, Machining (Ειδική μορφοποίηση κοπής)
Κάλυμμα ανεμιστήρα	Συγκόλληση
Κέλυφος (στήριξη OGV, IGV) ανεμιστήρα	Συγκόλληση
Άξονας συμπιεστή χαμηλής πίεσης (Booster Spool)	Σφυρηλάτηση, Machining (Ειδική μορφοποίηση κοπής)
Στάτορες συμπιεστή χαμηλής πίεσης	Συγκόλληση
Άξονας ανεμιστήρα (Fan Shaft)	Σφυρηλάτηση
Άξονας συμπιεστή υψηλής πίεσης	Σφυρηλάτηση, Συγκόλληση Αδράνειας (Inertia Welding), Machining (Ειδική μορφοποίηση)
Θάλαμος Καύσης	Συγκόλληση, Χύτευση, Διάτρηση (Drilling)
Κάλυμμα συμπιεστή υψηλής πίεσης	Σφυρηλάτηση, Machining (Ειδική μορφοποίηση κοπής)
Δίσκος στροβίλου υψηλής πίεσης	Σφυρηλάτηση, Machining (Ειδική μορφοποίηση κοπής)
Ρότορες στροβίλου υψηλής πίεσης	Χύτευση, Διάτρηση (για ψύξη)
Στάτορες στροβίλου υψηλής πίεσης	Χύτευση
Βάση εδράνου ολίσθησης	Συγκόλληση
Πλανητικό σύστημα (Gearbox Assembly)	Χύτευση

Πηγές : Safran, General Electric

Θα χρησιμοποιηθεί η σχέση από τη μελέτη του εδαφίου 2.3.1 , η οποία είναι η ακόλουθη :

$$E_{manuf} = M \cdot \sum_{i=1}^{nm} qm_i \cdot (1 - reuse_i) \cdot \sum_{h=1}^{ntp} ptp_{i,h} \cdot em_{i,h} \quad (4.4)$$

Όπου M η μάζα του κινητήρα, qm_i το ποσοστό της μάζας που καταλαμβάνει ένα υλικό, $reuse_i$ ο ρυθμός επαναχρησιμοποίησης κάποιου υλικού, $em_{i,h}$ το ποσό παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά kg μάζας υλικού στο οποίο γίνεται η κατεργασία και $ptp_{i,h}$ το ποσοστό της συμμετοχής της κατεργασίας h στη μορφοποίηση του υλικού i . Για ένα εξάρτημα η σχέση (4.4) γράφεται όμοια ως εξής :



$$E'_{manuf} = m \cdot qm(1 - reuse_i) \cdot \sum_{h=1}^{ntp} ptp_h \cdot em_h \quad (4.5)$$

Η χρήση της εξίσωσης (4.5) απαιτεί γνώση στοιχείων για τις κατεργασίες που πραγματοποιούνται σε κάθε τεμάχιο. Αυτές συγκεντρώνονται στον πίνακα 4-8 (Πίνακας 4-8). Αρκετές από αυτές αντλούνται από την ίδια εργασία [30] η οποία με τη σειρά της στηρίζεται σε δεδομένα από την ανάλυση του ανθρακικού αποτυπώματος στη δημιουργία αυτοκινήτων. Είναι φανερό ότι οι τιμές αυτές δε μπορεί να είναι σταθερές καθώς εξαρτώνται από τις συνθήκες της κάθε κατεργασίας.

Θεωρείται ότι η δημιουργία οπών στα εξαρτήματα πραγματοποιείται σε ειδικούς πάγκους από προηγμένες εργαλειομηχανές, οπότε και οι κατεργασίες αποβολής υλικού συμπεριλαμβάνονται στη κατηγορία machining. Έχουν συγκεντρωθεί και πληροφορίες για άλλες μη συμβατικές και παραδοσιακές κατεργασίες, όπως για κατεργασίες προσθήκης υλικού με τρισδιάστατη εκτύπωση. Η συγκέντρωση πληροφοριών για τις διαδικασίες των κατεργασιών των στροβιλοκινητήρων είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εύρεση των W.R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder και S.J. Skerlos [42] ότι οι μετρήσεις τους για την καταναλισκόμενη ενέργεια φρεζαρίσματος ξεπερνούσε τις τιμές που ήταν διαθέσιμες από βάσεις δεδομένων ανάλυσης κύκλου ζωής.

Για τη σύνδεση της καταναλισκόμενης ενέργειας με τις ανθρακικές εκπομπές, χρειάζεται να δημιουργηθεί ένας πίνακας με δεδομένα τα ποσά του διοξειδίου του άνθρακα (ισοδύναμα) που παράγονται λόγω ηλεκτρικής κατανάλωσης. Κάθε χώρα έχει διαφορετικό τέτοιο δείκτη και έτσι δημιουργείται ο Πίνακας 4-10.



Πίνακας 4-8 : Ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια για συμβατικές κατεργασίες

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh/kg) ³³	ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ – ΠΗΓΕΣ
Χύτευση (Casting)	0,0044	Αλουμινίου (2014), [43]
	0,0092 – 0,0244 (M.T. : 0,015)	Αλουμινίου (2010), [43]
	0,0078	Χυτοσιδήρου, [43]
	0,0062 -0,009	Σιδήρου , [43]
	0,0047	Χάλυβα, [43]
	0,002	Κλίβανος Ηλεκτρικού Τόξου (Electrical Arc Furnace), Χάλυβας, [43]
	0,0069	Βασική Κάμινος Οξυγόνου (Basic Oxygen Furnace), Υψικάμινος (Blast Furnace), Χάλυβας, [43]
	0,0031 – 0,0046 (0,0041)	Γενικές τιμές για μέταλλα/κράματα, [43]
Χύτευση με έγχυση (πλαστικά) (Injection Molding)	0,0064 – 0,0582	Υδραυλική μέθοδος , [43]
	0,0182	Ηλεκτρική μέθοδος, [43]
	0,0065 – 0,0253	Υβριδική μέθοδος, [43]
Έλαση (Rolling)	0,0004	Θερμή κατεργασία χάλυβα εργαλείων (tool steel), [42]
	0,0003	Ψυχρή κατεργασία χάλυβα εργαλείων (tool steel), [42]
Σφυρηλάτηση (Forging)	0,008 ή 0,0125	[44]
Τύπωση (Stamping)	0,00016 – 0,0027	[44]
Φρεζάρισμα (CNC Milling)	0,0066 (αρχική κοπή) , 0,1666 (κοπή ακριβείας) 0,1733 (σύνολο)	Χάλυβα εργαλείων (tool steel), υπολογισμοί «on site» , [42]
	0,0001	Χάλυβα εργαλείων (tool steel), υπολογισμοί από βάση δεδομένων ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) (2007)
Κατεργασίες αποβολής υλικού με εργαλειομηχανές και ρομποτικούς μηχανισμούς (Machining)	0,015	[44]
Κονιομεταλλουργία (Powder Metallurgy)	0,005	[42]

Πηγές : «Energy-consumption and carbon-emission analysis of vehicle and component manufacturing», «A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study», « Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing»

³³ Χρήση σημαντικών ψηφίων. Οι ακριβείς τιμές χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του Turbomachine CO2 Calculator (βλέπε παράγραφο 14).



Πίνακας 4-9 : Ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια για προηγμένες κατεργασίες

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh/kg) ³⁴	ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ – ΠΗΓΕΣ
Selective Laser Sintering (SLS) – Κατεργασία Προσθήκης υψηλής ακρίβειας	0,040 – 0,066	Τιμές από διάφορες μελέτες, [43]
Fused Deposition Modelling (FDM) - Κατεργασία Προσθήκης υψηλής ακρίβειας	0,1489 - 0,1637	Τιμές από διάφορες μελέτες, [43]
Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)	0,0147 -0,0170	[43]
Direct Metal Laser Sintering (Κατεργασία προσθήκης υλικού)	0,0242 , 0,0942	Η υψηλή τιμή είναι για ένα αντικείμενο. Οι διαθέσιμες τιμές ήτα μόνο δύο, [43]
Τήξη δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting)	0,017, 0,04917	Δύο τιμές από διαφορετικές μελέτες , [43]
Στερεολιθογραφία (Stereolithography)	0,020 – 0,041	[43]
Συγκόλληση FCA (Flux Coloured Arc Welding)	0,0014	Ανά μάζα ηλεκτροδίου, [45]
Συγκόλληση SMA (Shielded Metal Arc Welding)	0,0015	Ανά μάζα ηλεκτροδίου, [45]
Συγκόλληση G.M.A. (Gas Metal Arc Welding)	0,0017	Ανά μάζα ηλεκτροδίου, Για αλουμίνιο, [45]
	0,002	Ανά μάζα ηλεκτροδίου, Για διάφορα μέταλλα, [45]
Συγκόλληση S.A. (Submerged Arc Welding)	0,00223	Ανά μάζα ηλεκτροδίου, [45]
Συγκόλληση G.T.A. (Gas Tungsten Arc Welding)	0,0031	Ανά μάζα ηλεκτροδίου, Για αλουμίνιο, Όμοιο με Plasma Arc Welding, [45]
	0,0044	Ανά μάζα ηλεκτροδίου, Για διάφορα μέταλλα, Όμοιο με Plasma Arc Welding, [45]
Μέθοδος Μεταφοράς Ρητίνης (Resin Transfer Molding)	0,0036	[46]

Πηγές : «Energy-consumption and carbon-emission analysis of vehicle and component manufacturing», «Welding Industry : Potential for Energy Conservation», «A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study», « Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing», «Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review »

³⁴ Χρήση σημαντικών ψηφίων. Οι ακριβείς τιμές χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του Turbomachine CO2 Calculator (βλέπε παράγραφο 14).

**Πίνακας 4-10 :** Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κρατών λόγω ηλεκτροπαραγωγής

ΧΩΡΑ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (kgCO ₂ e/MWh)
Ελλάδα (2020)	377
Γαλλία (2020)	66
Γερμανία (2020)	375
Ευρωπαϊκή Ένωση(2020)	254
Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (2021)	518
Ηνωμένο Βασίλειο (2018)	253
Κίνα (2015)	780
Ιαπωνία (2015)	578

Πηγή: Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο³⁵

Για τους δείκτες εκπομπής των Ηνωμένων Πολιτειών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα απ' το αντίστοιχο Υπουργείο Προστασίας του Περιβάλλοντος [47]. Επιπλέον πρέπει να συνεκτιμηθεί η περίπτωση στην οποία χρησιμοποιούνται μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ενέργειας (ενός ορισμένου ποσοστού). Ο (θερμικός) βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση :

$$\eta_{th} = \frac{E}{W} \quad (4.6)$$

Με E να είναι η ενέργεια που απαιτεί το σύστημα και W η ενέργεια που καταναλώνει η μηχανή. Σύμφωνα με τη σχέση (4.6) ένας κινητήρας θα παράγει μικρότερη ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου αν ο βαθμός απόδοσης του είναι υψηλότερος. Με τη χρήση των πληροφοριών του επόμενου πίνακα (Πίνακας 4-11) γίνεται η επιλογή μεταξύ μηχανών Diesel ή αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος.

Πίνακας 4-11 : Δείκτης Εκπομπών κυριότερων καυσίμων βιομηχανικού τομέα

ΚΑΥΣΙΜΟ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (CO ₂ eq kg/MWh)
Φυσικό Αέριο	202
Καύσιμο Diesel	267

Πηγή : H. Anke, Ευρωπαϊκή Ένωση

Οι εκπομπές λόγω των εργασιών κατά τη συναρμολόγηση (assembling) του κινητήρα είναι δύσκολο να προσδιοριστούν λόγω της έλλειψης σχετικών πηγών. Είναι γνωστό ότι στο

³⁵ <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/919df040-0252-4e4e-ad82-c054896e1641> (Τελευταία πρόσβαση : 1/12/2022)



στάδιο αυτό οι κύρια πηγή τους είναι η ενεργειακή κατανάλωση των διάφορων ανυψωτικών μηχανών.

Για το στάδιο της συναρμολόγησης θεωρείται, σύμφωνα και με την αντίστοιχη εργασία [30], (2.3.1), ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι μία γραμμική εξίσωση της μάζας του κινητήρα. Συγκεκριμένα, αξιοποιείται η υπόθεση της εργασίας των Nada Z. και Xianguo L. [48], η οποία ορίζει ότι για ένα τυπικό αυτοκίνητο 1.300 χιλιόγραμμων απαιτείται ενέργεια που κυμαίνεται από 17.400 έως 22.000 kJ.

Στην παρούσα εργασία γίνεται η θεώρηση ότι ο στροβιλοκινητήρας μπορεί να είναι όμοιος με ένα μεγάλο αυτοκίνητο ως προς τον βαθμό πολυπλοκότητας συναρμολόγησης, τη μάζα και το μέγεθος. Επομένως για την επιλογή της μέγιστης δυνατής κατανάλωσης ενέργειας από το πεδίο που αναφέρθηκε παραπάνω, προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό των εκπομπών κατά τη συναρμολόγηση του στροβιλοκινητήρα :

$$E_{assem} = M \cdot 47 \cdot 10^{-7} \left(EF_{country} \cdot \Pi_{electric} + \frac{1}{\eta_{th}} \cdot EF_{fuel} \cdot \Pi_{fuel} \right) \quad [kg \ CO2eq] \quad (4.7)$$

Όπου M η μάζα του στροβιλοκινητήρα, $EF_{country}$ ο δείκτης εκπομπής κάθε χώρας για την ηλεκτροπαραγωγή (kg / MWh), EF_{fuel} ο δείκτης εκπομπής του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, Π τα ποσοστά χρήσης ηλεκτρισμού από το δίκτυο (electric) ή από γεννήτριες (fuel) και η_{th} ο θερμικός βαθμός απόδοσης των γεννητριών. Ο όρος $47 \cdot 10^{-7}$ είναι η μετατροπή της ενέργειας που απαιτείται για τη συναρμολόγηση 1 kg μάζας σε μεγαβατώρες (MWh).

4.2.1 Παραδοχές υπολογισμών κατεργασιών

- Στους υπολογισμούς δεν έχουν συμπεριληφθεί δύο σημαντικά στάδια παρασκευής ενός στροβιλοκινητήρα· η δημιουργία ανθεκτικών διεπιφανειών στα πτερύγια και ο έλεγχος του στροβιλοκινητήρα με μη καταστροφικές μεθόδους (ραδιογραφία, υπέρηχοι). Το πρώτο είναι δύσκολο να εκτιμηθεί, διότι θα απαιτούσε τη γνώση της συνολικής επιφάνειας που καλύπτεται αλλά και της ενέργειας που καταναλώνεται για το σκοπό αυτό. Ο υπολογισμός της καλυπτόμενης επιφάνειας είναι μία εκτεταμένη διαδικασία, ενώ δεδομένα για τις ενεργειακές ανάγκες των ψεκασμών ή επικαλύψεων δεν έχουν βρεθεί έως τη στιγμή της συγγραφής της εργασίας. Επιπλέον, εκτιμάται ότι οι εκπομπές που οφείλονται στη δημιουργία διεπιφανειών θα είναι αρκετά μικρές ώστε να μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Όσον αφορά τον έλεγχο του στροβιλοκινητήρα για ατέλειες, αυτές θα μπορούσαν να συνεκτιμηθούν, με μία αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας για τη συναρμολόγηση του κινητήρα και χρήση της εξίσωσης (4.7).



- Έχει γίνει η θεώρηση ότι ο στροβιλοκινητήρας που μελετάται βρίσκεται ήδη σε παραγωγή, οπότε και δεν απαιτούνται να εκτιμηθούν οι εκπομπές που οφείλονται στα στάδια του σχεδιασμού του και των δοκιμών του. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται από τους μηχανικούς για να δημιουργήσουν τα πρώτα μηχανολογικά σχέδια του κινητήρα. Οι δοκιμές κάνουν έλεγχο της αξιοπιστίας του σχεδιασμού των μηχανικών, φέρνοντας τον στροβιλοκινητήρα αντιμέτωπο με αντίξοες συνθήκες, όπως την εισδοχή ενός πτηνού στο χώρο του ανεμιστήρα. Οι δοκιμές αυτές πολλές φορές καταστρέφουν τον κινητήρα και πραγματοποιούνται ώστε να είναι βέβαιο ότι αυτός είναι ασφαλής. Άλλες δοκιμές, που αφορούν τη λειτουργία του κινητήρα, μπορούν να συνεκτιμηθούν σύμφωνα με τη μεθοδολογία του κεφαλαίου 5.

4.3 Μεταφορές και διανομή των εξαρτημάτων του στροβιλοκινητήρα

Για τον υπολογισμό των ανθρακικών εκπομπών των επίγειων οχημάτων χρησιμοποιείται η μελέτη των A. Gialos, V. Zeimpekis, M. Madas και K. Parageorgiou [49] η οποία αφορά τα φορτηγά της ελληνικής επικράτειας. Οι εκπομπές των φορτηγών αεροσκαφών και πλοίων λαμβάνεται από άρθρο του περιοδικού Nature από τον M. Horikin [50], ενώ πηγή για τις εκπομπές λόγω χρήσης φορτηγών τρένων (κατανάλωση ενέργειας και χρήση κινητήρων Diesel) είναι η ενημερωτική σελίδα της βρετανικής Υπηρεσίας Σιδηροδρόμων (Office of Rail and Road) [51].

Πίνακας 4-12: Δείκτες εκπομπής διαφόρων μέσων μεταφορών προϊόντων

ΕΙΔΟΣ ΜΕΣΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (CO ₂ eq kg/t-km)	Πηγές
Ρυμουλκό Φορτηγό	0,0976	[49]
Ενιαίο Φορτηγό	0,3736	[49]
Φορτηγό Αεροσκάφος	0,673	[50]
Φορτηγό Πλοίο	0,0265	[50]
Φορτηγά Τρένα	0,0265	[51]

Πηγές : «Calculation and Assessment of CO₂e Emissions in Road Freight Transportation: A Greek Case Study», « Ships' greenhouse emissions revealed», «Rail Emissions – April 2021 to March 2022»

Η σχέση που δίνει τις εκπομπές κατά τη διανομή και τις μεταφορές για κάθε εξάρτημα είναι η ακόλουθη :



$$E_{dist} = m \sum_i^N K_i \cdot \Delta S_i \quad [kg CO_2 eq] \quad (4.8)$$

Όπου m η μάζα του εξαρτήματος σε τόνους, K_i ο συντελεστής εκπομπής κάθε διαδρομής σε χιλιόγραμμα αερίου του θερμοκηπίου προς χιλιόμετρα και τόνο εξαρτήματος ($kg CO_2 eq / km \cdot t$) και ΔS_i η απόσταση κάθε διαδρομής σε χιλιόμετρα (km).

Ο τελικός προορισμός ενός στροβιλοκινητήρα είναι στη γραμμή παραγωγής του αεροσκάφους στο οποίο θα προσαρμοστεί. Για την εργασία αυτή ο τελικός προορισμός θεωρείται το εργοστάσιο της Airbus στη Τουλούζη (Toulouse) της Γαλλίας. Συγκεκριμένα για τον CFM56 οι τοποθεσίες κατασκευής διαφόρων εξαρτημάτων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4-13 : Περιοχές δημιουργίας τμημάτων του CFM56

ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ CFM56	ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ - ΕΤΑΙΡΕΙΑ
Ανεμιστήρας, τμήματα χαμηλής πίεσης	Γαλλία, Safran
Τμήματα υψηλής πίεσης	Ohio, General Electric
Στρόβιλος χαμηλής πίεσης	Ιταλία, Avio Aero
Θάλαμος καύσης	Ohio, General Electric
Τμήματα θαλάμου καύσης	Arizona, Honeywell ³⁶

Πηγή : Avio Aero³⁷

Η χρήση της σχέσης (4.8) απαιτεί τη γνώση των αποστάσεων από το σημείο εκκίνησης μέχρι τον προορισμό. Στις περιπτώσεις στις οποίες πραγματοποιείται αερομεταφορά ή μεταφορά με πλοίο, χρησιμοποιείται η σχέση (5.3) (βλέπε εδάφιο 5.1) η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι γνωστές οι συντεταγμένες των δύο σημείων του ταξιδιού. Για τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται επίγεια μέσα μεταφοράς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εφαρμογή των Χαρτών Google (Google Maps).

Οι Χάρτες Google είναι μια πλατφόρμα χαρτογραφίας της Google. Προσφέρει δορυφορικές εικόνες, αεροφωτογραφίες, οδικούς χάρτες, πανοραμική θέα 360° δρόμων (Street View), συνθήκες κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο και σχεδιασμό διαδρομής για ταξίδια με τα πόδια, αυτοκίνητο, ποδήλατο και δημόσια μέσα μεταφοράς [52].

³⁶ Συγκεκριμένα κατασκευάζουν το σύστημα τροφοδότησης του καυσίμου.

³⁷ <https://www.avioaero.com/en/commercial-aviation/propulsion-system> (Τελευταία πρόσβαση: 15/5/2023)



Γίνεται η υπόθεση ότι το αεροσκάφος θα είναι ένα Airbus 320 και θα παραδοθεί στο αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος. Όλες οι διαδρομές που θα πραγματοποιηθούν παρουσιάζονται στον πίνακα 4-14 (Πίνακας 4-14).

Πίνακας 4-14 : Διαδρομές των εξαρτημάτων του κινητήρα CFM56

ΑΦΕΤΗΡΙΑ	ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΣ	ΜΕΣΟ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (km)
G.E. Aviation, Ohio	Διεθνές Αεροδρόμιο Rickenbacker, Ohio	Ρυμουλκό φορτηγό	165 ή 198 ή 216
Διεθνές Αεροδρόμιο Rickenbacker	Αεροδρόμιο Τουλούζης – Μπλανιάκ, Γαλλία	Φορτηγό Αεροσκάφος	6.684
Αεροδρόμιο Τουλούζης – Μπλανιάκ	Airbus, Τουλούζη	Ρυμουλκό φορτηγό	6 ή 8
Safran (Snecma), Villaroche, Γαλλία	Airbus, Τουλούζη	Ρυμουλκό φορτηγό	693
Honeywell, Arizona	Διεθνές Αεροδρόμιο Phoenix Sky Harbor	Ρυμουλκό φορτηφό	1,93
Διεθνές Αεροδρόμιο Phoenix Sky Harbor	Αεροδρόμιο Τουλούζης – Μπλανιάκ	Φορτηγό Αεροσκάφος	9.130
Avio Aero, Τορίνο, Ιταλία	Airbus, Τουλούζη	Ρυμουλκό φορτηγό	787
Αεροδρόμιο Τουλούζης – Μπλανιάκ, Γαλλία	Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος, Αθήνα	Τουλάχιστον μία πτήση	1.980
Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος, Αθήνα	Tarmac Aerosave, Αεροδρόμιο Tarbes–Lourdes–Pyrénées (Ταρμπ)	Μία πτήση	2.082

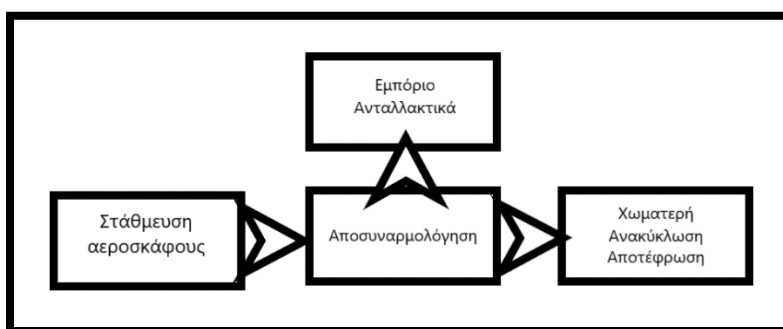
Σημειώνεται ότι η εταιρεία Tarmac Aerosave είναι σημαντική συνεργάτης της Safran, η οποία αναλαμβάνει να συλλέξει τους αεροπορικούς κινητήρες της CFM, να τους αποσυναρμολογήσει και να τους ανακυκλώσει.

4.4 Απόσυρση στροβιλοκινητήρα και των εξαρτημάτων του

Δύο είναι τα πιθανότερα σενάρια για το τέλος της ζωής ενός στροβιλοκινητήρα. Είτε θα καταλήξει στη χωματερή (landfilling) και στον κλίβανο (incineration), είτε θα ανακυκλωθεί. Συνηθέστερα τα περισσότερα τμήματα ανακυκλώνονται για δύο βασικούς λόγους :

- Η παραγωγή ενός στροβιλοκινητήρα είναι ένας κλειστός κύκλος (closed cycle). Εκτιμάται ότι το 99% ενός στροβιλοκινητήρα ανακυκλώνεται από τις ίδιες εταιρείες – συνεργάτες που επεξεργάζονται και δημιουργούν υλικά για νέους στροβιλοκινητήρες.
- Το κόστος εξόρυξης μετάλλων, όπως το τιτάνιο, και της δημιουργίας σύνθετων υλικών ξεπερνά το κόστος της ανακύκλωσης τους.

Βασικό πλεονέκτημα των παραπάνω είναι ότι περιορίζονται πολύ οι ανθρακικές εκπομπές στο στάδιο της δημιουργίας νέων υλικών στροβιλοκινητήρων.



Εικόνα 4-1 : Διαδικασία απόσυρσης αεροσκάφους ή στροβιλοκινητήρα

Πολύ οικονομικό επίσης είναι η χρήση παλιών τμημάτων αεροσκαφών, αυτούσιων, ως ανταλλακτικά για νέα αεροσκάφη. Συνήθως τα τμήματα αυτά δεν είναι παλαιά μέρη του κινητήρα, διότι η κόπωση τον καθιστά ακατάλληλο για παραπάνω πτήσεις. Σχηματικά η διαδικασία της απόσυρσης φαίνεται στην [Εικόνα 4-1](#).



Για την περίπτωση της ανακύκλωσης υλικού χρησιμοποιούνται δείκτες εκπομπής που εντοπίζονται από τη βιβλιογραφία. Για την εκτίμηση των ανθρακικών εκπομπών γίνεται ο περιορισμός στην απαιτούμενη ενέργεια για την αποτέφρωση ή το θάψιμο σε χωματερή, με τη χρήση των δεικτών κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων σύμφωνα με τη παράγραφο 4.2. Η σχέση που δίνει τις ανθρακικές εκπομπές ανά μάζα εξαρτήματος / τμήματος του στροβιλοκινητήρα που ανακυκλώνεται είναι η ακόλουθη :

$$E_{Recycling} = m_i \cdot (1 - r_{reuse}) \cdot r_{recycle} \cdot EF_{recycling} \quad [kg \text{ CO}_2eq] \quad (4.9)$$

Όπου m_i η μάζα του εξαρτήματος/τμήματος του κινητήρα, r_{reuse} το ποσοστό χρήσης του εξαρτήματος ξανά ως έχει, $r_{recycle}$ ο ρυθμός ανακύκλωσης του εξαρτήματος και $EF_{recycling}$ ο δείκτης εκπομπής (σε $kg \text{ CO}_2$ ανά kg προϊόντος) σύμφωνα με την έρευνα των M.J. Eckelman, L. Ciacci, G. Kavlak, P. Nuss, B.K. Reck και T.E. Gradel [34] που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.1.1.

Για την περίπτωση της αποτέφρωσης, η σχέση που δίνει τις ανθρακικές εκπομπές ανά μάζα εξαρτήματος / τμήματος του στροβιλοκινητήρα που καίγεται :

$$E_{inci} = m_i \cdot (1 - r_{reuse}) \cdot \left(r_{incineration} \cdot EF_{incineration} + \left(EF_{country} \cdot \Pi_{electric} + \frac{1}{\eta_{th}} \cdot EF_{fuel} \cdot \Pi_{fuel} \right) + E_{burn} \right) \quad [kg \text{ CO}_2eq] \quad (4.10)$$

Όπου m_i η μάζα του εξαρτήματος/τμήματος του κινητήρα, r_{reuse} το ποσοστό χρήσης του εξαρτήματος ξανά ως έχει, $r_{incineration}$ ο ρυθμός αποτέφρωσης του εξαρτήματος και $EF_{incineration}$ αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν λόγω των ενεργειακών αναγκών της καύσης. Ο δείκτης E_{burn} αφορά το ίδιο το υλικό που θερμαίνεται και απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα λόγω της καύσης του.

Η σχέση (4.9), όπως η (4.7) (βλέπε εδάφιο 4.2), εξαρτάται από τη χώρα στην οποία γίνεται η αποτέφρωση των απορριμμάτων. Όμοια σχέση, δίχως την ανάγκη για τον δείκτη εκπομπής E_{burn} , ισχύει και για την περίπτωση που τα απορρίμματα μεταφερθούν σε χωματερή.

Πηγές για την απαιτούμενη ενέργεια για τη διαδικασία της ταφής σε χωματερή και της αποτέφρωσης είναι η εργασία των I. Thushari, J.Vicheanteab και D. Janjaroen [53]. Ορίζουν μία ενδεικτική τιμή 2,5 kWh για τη ταφή ενός τόνου απορριμμάτων και 86,4 kWh για την αποτέφρωση ενός τόνου απορριμμάτων. Επίσης ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται κατά την καύση ενός χιλιόγραμμου απορριμμάτων βρίσκεται στο εύρος 0,7 – 1,2 $kg \text{ CO}_2 / kg$, σύμφωνα με την εργασία του B. Johnke για τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) [54].

Όμοια με το εδάφιο της εξόρυξης – παραγωγής των υλικών (4.1.1), κατασκευάζεται ο Πίνακας 4-15 με τους δείκτες εκπομπής των υλικών (κράματα και σύνθετα υλικά) όταν ανακυκλώνονται.



Πίνακας 4-15 : Δείκτες εκπομπής για την ανακύκλωση διάφορων υλικών

ΚΡΑΜΑ Ή ΥΛΙΚΟ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (kgCO _{2e} /kg)	ΣΧΟΛΙΑ	Πηγή
Κράματα με Ti ή Fe	0,061	Θεωρώντας ότι η ανακύκλωση των κραμάτων των στροβιλοκινητήρων είναι μέρος μίας κυκλικής διαδικασίας απόσυρσης -παραγωγής.	[34]
Κράματα με Ni ή Co	0,052	Θεωρώντας ότι η ανακύκλωση των κραμάτων των στροβιλοκινητήρων είναι μέρος μίας κυκλικής διαδικασίας απόσυρσης -παραγωγής.	[34]
Ανοξείδωτος Χάλυβας	0,063	Θεωρώντας ότι η ανακύκλωση των κραμάτων των στροβιλοκινητήρων είναι μέρος μίας κυκλικής διαδικασίας απόσυρσης -παραγωγής.	[34]
Άλλα μέταλλα / κράματα	0,072	Θεωρώντας ότι η ανακύκλωση των κραμάτων των στροβιλοκινητήρων είναι μέρος μίας κυκλικής διαδικασίας απόσυρσης -παραγωγής.	[34]
Carbon Fiber (Ανθρακόνημα)	1,67	-	[37]
Carbon Fiber Reinforced Polymer (C.F.R.P.)	5,68	-	[38]
Glass Fiber Reinforced Polymer (G.F.R.P.)	4,62	-	[38]
Υαλονήματα	2,82	Γνωρίζοντας ότι η ανακύκλωση ενός χιλιόγραμμου G.F.R.P. δίνει 0,61 χιλιόγραμμα υαλονήματος.	[38]
Σύνθετα Κεραμικής Υλικά Κεραμικής Μήτρας (Ceramic Matrix Composites)	2	Υπόθεση του συγγραφέα.	

Πηγές : Life cycle carbon benefits of aerospace alloy recycling, «DEMAND AND DISPOSAL FORECAST FOR CARBON FIBRE BY BOTTOM-UP APPROACH», «Life Cycle Assessment of a Thermal Recycling Process as an Alternative to Existing CFRP and GFRP Composite Wastes Management Options»

Γενικά τα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες (fiber) δύσκολα ανακυκλώνονται και σχεδόν ποτέ δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για τους ίδιους σκοπούς. Το ίδιο πρόβλημα προκύπτει και κατά την απόσυρση των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Η δυσκολία αποτυπώνεται και από τον δείκτη εκπομπής κατά την ανακύκλωση του ανθρακονήματος, η οποία ξεπερνά το γενικό δείκτη 1,2 kg ανά χιλιόγραμμο απορριμμάτων που καίγονται. Όμως δεν πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι η ανακύκλωση των σύνθετων υλικών επιφέρει σημαντικά θετικά αποτελέσματα. Μπορεί να μειώσει την ανάγκη για παραγωγή νέων υλικών (Πίνακας 4-5) και να αποτρέψει τις συνέπειες της καύσης ή ταφής των απορριμμάτων (όπως την απελευθέρωση τοξικών ουσιών).



4.4.1 Παραδοχές υπολογισμών απόσυρσης κινητήρα

- Έχει θεωρηθεί ότι ο στροβιλοκινητήρας έχει φτάσει πλέον ένα σημαντικό στάδιο γήρανσης και δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Στην πραγματικότητα όμως δεν είναι τόσο ασυνήθιστο ένα αεροσκάφος ή τμήματα του να καταλήγουν στο εμπόριο για χρήση ως ανταλλακτικά. Οι σχέσεις 4.9 και 4.10 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση που υπάρχει χρήση τμημάτων του στροβιλοκινητήρα (όπως είναι) με τη μεταβολή της τιμής r_{reuse} .
- Στη μελέτη τους οι Ivan Jakovljevic, Radomir Mijailovic, Petar Miroslavljivic [30] έχουν λάβει πολύ μικρή τιμή για την απαιτούμενη ενέργεια αποσυναρμολόγησης του στροβιλοκινητήρα ανά χιλιόγραμμο (370 kJ/kg). Η τιμή έχει ληφθεί από την εργασία των Nada Zamel και Xianguo Li, οι οποίοι θεωρούν ότι αυτή η ενέργεια αντιστοιχεί σε ένα αυτοκίνητο το οποίο καταστρέφεται για scrap (shredded). Η ενέργεια αυτή κρίνεται υπερβολικά μικρή, γνωρίζοντας ότι ο στροβιλοκινητήρας αποσυναρμολογείται διεξοδικά. Προτείνεται ένας αριθμός κοντά στην απαιτούμενη ενέργεια δημιουργίας του. Εκτιμάται ότι καταναλώνεται η μισή ενέργεια σε σχέση με την συναρμολόγηση (assembly), άρα περίπου 11.000 kJ/kg.

4.5 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μία εστίαση στις φάσεις του κύκλου ζωής του κινητήρα, οι οποίες περιλαμβάνουν την παραγωγή και αξιοποίηση των δομικών του υλικών. Άρα αυτές είναι οι φάσεις δημιουργίας τους, κατεργασίας τους, μεταφοράς τους ως εξαρτήματα πλέον και της απόσυρσης ολόκληρου του κινητήρα. Για κάθε στάδιο προτείνονται υπολογιστικές σχέσεις οι οποίες μπορούν να δώσουν μία εικόνα για το ανθρακικό αποτύπωμα. Οι βασικές μεταβλητές τους είναι η μάζα και η ενέργεια.

Έχοντας τον διαχωρισμό κάθε τμήματος του στροβιλοκινητήρα σε ποσοστά μάζας, αναζητούνται τα υλικά τα οποία απαρτίζουν το καθένα. Όταν βρεθούν τα κράματα ή τα σύνθετα υλικά, αυτά διαχωρίζονται στα βασικά τους στοιχεία και προσδιορίζεται το ανθρακικό αποτύπωμα της εξόρυξης ή της δημιουργίας τους. Τα υλικά όμως τροποποιούνται περαιτέρω πριν λάβουν τη τελική τους μορφή ως εξαρτήματα του στροβιλοκινητήρα. Έτσι, επόμενο στάδιο είναι ο προσδιορισμός των ανθρακικών εκπομπών λόγω της κατεργασίας των υλικών.

Σε αντίθεση με προηγουμένως, ο υπολογισμός του ανθρακικού αποτυπώματος των κατεργασιών γίνεται βάσει της καταναλισκόμενης ενέργειας. Αυτό επιτρέπει να μπορούν να μελετηθούν πολλές περιπτώσεις από μία γκάμα κατεργασιών και να εξεταστεί η επίδραση της τοποθεσίας του κατασκευαστή στις ανθρακικές εκπομπές.



Το κεφάλαιο κλείνει με τη μελέτη των ανθρακικών εκπομπών λόγω της μεταφοράς των εξαρτημάτων του στροβιλοκινητήρα από το χώρο κατασκευής στο χώρο λειτουργίας και με την απόσυρση του, που μπορεί να περιλαμβάνει την υγειονομική ταφή, την αποτέφρωση, την ανακύκλωση ή ακόμη και την επαναχρησιμοποίηση του χωρίς πολλή επεξεργασία.

Συμπέρασμα του κεφαλαίου είναι ότι οι εκ πρώτης όψεως απλές σχέσεις που αναπτύχθηκαν, αποδεικνύονται πολύπλοκες, λόγω της ανάγκης τους για όσο το δυνατόν εγκυρότερες μεταβλητές εισαγωγής. Η χρήση της παραπάνω μεθοδολογίας απαιτεί καλή γνώση των μεταβλητών εισαγωγής, ώστε να οδηγήσει σε ένα ανθρακικό αποτύπωμα που να ανταποκρίνεται επιεικώς στην πραγματικότητα.



5. Λειτουργία και συντήρηση του στροβιλοκινητήρα

Ο στροβιλοκινητήρας που μελετάται μπορεί να είναι δύο ειδών : προωθητικός κινητήρας ή μηχανικής ισχύος. Η εργασία επικεντρώνεται στους στροβιλοαντιδραστήρες, αλλά η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο παρόν κεφάλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό των ανθρακικών εκπομπών ενός αεριοστρόβιλου.

Σε αυτό το κεφάλαιο, δίδονται οι σχέσεις που διέπουν τις ανθρακικές εκπομπές λόγω λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα, ενώ εφαρμόζεται μεθοδολογία για την εκτίμηση των εκπομπών λόγω της χειροτέρευσης των επιδόσεων του. Τέλος, προτείνεται μέθοδος για τον υπολογισμό των εκπομπών των καυσίμων, των λιπαντικών και της συντήρησης του.

5.1 Απλοποιημένο μοντέλο λειτουργίας στροβιλοαντιδραστήρα

Για τον υπολογισμό των ανθρακικών εκπομπών κατά τη φάση λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα, χρησιμοποιείται μία παραλλαγή της εξίσωσης 2.4. Συγκεκριμένα για έναν κύκλο προσγείωσης-απογείωσης θα ισχύει η σχέση:

$$E_{operation} = (\Delta t \cdot 60) \cdot \dot{m}_f \cdot EF_{CO_2} \quad (5.1)$$

Όπου : Δt ο χρόνος λειτουργίας σε έναν κύκλο απογείωσης-προσγείωσης σε λεπτά, \dot{m}_f η παροχή του καυσίμου σε kg/s, ενώ EF_{CO_2} ο συντελεστής εκπομπών του καυσίμου που καίγεται.

Η παραπάνω σχέση δεν είναι γραμμική. Η παροχή του καυσίμου εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος και την ώση που πρέπει να παραχθεί από τον κινητήρα. Η παροχή καυσίμου συνδέεται με την ώση μέσω της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου που είναι συγκεκριμένη για κάθε κινητήρα :

$$S.F.C = \frac{\dot{m}_f}{F} \quad (5.2)$$

Όπως έχει αναφερθεί στην παρουσίαση εργασίας σε προηγούμενο εδάφιο (1.3), ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας ορίζει τα όρια των εκπομπών των στροβιλοαντιδραστήρων βάσει του κύκλου προσγείωσης-απογείωσης, ο οποίος οριοθετεί



το ποσοστό της ώσης και το χρόνο που περνά ένα αεροσκάφος σε μία φάση λειτουργίας του στον αερολιμένα.

Πίνακας 5-1 : Κύκλος Προσγείωσης και Απογείωσης του Διεθνή Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΒΑΘΜΟΣ ΩΣΗΣ (%)	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ [min]
ΤΡΟΧΟΔΡΟΜΗΣΗ (TAXI/IDLE)	7	26
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	30	4
ΑΝΑΒΑΣΗ	85	2,2
ΑΠΟΓΕΙΩΣΗ	100	0,7

Πηγή : Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας³⁸

Ο ποσοστιαίος βαθμός της ώσης μετριέται με βάση την ονομαστική ώση του κινητήρα, που συμπίπτει με την ώση απογείωσης. Κατά τη διάρκεια της πλεύσης (cruising) μπορεί να θεωρηθεί ότι η ώση είναι περίπου ίση με το 1/6 της ονομαστικής και η ειδική κατανάλωση καυσίμου διπλάσια [55].

Στη διάρκεια της πτήσης προσεγγιστικά ένα αεροσκάφος ταξιδεύει με μία σταθερή ταχύτητα (έστω 850-900 km/h), και άρα η διάρκεια της πτήσης εξαρτάται (κυρίως) από την απόσταση μεταξύ του σημείου αναχώρησης και τον προορισμό. Για να ληφθεί υπόψη η καμπυλότητα της Γης, οι αποστάσεις μεταξύ αεροδρομίων (ή λιμανιών για υπερατλαντικά ταξίδια), αξιοποιείται η μέθοδος Haversine που υπολογίζει την απόσταση μεταξύ δύο γεωγραφικών σημείων [56] :

$$D = 2R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (5.3)$$

Η D είναι γνωστή ως γεωδαισιακή καμπύλη. Για την περίπτωση ενός αεροπορικού ταξιδιού, R είναι η ακτίνα της Γης (σε χιλιόμετρα), ενώ φ_i , λ_i είναι τα γεωγραφικά πλάτη και μήκη αντίστοιχα (σε ακτίνια) , δύο σημείων πάνω στον χάρτη.

Άρα κατά τη διάρκεια της πτήσης θα ισχύει :

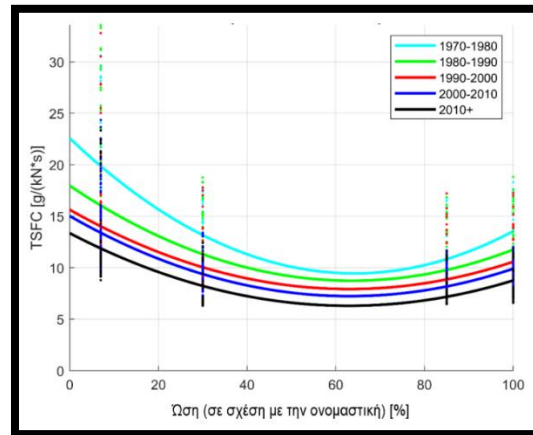
$$\Delta t = \frac{D}{U} \quad (5.4)$$

Όπου U είναι η μέση ταχύτητα πρόωσης του αεροσκάφους. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η σχέση (5.1) γράφεται και με τον παρακάτω τρόπο :

³⁸ https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LAQ_TechnologyStandards.aspx (Τελευταία πρόσβαση : 16/2/2023)

$$E_{operation} = \left(\frac{D}{U} \cdot 60 \right) \cdot (S.F.C.) \cdot F \cdot EF_{CO_2} \quad (5.5)$$

Απαραίτητο είναι να είναι γνώστη η σχέση της κατανάλωσης του καυσίμου με την ώση. Τέτοιες καμπύλες προκύπτουν αρχικά πειραματικά και στη συνέχεια, μέσω αριθμητικής ανάλυσης, αποτυπώνονται σε προσομοιώσεις ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στην **Εικόνα 5-1** φαίνεται ένα παράδειγμα ενός τέτοιου διαγράμματος.



Εικόνα 5-1 : Ωση σε σχέση με την ειδική κατανάλωση (Πηγή: "Review of advanced low-emission technologies for sustainable aviation"³⁹)

Σημειώνεται ότι η σχέση της ώσης με την κατανάλωση μεταβάλλεται από το υψόμετρο, άρα τις εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας του στροβιλοαντιδραστήρα και από τη ταχύτητα με την οποία κινείται.

5.2 Απλοποιημένο μοντέλο λειτουργίας αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος

Έστω ένας αεριοστρόβιλος μηχανικής ισχύος σε λειτουργία σε ένα ορισμένο σημείο. Οι εκπομπές θα προκύπτουν από μία σχέση της μορφής που έχει η (5.5). Με την εισαγωγή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου :

$$s.f.c. = \frac{1}{\eta_{th} \cdot q_f} \quad (5.6)$$

Και γνωρίζοντας τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο την ισχύ που παράγει :

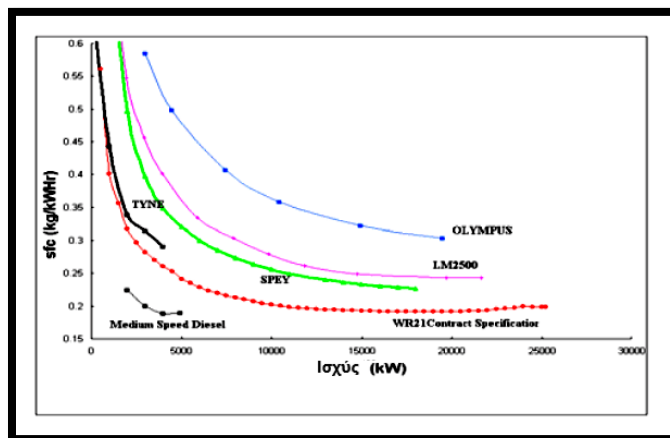
$$P = \eta_{th} \cdot q_f \cdot \dot{m}_f \quad (5.7)$$

Τότε προκύπτει η σχέση :

$$E_{operation} = (\Delta t \cdot 60) \cdot P \cdot (s.f.c.) \cdot EF_{CO_2} \quad (5.8)$$

³⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219316299> (Τελευταία πρόσβαση : (9/5/2023))

Όπου η_{th} ο θερμικός βαθμός απόδοσης, q_f η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου και P η παραγόμενη ισχύς. Η σχέση (5.8) μπορεί να αναφέρεται ακόμη και σε περιόδους μικρότερες του λεπτού, που καθορίζονται από τις ενεργειακές απαιτήσεις της εγκατάστασης του αεριοστρόβιλου.



Εικόνα 5-2 : Σχέση ισχύος με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (Πηγή : "Comparative Assessment of Two Thermodynamic Cycles of an aero-derivative Marine Gas Turbine"⁴⁰)

Η **Εικόνα 5-2** δείχνει την εξάρτηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου από την ισχύ του αεριοστρόβιλου. Επομένως ο προσδιορισμός των ανθρακικών εκπομπών ενός αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος απαιτεί τη γνώση της ενεργειακής κάλυψης που παρέχει κατά τη διάρκεια της ζωής του.

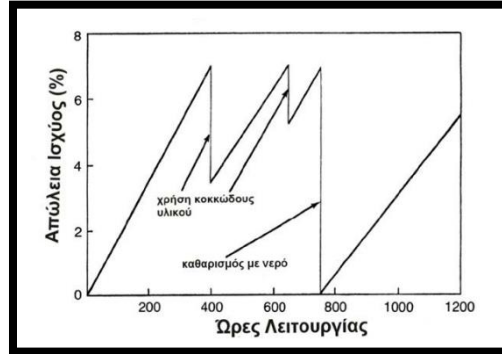
5.3 Απλοποιημένο μοντέλο χειροτέρευσης του στροβιλοκινητήρα

Οι στροβιλοκινητήρες αντιμετωπίζουν προβλήματα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, τα οποία ελαττώνουν τις επιδόσεις τους. Ορισμένα από αυτά είναι ζημιές από την εισχώρηση ξένων αντικειμένων στο εσωτερικό τους, η επικάθηση υλικών στα πτερύγια τους, η καταπόνηση των εξαρτημάτων τους και βέβαια η αναπόφευκτη γήρανση τους. Η μείωση της επίδοσης, που σημαίνει μειωμένη ώση ή ισχύς, απαιτεί τη χρήση περισσότερου καυσίμου για να εξισορροπηθούν οι απώλειες, οδηγώντας έτσι στην παραγωγή περισσότερων ρύπων.

Η **Εικόνα 5-3** δείχνει την απώλεια της ισχύος ενός αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος και την προσπάθεια ανάκτησης της με μεθόδους συντήρησης. Η κατακόρυφη ευθεία αντιπροσωπεύει τον τερματισμό της λειτουργίας της μηχανής και το «λύσιμο» της για καθαρισμό και συντήρηση.

⁴⁰

<https://www.semanticscholar.org/paper/Comparative-Assessment-of-Two-Thermodynamic-Cycles-Bonet-Piilidis/dfb4bd3609c9272efac25c72af0084e0c71b135b> (Τελευταία πρόσβαση : (9/5/2023)



Εικόνα 5-3 : Χειροτέρευση αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος (Πηγή : Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων)

Τέτοια δραστική μέθοδος συντήρησης πραγματοποιείται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και περιλαμβάνει την αφαίρεση του στροβιλοαντιδραστήρα από το αεροσκάφος, και το «σβήσιμο» ενός αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος. Αναφέρεται ως συμβατική συντήρηση και αναλύεται περισσότερο στο εδάφιο 5.5.

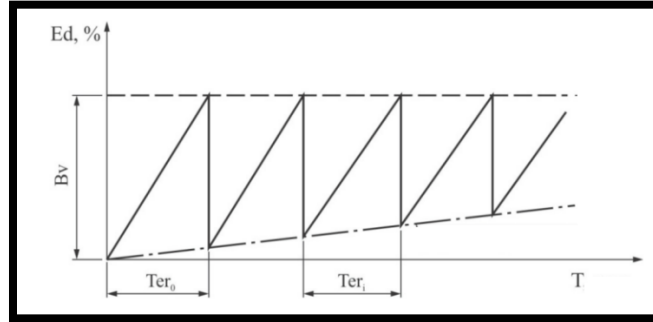
Σημαντική ιδιότητα της συντήρησης αυτής είναι η αδυναμία της να επαναφέρει τον στροβιλοκινητήρα πλήρως στις αρχικές συνθήκες. Πάντοτε θα υπάρχει μία, έστω πολύ μικρή, απώλεια ισχύος, η οποία αυξάνεται αναλογικά με τη γήρανση του κινητήρα. Οι εκπομπές που οφείλονται στην επιβάρυνση του κινητήρα εξαρτώνται, τότε, τόσο από τον αριθμό των επισκευών του (άρα από την αξιοπιστία του) αλλά και από τον χρόνο που είναι σε λειτουργία (εξαιτίας της γήρανσης).

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τροποποιημένες σχέσεις από την εργασία των Jakonljevic, Mijailovic και Miroslavjevic [30] και ακολουθείται η μέθοδος που έχουν προτείνει αυτοί.

$$E_{de1} = \frac{B_v \cdot T_{er0}}{2} \cdot EF_{CO_2} \cdot F_{CO} \quad (5.9)$$

$$E_{dei} = \left(\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{B_v + R_i}{2} \right) \cdot T_{eri} \right) \cdot F_{ci} \right) \cdot EF_{CO_2} \quad (5.10)$$

Οι εκπομπές λόγω χειροτέρευσης του στροβιλοκινητήρα είναι ανάλογες του εμβαδού που σχηματίζεται από τα τρίγωνα συντήρησης στο διάγραμμα απωλειών ισχύος και χρόνου λειτουργίας (Εικόνα 5-3 και Εικόνα 5-4). Στην Εικόνα 5-4 ως E_d (%) ορίζεται η απώλεια ισχύος ή ώσης.



Εικόνα 5-4 : Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών χειροτέρευσης (Πηγή: "Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft"⁴¹)

Ως Bv [%] (border value) ορίζεται η ανώτατη επιτρεπτή απώλεια ισχύος. Φτάνοντας αυτή τη τιμή, ξεκινά η επαναφορά του κινητήρα στις αρχικές του συνθήκες. Γίνεται η θεώρηση ότι ο κινητήρας φτάνει την ανώτατη επιτρεπτή απώλεια ισχύος στις στιγμές που ορίζει ο κατασκευαστής. Οι στιγμές αυτές, Ter_i , μπορούν να εκφραστούν είτε ως χρόνος, είτε ως κύκλοι απογείωσης-προσγείωσης. Τότε, ο κινητήρας επιστρέφει σε μία νέα αρχική κατάσταση, με μία αρχική απώλεια R_i [%] (repair). Οι θέσεις των Ter_0 και R_0 ορίζουν μία ευθεία της μορφής $y=ax$. Η ευθεία αυτή είναι η γραμμή της γήρανσης (οι συγγραφείς την ονομάζουν repair line) θεωρώντας ότι αυτή πραγματοποιείται γραμμικά. Έχοντας τη γραμμή της γήρανσης, εντοπίζονται οι υπόλοιπες απώλειες R_i , στα αντίστοιχα διαστήματα Ter_i .

Για τον τελικό υπολογισμό, αθροίζονται οι δύο σχέσεις 5.9 και 5.10. Ως Fc_i (fuel consumed) ορίζεται είτε μία μέση τιμή του καυσίμου που έχει καταναλωθεί κατά το χρονικό διάστημα Ter_i , είτε το σύνολο της μάζας του καυσίμου που έχει καταναλωθεί σε περίοδο Ter_i κύκλων πτήσης.

Οι ανάγκες για την αποτροπή της χειροτέρευσης εξαρτώνται από τον κινητήρα και τις οδηγίες του κατασκευαστή. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 5-2) οι περίοδοι στις οποίες πρέπει να γίνει ολική επισκευή του στροβιλοκινητήρα CFM56-7. Οι περίοδοι αυτές ισχύουν για αεροσκάφη που έχουν λόγο ωρών πτήσης προς κύκλους πτήσης κοντά στο 1,9:

$$r = \frac{EFH}{EFC} \quad (5.11)$$

Ο λόγος r είναι αδιάστατος, ενώ EFH (Engine Flight Hour) είναι οι ώρες πτήσης και EFC (Engine Flight Cycle) είναι οι ολοκληρωμένοι κύκλοι απογείωσης-προσγείωσης (πτήσης).

⁴¹ [Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft - ScienceDirect](#) (Τελευταία πρόσβαση : 9/5/2023)

**Πίνακας 5-2 : Περίοδοι ολικής επισκευής στροβιλοκινητήρα**

ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	1 ^η ΠΕΡΙΟΔΟΣ	2 ^η ΠΕΡΙΟΔΟΣ	3 ^η ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΣΥΝΟΛΟ	Μονάδες
-7B20/22	20.000	20.000	-	40.000	Κύκλοι πτήσης
-7B24	18.000	12.000	8.000	38.000	Κύκλοι πτήσης
-7B26	14.000	9.000	9.000	32.000	Κύκλοι πτήσης
-7B27	11.000	9.000	9.000	29.000	Κύκλοι πτήσης

Πηγή : « OWNER'S & OPERATOR'S GUIDE: CFM56-7B⁴²»

Η υπερκατανάλωση λιπαντικού ελαίου (λαδιού) ή ελαίου ψύξης υπολογίζεται με την ίδια μέθοδο, χρησιμοποιώντας παραλλαγές των προηγούμενων σχέσεων:

$$Oil_{degr.1} = \frac{B_v \cdot T_{ero}}{2} \cdot Oilco_{.1} \quad (5.12)$$

$$Oil_{degr.2} = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{B_v + R_i}{2} \right) \cdot T_{eri} \right) \cdot Oilco_{.i} \quad (5.13)$$

Δηλαδή διαγράφονται οι συντελεστές ανθρακικών εκπομπών και αντικαθίστανται με την κατανάλωση του ελαίου ανά περίοδο χρήσης και επισκευής (5.5.2).

5.4 Παραδοχές υπολογισμών λειτουργίας και χειροτέρευσης κινητήρα

- Οι εξισώσεις (5.5) και (5.8) δε λαμβάνουν υπόψιν τις συνθήκες περιβάλλοντος. Προϋπόθεση για τη σωστή χρήση τους είναι η γνώση της σχέσης της κατανάλωσης καυσίμου με την παραγόμενη ισχύ ή ώση. Η εξίσωση (5.5) δεν λαμβάνει υπόψιν άλλες επιπλέον συνθήκες, όπως το βάρος του αεροσκάφους και τη σταδιακή μείωση του λόγω της κατανάλωσης του καυσίμου.
- Οι ανθρακικές εκπομπές που οφείλονται στη χειροτέρευση της δομής του αεροσκάφους δεν υπολογίζονται, αφού αποτελούν τμήμα των ανθρακικών εκπομπών του συστήματος «αεροσκάφος».
- Οι τιμές του πίνακα 5-2 (Πίνακας 5-2) αναφέρονται σε στροβιλοκινητήρες CFM56-7. Λόγω έλλειψης ακριβέστερων δεδομένων, οι τιμές αυτές αποτελούν τη βάση για τη μελέτη της χειροτέρευσης του CFM56-5A κατά τη λειτουργία του.
- Η υπερκατανάλωση των ελαίων επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, ανεξάρτητους από τη ροή του καυσίμου, που δεν λήφθηκαν υπόψιν στις παραπάνω προσεγγίσεις (5.6).

⁴² https://www.aircraft-commerce.com/wp-content/uploads/aircraft-commerce-docs1/Aircraft%20guides/CFM56-7B/ISSUE58_CFM56_7B_GUIDE.pdf (Τελευταία πρόσβαση: 16/5/2023)



5.5 Συντήρηση και λουπές εκπομπές παραγωγής

5.5.1 Παραγωγή καυσίμων – Συμβατικών και προηγμένων

Στη μελέτη πρέπει να υπολογιστούν και οι ανθρακικές εκπομπές που οφείλονται στη χρήση του καυσίμου και των λιπαντικών τα οποία απαιτεί ο στροβιλοκινητήρας. Αναλυτικά τα βιοκαύσιμα περιγράφονται στο Παράρτημα ΙΙ (13.1.1). Ιδιότητες αυτών ως προς το ανθρακικό αποτύπωμα τους, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-3).

Πίνακας 5-3 : Δείκτης εκπομπής για την παραγωγή βιοκαυσίμων

ΧΩΡΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΤΙΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ	Πηγή
Alcohol-to-Jet (A.T.J.) (Ισοβουτανόλη και Αιθανόλη) – (μέσω συμβατικών μεθόδων)	0,0325	CO ₂ eq kg/MJ	[57]
Alcohol-to-Jet (A.T.J.) (Ισοβουτανόλη και Αιθανόλη) – (μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και βιομάζας)	0,0185	CO ₂ eq kg/MJ	[57]
Συνθετική Ισοπαραφίνη (S.I.P.)	0,0230	CO ₂ eq kg/MJ	[57]
Υδρογονοκατεργασμένοι εστέρες και λιπαρά οξέα (H.E.F.A.)	0,0005	CO ₂ eq kg/MJ	[57]
(ΗΗ-S.P.K.) από το φυτό <i>Camelina</i>	0,031	CO ₂ eq kg/MJ	[58]
ΗΗ-S.P.K. από Μικροφύκη (<i>microalgae</i>)	0,0395	CO ₂ eq kg/MJ	[58]
ΗΗ-S.P.K. από το φυτό <i>Jatropha</i>	0,0376	CO ₂ eq kg/MJ	[58]
Fischer-Tropsch (E.E.) (<i>Miscanthus</i>)	-0,0116	CO ₂ eq kg/MJ	[59]
Υδρογόνο (μέσω συμβατικών μεθόδων)	0,084	CO ₂ eq kg/MJ	[60]
Υδρογόνο (μέσω φωτοβολταϊκών)	0,044	CO ₂ eq kg/MJ	[60]
Υδρογόνο (μέσω θερμικής ενέργειας Ηλίου)	0,028	CO ₂ eq kg/MJ	[60]
Υδρογόνο (μέσω αιολικής ενέργειας)	0,005	CO ₂ eq kg/MJ	[60]
Υδρογόνο (μέσω βιομάζας)	0,02	CO ₂ eq kg/MJ	[60]
Υδρογόνο (μέσω υδροηλεκτρικής ενέργειας)	0,012	CO ₂ eq kg/MJ	[60]

Πηγές : , «Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes», « Comprehensive LCA of Biobased Sustainable Aviation Fuels and JET A-1 Multiblend», « Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance », «CORSA Eligible Fuels»

Ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει το έγγραφο του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (I.C.A.O.), το οποίο περιέχει μια μεγάλη λίστα με τους δείκτες εκπομπής παραγωγής διάφορων βιοκαυσίμων της αεροπορίας [59] (13.3).



Πίνακας 5-4 : Δείκτες εκπομπής για την παραγωγή συμβατικών καυσίμων

ΧΩΡΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΤΙΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΜΟΝΑΔΕΣ	Πηγή
Κηροζίνη (Σαουδική Αραβία)	0,0082	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Κηροζίνη (Ιαπωνία)	0,0102	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Κηροζίνη (Ρωσία)	0,0127	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Κηροζίνη (Ηνωμένο Βασίλειο)	0,0142	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Κηροζίνη (Γερμανία)	0,0152	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Κηροζίνη (Ινδία)	0,0157	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Κηροζίνη (Γαλλία)	0,0157	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Κηροζίνη (Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής)	0,0172	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Κηροζίνη (Τουρκία)	0,0212	CO ₂ eq kg/MJ	[61]
Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (L.N.G., Η.Π.Α.)	0,0187	CO ₂ eq kg/MJ	[62]

Πηγές : «Understanding variability in petroleum jet fuel life cycle greenhouse gas emissions to inform aviation decarbonization», NASA

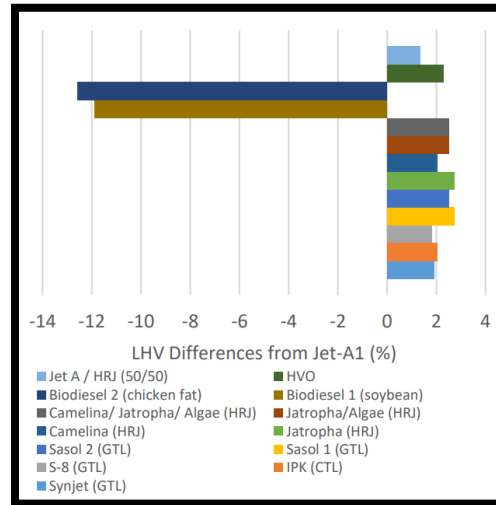
Τα στάδια που περιλαμβάνονται στην παραγωγή της συμβατικής κηροζίνης είναι η εξόρυξη αργού πετρελαίου, η μεταφορά του και η διύλιση του, προς παραγωγή του τελικού προϊόντος. Έτσι ερμηνεύεται η χαμηλότερη τιμή στη Σαουδική Αραβία, σε σχέση, για παράδειγμα, με τη Γαλλία. Κάθε χώρα επίσης συνηθίζει να χρησιμοποιεί τη κηροζίνη της δικής της παραγωγής [61].

Παρατηρείται ότι το βιοκαύσιμο κατασκευασμένο από λιπαρά οξέα (H.E.F.A.) έχει τις λιγότερες ανθρακικές εκπομπές κατά την παραγωγή του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα λιπαρά οξέα θεωρούνται απόβλητα και η ανάλυση κύκλου ζωής ξεκίνησε από τη μεταφορά τους στον χώρο επεξεργασίας. Στα υπόλοιπα βιοκαύσιμα έχει ληφθεί υπόψη η δημιουργία της βιομάζας [57].

Ο Πίνακας 5-4 δίνει τις ανθρακικές εκπομπές κατά την παραγωγή του κάθε καυσίμου. Οι δείκτες δεν περιλαμβάνουν τις εκπομπές λόγω της μεταφοράς των καυσίμων. Αυτές παραλείπονται, αφού είναι δύσκολο να εκτιμηθούν χωρίς να είναι γνωστή η πολιτική κάθε αεροπορικής εταιρείας ή αεροδρομίου και επίσης γιατί οι εκπομπές αυτές δε σχετίζονται άμεσα με την ανάλυση κύκλου ζωής του κινητήρα. Αν υπάρχει θέληση για υπολογισμό των εκπομπών με βάση την μάζα καυσίμου που παράγεται, τότε αρκεί να πολλαπλασιαστούν οι δείκτες εκπομπής με την θερμογόνο ικανότητα του κάθε καυσίμου.

Η θερμογόνο ικανότητα των βιοκαυσίμων διαφέρει σε μικρό βαθμό σε σχέση με τη τυπική θερμογόνο ικανότητα του αεροπορικού καυσίμου (κηροζίνη, Jet-A1 – 43,1 MJ/kg). Στην Εικόνα 5-5 φαίνεται, από προηγούμενη εργασία του Εργαστηρίου Θερμικών

Στροβιλομηχανών, η διαφορά της θερμογόνου ικανότητας τυπικών βιοκαυσίμων σε σχέση με τη κηροζίνη.



Εικόνα 5-5 : Κατώτατη θερμογόνος ικανότητα (L.H.V.) βιοκαυσίμων (Πηγή : Λειτουργία Κινητήρων Turbofan Πολιτικών Αεροσκαφών με Καύσιμα από Ανανεώσιμες Πηγές: Υδρογόνο, Βιοκαύσιμα ⁴³

Ως παραδοχή, για την εργασία κάθε βιοκαύσιμο έχει θερμογόνο ικανότητα 2% μεγαλύτερη από αυτή της κηροζίνης (δηλαδή 43,962 MJ/kg). Ως βιοκαύσιμα αεροπορίας χρησιμοποιούνται μόνο εκείνα που έχουν φυτική προέλευση (όχι ζωική).

Στη περίπτωση χρησιμοποίησης βιοκαυσίμων, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (I.C.A.O.) προτείνει τη χρήση της παρακάτω σχέσης [63] :

$$E_{red} = 3,16 \cdot \left[M \cdot \left(1 - \frac{e_{biofuel}}{0,89} \right) \right] [kg] \quad (5.14)$$

Στη σχέση αυτή, 3,16 είναι ο συντελεστής εκπομπών για την καύση καύσιμου της αεροπορίας (kg/kg), η τιμή 0,89 αναφέρεται στον δείκτη εκπομπής (kg/MJ) για την παραγωγή της κηροζίνης, M είναι η μάζα καυσίμου που καταναλώνεται σε χιλιόγραμμα και $e_{biofuel}$ ο δείκτης εκπομπής του βιοκαυσίμου από τον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-3).

Η σχέση (5.14) εκτιμά τη μείωση στις ανθρακικές εκπομπές κατά τη λειτουργία του στροβιλοκινητήρα, λόγω της χρήσης βιοκαυσίμων. Αν λοιπόν, είναι γνωστή η συνολική κατανάλωση του καυσίμου για μία περίοδο λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα, τότε οι εκπομπές από την καύση βιοκαυσίμου εγκεκριμένου από το πρόγραμμα CORSIA της I.C.A.O. (13.3) θα είναι :

$$E_{bio} = 3,16 \cdot M \cdot \left(\frac{e_{biofuel}}{0,89} \right) [kg] \quad (5.15)$$

⁴³ <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/55042> (Τελευταία πρόσβαση : 9/6/2023)



5.5.2 Παραγωγή λιπαντικών και ψυκτικών ελαίων

Πίνακας 5-5 : Δείκτες εκπομπής διαφόρων λιπαντικών

ΕΙΔΟΣ ΛΙΠΑΝΤΙΚΟΥ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ (CO ₂ eq kg / kg)	ΠΗΓΗ
Συμβατικό (πετρελαίου)	0,985	[64]
Πολύ-Αλφα-Ολεφίνη (συνθετικός υδρογονάνθρακας)	1,880	[64]

Πηγή : «LCA of petroleum-based lubricants: state of art and inclusion of additives»

Φυσιολογικά ο κινητήρας καταναλώνει ένα ποσό του λιπαντικού του συστήματος λίπανσης, απαιτώντας τακτικές αναπληρώσεις κατά τη συντήρηση. Η υπερκατανάλωση του λιπαντικού μπορεί να οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων (υψηλή τιμή Exhaust Gas Temperature (E.G.T.), άρα και στην πιθανή διαφυγή και εξάτμιση του λιπαντικού, σε φθορά των εδράνων ολίσθησης ή σε βλάβη του συστήματος ψύξης [65]. Σαφώς την επηρεάζει και η γήρανση του κινητήρα, η οποία επηρεάζει και την ποσότητα των ανθρακικών εκπομπών.

Προηγμένοι στροβιλοκινητήρες τείνουν να έχουν λιγότερη κατανάλωση σε σχέση με τους παλαιότερους. Ο CFM LEAP1-B εκτιμάται ότι καταναλώνει 48,25 λίτρα λιπαντικού σε ένα μήνα λειτουργίας, σε σχέση με τον CFM56-B7 που καταναλώνει 51,08 λίτρα λιπαντικού [65]. Αν γίνει η υπόθεση ότι ένας στροβιλοκινητήρας λειτουργεί μηνιαίως για περίπου 260 ώρες πτήσης [66], τότε η κατανάλωση του λιπαντικού ανέρχεται στα 0,196 λίτρα ανά ώρα. Επιπλέον, θεωρώντας ότι η πυκνότητα του λιπαντικού είναι περίπου ίση με ένα χιλιόγραμμα ανά λίτρο [67], τότε η ωριαία κατανάλωση λιπαντικού είναι 0,196 χιλιόγραμμα ανά ώρα (πτήσης).

5.5.3 Συντήρηση του στροβιλοκινητήρα

Η συντήρηση είναι το σύνολο των ενεργειών που πρέπει να πραγματοποιηθούν σε μια μηχανή για επαναφορά των μηχανικών ανοχών σε προκαθορισμένα όρια και ανανέωση τμημάτων που έχουν υποστεί γήρανση πέραν κάποιων ορίων. Μπορεί να ενταχθεί σε δύο κατηγορίες. Η «υπό συνθήκη» συντήρηση η οποία πραγματοποιείται βάσει της διαγνωστικής και παρακολούθησης της λειτουργίας του κινητήρα, ενώ η συμβατική συντήρηση ακολουθεί τις οδηγίες του κατασκευαστή και γίνεται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, περιλαμβάνοντας ολική ή μερική επισκευή των εξαρτημάτων [3].

Η συμπεριφορά του κάθε στροβιλοκινητήρα είναι διαφορετική και η πρόβλεψη της απαιτεί πολλές συνιστώσες (ή μετρήσεις) οι οποίες είτε δεν είναι διαθέσιμες, είτε πρέπει να εκτιμηθούν. Επομένως, ένα καλύτερο μέτρο σύγκρισης του ανθρακικού αποτυπώματος δύο κινητήρων είναι η «υπό συνθήκη» συντήρηση η οποία επιβάλλεται ανεξάρτητα της ποιότητας του εξαρτήματος ή του κινητήρα.

Για την εκτίμηση των εκπομπών στο στάδιο της «υπό συνθήκη» συντήρησης, τροποποιείται η αντίστοιχη σχέση των Jakovljevic, Mijailovic και Miroslavjevic [30] ώστε να



παραλαμβάνει ως μεταβλητές τις συνιστώσες του στροβιλοκινητήρα (μάζα και υλικά κάθε εξαρτήματος) αντί του αεροσκάφους. Πρώτα ορίζεται η σταθερά της συντήρησης :

$$rep_i = \frac{1}{M} \frac{m_i}{FLC_i} \quad (5.16)$$

Με M τη μάζα του στροβιλοκινητήρα, m_i την μάζα του εξαρτήματος i και FLC_i τη διάρκεια ζωής του σε κύκλους ζωής (flight cycles).

Ο υπολογισμός των ανθρακικών εκπομπών λόγω της συντήρησης ενός εξαρτήματος δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$E_r = FLC_{en} \cdot \sum_{i=1}^N rep_i \cdot (E_{mining} + E_{manuf} + E_{assembly} + E_{dist}) \quad [kg \ CO_2eq] \quad (5.17)$$

Όπου FLC_{en} ο διάρκεια ζωής του κινητήρα σε κύκλους ζωής (life cycles).

Παρατηρείται ότι οι σχέσεις 5.16 και 5.17 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε μονάδα χρόνου, αρκεί να διακρίνεται η ανάλογα της διάρκειας ζωής του εξαρτήματος σε σχέση με τον στροβιλοκινητήρα. Για τμήματα του θερμού τμήματος του στροβιλοαντιδραστήρα (θάλαμος καύσης και στρόβιλος), τυπικές τιμές είναι 15.000 με 20.000 κύκλοι ζωής (flight cycles) [68]. Για τον CFM56 είναι γνωστά τα ακόλουθα στοιχεία:

Πίνακας 5-6 : Διάρκεια ζωής εξαρτημάτων στροβιλοκινητήρα CFM56-7B

ΒΑΣΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ CFM56	ΤΜΗΜΑΤΑ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ (ΣΕ ΚΥΚΛΟΥΣ ΠΤΗΣΗΣ – FLIGHT CYCLES) – LIFE LIMITED PARTS (L.L.P.)
ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (FAN)	Δίσκοι (Disks)	17.900
	Κωνικό τμήμα (Conical Support)	25.000
	Άξονας	30.000
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ (COMPRESSOR)	-	20.000
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ (TURBINE)	-	25.000
ΑΞΟΝΕΣ	Χαμηλής πίεσης	20.000
	Υψηλής πίεσης	25.000

Πηγή : «OWNER'S & OPERATOR'S GUIDE: CFM56-7B⁴⁴»

Οι κατασκευαστές στροβιλοαντιδραστήρων προτείνουν συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα στα οποία πρέπει να γίνεται αντικατάσταση συγκεκριμένων εξαρτημάτων, καθώς έχουν περάσει την αποδοτική περίοδο τους. Τα εξαρτήματα αυτά ονομάζονται

⁴⁴ https://www.aircraft-commerce.com/wp-content/uploads/aircraft-commerce-docs1/Aircraft%20guides/CFM56-7B/ISSUE58_CFM56_7B_GUIDE.pdf (Τελευταία πρόσβαση : 16/5/2023)



«εξαρτήματα περιορισμένης διάρκειας ζωής» (life limited parts). Γενικά, για τον CFM56-5A (και 5B) η διάρκεια ζωής των τμημάτων του ανεμιστήρα είναι 30.000 κύκλοι πτήσης, του τμήματος συμπιεστή και θαλάμου καύσης 20.000 κύκλοι πτήσης, ενώ του τμήματος του στροβίλου 25.000 κύκλοι πτήσης [69].

5.6 Παραδοχές υπολογισμών συντήρησης, παραγωγής καυσίμων-λιπαντικών

- Δεν λαμβάνεται υπόψιν η ποσότητα καυσίμου ή λιπαντικού που προϋπάρχει στον στροβιλοκινητήρα κατά την έναρξη λειτουργίας του (wet weight), λόγω έλλειψης δεδομένων.
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν οποιαδήποτε ποσότητα άκαυστου καυσίμου.
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν η μεταβολή που προκαλούν τα βιοκαύσιμα στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του στροβιλοκινητήρα. Για τον CFM56 η ποσοστιαία μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου φτάνει μέχρι το 2%, που είναι αρκετά μικρή ώστε να αμεληθεί [70].
- Η ποσότητα των λαδιών ψύξης και λίπανσης που καταναλώνονται εξαιτίας της χειροτέρευσης του κινητήρα δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια. Η υπερκατανάλωση μπορεί να οφείλεται σε χειροτέρευση που αποτυπώνεται στις αυξημένες τιμές E.G.T. (Exhaust Gas Temperature) (5.5.2), αλλά και σε αδιευκρίνιστες βλάβες ή αστοχίες στο σύστημα λίπανσης ή ψύξης.

5.7 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η μεθοδολογία προσδιορισμού των ανθρακικών εκπομπών που οφείλονται στη λειτουργία του στροβιλοκινητήρα, περιλαμβάνοντας έτσι και τα στάδια χειροτέρευσης του κινητήρα, της συντήρησης του και της παραγωγής καυσίμων και λιπαντικών.

Για τη σχέση που δίνει της ανθρακικές εκπομπές της λειτουργίας κύριες μεταβλητές αποτελούν οι ειδική κατανάλωση του καυσίμου και η ισχύς ή η ώση που παράγει ο κινητήρας. Απαραίτητη είναι η γνώση της σχέσης της πρώτη με τη δεύτερη για κάθε σημείο λειτουργίας του κινητήρα.

Για τη χειροτέρευση, γίνεται η θεώρηση ότι έχει γραμμική φύση και υπολογίζεται ως επιπλέον ποσοστό των εκπομπών της φυσιολογικής λειτουργίας.

Οι εκπομπές τη συντήρησης εξαρτώνται από τη διάρκεια ζωής κάθε εξαρτήματος, από τη διάρκεια λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα και από τις εκπομπές των φάσεων του κύκλου ζωής που αφορούν τα υλικά (βλέπε κεφάλαιο 4).

Τέλος, για τη κατανάλωση των καυσίμων αξιοποιούνται αντίστοιχες μελέτες κύκλου ζωής, ενώ για την κατανάλωση των λιπαντικών γίνεται μία εκτίμηση της ωριαίας κατανάλωσης



τους. Η χειροτέρευση αυξάνει τις αναγκαίες ποσότητες καυσίμων και λιπαντικών, άρα αυξάνει ταυτόχρονα και τις ανθρακικές εκπομπές.

Συμπερασματικά οι ανθρακικές εκπομπές των φάσεων που αφορούν τη λειτουργία του στροβιλοκινητήρα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κατανάλωση του καυσίμου. Όλες οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν, με εξαίρεση τη συντήρηση, στηρίζονται ακριβώς στην ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνει ο κινητήρας είτε φυσιολογικά, είτε εξαιτίας της μείωσης των επιδόσεων του.



6. Επαλήθευση και αξιολόγηση της υπολογιστικής μεθόδου

Έως τώρα έχουν χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικές σχέσεις και υποθέσεις προκειμένου να υπολογιστεί το ανθρακικό αποτύπωμα ενός στροβιλοκινητήρα. Η μελέτη έχει νόημα αν μπορεί να ανταποκριθεί στην πραγματικότητα και αν δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Επειδή η πρόσβαση στα δεδομένα των κατασκευαστών και η άμεση επαφή με έναν στροβιλοαντιδραστήρα του εμπορίου είναι δύσκολη, η αξιολόγηση της μεθόδου των προηγούμενων εδαφίων θα γίνει με σύγκριση των αποτελεσμάτων της με αυτά άλλων αντίστοιχων ερευνών.

6.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων ενοτήτων υλικών και κατεργασιών

Κύριο μέτρο σύγκρισης, στα στάδια αυτά, είναι τα αποτελέσματα των δύο εργασιών που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 2.3. Οι δύο εργασίες διαπραγματεύονται τον ίδιο τύπο αεροσκάφους με κινητήρες CFM56-5B.

Σύμφωνα με τον πίνακα 2-8 (Πίνακας 2-8), κατά τη μελέτη τους οι S. Howe, A.J. Kolios και F.P. Brennan [31] υπολόγισαν ότι το 19% των ανθρακικών εκπομπών κατά το στάδιο των κατεργασιών αντιστοιχεί στους στροβιλοκινητήρες. Γίνεται επισήμανση των παρακάτω σημείων :

- Το στάδιο των κατεργασιών στην εργασία των ερευνητών περιλαμβάνει τα βήματα της εξόρυξης και παραγωγής υλικών, κατεργασιών των τμημάτων, μεταφοράς τους στη γραμμή παραγωγής και συναρμολόγησης τους. Οι εκπομπές που οφείλονται στην μεταφορά των στροβιλοκινητήρων στο σημείο συναρμολόγησης του αεροσκάφους παραλείπονται, άρα δεν υπάρχει και λόγος να συγκριθούν.
- Η παρούσα εργασία εξετάζει τον κύκλο ζωής ενός στροβιλοκινητήρα. Οι εκπομπές που οφείλονται στην προσαρμογή του κινητήρα στο αεροσκάφος δεν έχουν υπολογιστεί, με την παραδοχή ότι αυτές οι εκπομπές υπάγονται στον κύκλο ζωής του αεροσκάφους.
- Στη μελέτη τους οι ερευνητές έχουν συμπεριλάβει στο συγκρότημα (assembly) «CFM56-5B» εξαρτήματα όπως το ακροφύσιο, τα ατρακτίδια και τα περιβλήματα.



Αυτά τα τμήματα δεν έχουν συμπεριληφθεί στην παρούσα εργασία, θεωρώντας ότι αποτελούν κομμάτια του αεροσκάφους. Έτσι όμως μειώνεται η μάζα του συγκροτήματος «CFM56-5B» και άρα οι ανθρακικές εκπομπές που οφείλονται στην παραγωγή του. Στην εργασία η καθαρή, ξηρή (dry) μάζα του στροβιλοκινητήρα λαμβάνεται ως 2.337 χιλιόγραμμα, ενώ στη μελέτη των ερευνητών η συνολική μάζα του συγκροτήματος είναι 3.526 χιλιόγραμμα.

Η εργασία των S. Howe, A.J. Kolios και F.P. Brennan δεν περιέχει αριθμητικές τιμές για άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα από την εργασία των I. Jakovljevic, R. Mijailovic και P. Mirosavljevic [30]. Παρακάτω φαίνονται οι ανθρακικές όλων των σταδίων του κύκλου ζωής ενός αεροσκάφους με κινητήρες CFM56 και μάζα 39.181 χιλιόγραμμα, για τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν από τους ερευνητές.

Πίνακας 6-1 : Ανθρακικές εκπομπές για τέσσερις περιπτώσεις αεροσκαφών

ΣΤΑΔΙΟ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ 1	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ 2	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ 3	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ 4
E ₁ (Παρασκευή υλικών) (kg CO ₂ eq)	138.707	94.329	139.140	139.359
E ₂ (κατεργασίες) (kg CO ₂ eq)	71.922	76.362	74.424	75.329
E ₃ (συναρμολόγηση) (kg CO ₂ eq)	113.021	112.297	110.018	112.993
E ₈ (απόσυρση) (kg CO ₂ eq)	2.004	2.021	2.006	2.034
ΣΥΝΟΛΟ (kg CO₂eq)⁴⁵	513.731.000	449.187.000	323.581.000	376.645.000

Πηγή : Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft [30]

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι δύο κινητήρες του αεροσκάφους συνεισφέρουν κατά 19 % στο κομμάτι της παρασκευής υλικών, των κατεργασιών και της συναρμολόγησης. Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι δύο κινητήρες συνεισφέρουν κατά το ίδιο βαθμό στις εκπομπές αυτές. Όμοια οι Iulia Dolganova, Vanessa Bach, Anne Rödl, Martin Kaltschmitt και Matthias Finkbeiner στην έρευνα τους, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η κατασκευή ενός στροβιλοκινητήρα προκαλεί το 10% των ανθρακικών εκπομπών της κατασκευής ενός αεροσκάφους [71]. Η εργασία τους βέβαια μελετά την χρήση στροβιλοκινητήρων τύπου CF6, οπότε δεν αξιοποιείται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

⁴⁵ Εννοείται το ανθρακικό αποτύπωμα του κύκλου ζωής, δηλαδή συμπεριλαμβανόμενων και των σταδίων μεταφοράς, λειτουργίας και χειροτέρευσης.



Παρόλα αυτά, οι δύο έρευνες δείχνουν ότι ένας στροβιλοκινητήρας προκαλεί το 9,5 – 10 % των ανθρακικών εκπομπών της κατασκευής ενός αεροσκάφους.

Το ποσοστό που αναλογεί σε έναν στροβιλοκινητήρα CFM56, δηλαδή 9,5 %, χρησιμοποιείται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 6-2), συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των τριών εργασιών.

Πίνακας 6-2 : Ανθρακικές εκπομπές στροβιλοκινητήρα για το στάδιο των κατεργασιών

ΣΤΑΔΙΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ 1	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ 2	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ 3	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ 4	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Σύνολο (kg CO ₂ eq)	30.747	26.884	30.740	31.130	29.875

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία του παρόντος κεφαλαίου, εκτιμάται ότι ένας στροβιλοκινητήρας CFM56 (ίδιας μάζας με τις μελέτες) προκαλεί την εκπομπή 19.110,57 χιλιόγραμμων διοξειδίου του άνθρακα. Προφανώς οι κατανομές της μάζας διαφέρουν σημαντικά, δεδομένου ότι προσθέτουμε 1.146 χιλιόγραμμα άλλων εξαρτημάτων στους υπολογισμούς.

Για επιβεβαίωση της εγκυρότητας της μεθόδου, γίνεται μία εκτίμηση των εκπομπών μίας νέας κατανομής, στην οποία περιλαμβάνονται και τα νέα τμήματα του στροβιλοκινητήρα (όπως το ακροφύσιο). Αυτά προστίθενται στην κατηγορία των «Controls and Accessories». Λόγω της μη διαθεσιμότητας υλικού που να σχετίζεται με την κατεργασία των εξαρτημάτων αυτών, γίνονται εκτιμήσεις και επιλέγονται διάφορες κατεργασίες από τον Πίνακα 4-8 (Πίνακας 4-8). Χρησιμοποιούνται κατεργασίες όπως έλαση για τη δημιουργία των περιβλημάτων, και τεχνικές injection molding για τα σύνθετα υλικά. Έτσι, αρχικά φτιάχνεται ο Πίνακας 6-3 :

Πίνακας 6-3 : Κινητήρας CFM56 με ακροφύσιο

ΤΜΗΜΑ ΥΠΟΤΙΘΕΜΕΝΟΥ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ CFM56	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΖΑΣ (%)
ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (FAN)	24,8
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (L.P.C.)	3,4
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (H.P.C.)	5,22
ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ (C.C.)	1,98
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (H.P.T.)	3,4
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (L.P.T.)	8,1
STRUCTURAL	14,5
ACCESSORIES	38,6



Για την επιλογή των υλικών που απαρτίζουν το ακροφύσιο, τα ατρακτίδια και τα περιβλήματα του κινητήρα, χρησιμοποιείται ως οδηγός η εργασία του João Vasco de Oliveira Fernandes Lopes, στην οποία παρέχει μία ενδεικτική κατανομή της μάζας των υλικών του κινητήρα GE CF6-80E1 [72]. Η κατανομή που παρέχεται δε χρησιμοποιείται αυτούσια, διότι περιέχει διαφορές σε σχέση με την ποσότητα των σύνθετων υλικών που περιέχει ο στροβιλοκινητήρας CFM56. Συγκεκριμένα, η διαφορά αυτή εντοπίζεται στην εργασία των I. Jakovljevic, R. Mijailovic και P. Miroslavljivic [30] και χρησιμοποιείται εδώ. Οι ποσότητες των υλικών, μαζί με τη διόρθωση, φαίνονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 6-4).

Πίνακας 6-4 : Κατανομή μάζας ακροφυσίου στροβιλοκινητήρα

ΥΛΙΚΟ (ΣΥΝΘΕΤΟ Ή ΚΡΑΜΑ) ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΖΑΣ (%) (JOAO VASCO DE OLIVEIRA FERNANDES LOPES)	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΖΑΣ (%)
Χάλυβας	57,17	66,14
Κράμα Τιτανίου	16,4	18,97
C.F.R.P.	21,43	12,07
G.F.R.P.	5	2,82

Πηγή : Life cycle assessment of the airbus A330-200 aircraft [72]

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αποτίμησης του ανθρακικού αποτυπώματος και των δεδομένων των πινάκων 3-4 (Πίνακας 3-4) και 6-4 (Πίνακας 6-4), δημιουργείται ο Πίνακας 6-5.

Ο Πίνακας 6-5 είναι ένας συνδυασμός των πληροφοριών που παρέχουν οι τρεις προαναφερόμενες εργασίες και περιέχει τις περιπτώσεις διαφόρων υποθετικών κατανομών μάζας. Ταυτόχρονα υπολογίζει το σφάλμα των μετρήσεων σε σχέση με τα αποτελέσματα των δημοσιεύσεων. Γίνεται εφαρμογή των σεναρίων των προαναφερόμενων εργασιών, όπως για παράδειγμα η ανακύκλωση 75 % των κραμάτων και 50 % των σύνθετων υλικών. Επιπλέον, επειδή και οι τρεις εργασίες έχουν γίνει από ευρωπαίους μελετητές, γίνεται η υπόθεση ότι ο κινητήρας κατασκευάζεται στην Ευρώπη.

**Πίνακας 6-5 : Μελέτη περιπτώσεων κατανομών CFM56 και εκπομπών υλικών-κατεργασιών**

ΣΤΑΔΙΟ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΣΦΑΛΜΑ - ΔΙΑΦΟΡΑ (%)	ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ
Σύνολο κατεργασιών (kg CO ₂ eq)	29.875,14	19.110,57	-36	Υπολογισμός για μάζα κινητήρα 2.380 kg (μάζα CFM35-5B). Κατανομή CFM56 μόνο. Υπόθεση 25% παρθένων υλικών και 75% ανακυκλωμένων.
Σύνολο κατεργασιών (kg CO ₂ eq)	29.875,14	29.724,18	-0,5	Υπολογισμός για μάζα κινητήρα 3.526 kg. Κατανομή CFM56 μόνο. Υπόθεση 25% παρθένων υλικών και 75% ανακυκλωμένων.
Σύνολο κατεργασιών (kg CO ₂ eq)	29.875,14	31.001,594	+3,6	Υπολογισμός για το συγκρότημα του κινητήρα μάζας 3.526 kg. Κατανομή σύμφωνα με τον πίνακα 6-3 (Πίνακας 6-3). Υπόθεση 25% παρθένων υλικών και 75% ανακυκλωμένων. Εξαιρέση το G.F.R.P. με 50% παρθένο και 50% ανακυκλωμένο υλικό. Χώρα παρασκευής η Γαλλία.
Σύνολο κατεργασιών (kg CO ₂ eq)	29.875,14	29.768,08	-0,36	Υπολογισμός για το συγκρότημα του κινητήρα μάζας 3.526 kg. Κατανομή σύμφωνα με τον πίνακα 6-4 (Πίνακας 6-4). Υπόθεση 25% παρθένων υλικών και 75% ανακυκλωμένων. Εξαιρέση το G.F.R.P. με 50% παρθένο και 50% ανακυκλωμένο υλικό. Χώρα παρασκευής η Γαλλία.

Η παραπάνω διαδικασία οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τη μεγαλύτερη επιρροή στις εκπομπές έχει η μάζα. Οι αποκλίσεις στις τελικές τιμές οφείλονται κυρίως σε αυτήν, ενώ οι εκπομπές από τις κατεργασίες προκαλούν τη μικρή μεταβολή τους (κυμαίνονται εντός του ορίου του 10 %). Επομένως η μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί δίνει λογικά αποτελέσματα και μπορεί, τουλάχιστον, να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση του αποτυπώματος διαφόρων κινητήρων στο κατασκευαστικό στάδιο.



6.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων της λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα

Τα αποτελέσματα των εργασιών που είχαν παρουσιαστεί στο εδάφιο 2.3, και στους Πίνακες 2-6 και 2-7 (Πίνακας 2-6, Πίνακας 2-7) αφορούν αεροσκάφη (άρα και κινητήρες) διαφόρων ηλικιών, ωρών λειτουργίας και δρομολογίων. Με άλλα λόγια, ο λόγος r (4.26) (5.3) των αεροσκαφών ποικίλει. Δίχως να είναι γνωστές όλες οι διαδρομές των αεροσκαφών, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα δεν μπορεί να είναι αψεγάδιαστη. Απαιτείται η αναγωγή των αποτελεσμάτων σε μία διαδρομή με γνωστά όσο το δυνατόν περισσότερα δεδομένα.

Πρώτα, αξιοποιείται το λογισμικό C.A.M.A.C.M. (Commercial Aircraft's Mission Analysis Computational Model) του εργαστηρίου στροβιλομηχανών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου. Το πρόγραμμα εκτελεί την ανάλυση μιας αποστολής εμπορικού αεροσκάφους (civil aircraft), χρησιμοποιώντας αρχές της φυσικής για την προσομοίωση πτήσης του αεροσκάφους, ενώ παράλληλα εξετάζει τη λειτουργία των κινητήρων και την απόδοσή τους σε πραγματικό χρόνο. Με αυτό τον τρόπο παρέχει όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες σχετικά με την πορεία πτήσης του αεροσκάφους, την ταχύτητά του, την κατανάλωση καυσίμου, τις εκπομπές ρύπων και το σημείο λειτουργίας των κινητήρων, ενώ επίσης δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της αποστολής ως προς ένα κριτήριο που επιλέγεται από τον χρήστη [73].

Έχοντας ήδη δεδομένα και αποτελέσματα για ένα «τρέξιμο» του C.A.M.A.C.M. με ένα αεροσκάφος Boeing 737-400 (το οποίο θεωρείται ότι προωθείται από κινητήρες CFM56), αυτά καταγράφονται στον πίνακα 6-6 (Πίνακας 6-6).

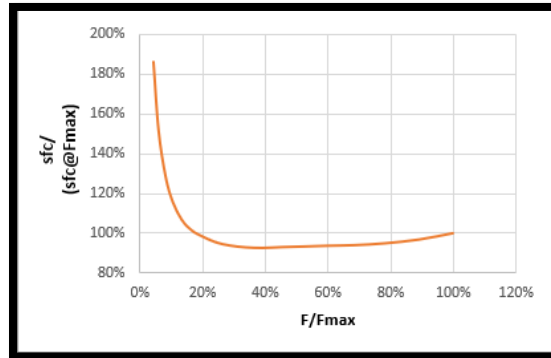
Πίνακας 6-6 : Δεδομένα από το CAMACM

Μήκος διαδρομής [km]	1.000
Υψόμετρο πτήσης [km]	9,14
Ταχύτητα πτήσης / πλεύσης (cruising) [Mach]	0,78
Χρόνος τροχοδρόμησης (taxiing) (min)	10
Χρόνος απογείωσης (take-off) (min)	0,43
Χρόνος ανάβασης (climb) (min)	14,5
Χρόνος πτήσης (cruising) (min)	47,3
Χρόνος κατάβασης – προσέγγισης (descent-approach) (min)	20,5

Πηγή : Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών Ε.Μ.Π.⁴⁶

⁴⁶ <https://www.ltt.ntua.gr/index.php/en/softwaremn/camacmmn> (Τελευταία πρόσβαση : 17/5/2023)

Σύμφωνα με τις σχέσεις 5.5 και 5.8, απαιτούνται τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία βρίσκεται ο στροβιλοκινητήρας σε μία συγκεκριμένη λειτουργία καθώς και η ισχύς του στις ίδιες περιόδους. Για τη σχέση της κατανάλωσης του καυσίμου και την ονομαστική ώση (ώση απογείωσης) χρησιμοποιείται λογισμικό προσομοίωσης ενός στροβιλοκινητήρα CFM56 :



Εικόνα 6-1 : Μοντελοποίηση λειτουργίας κινητήρα CFM56

Τα χρονικά διαστήματα λειτουργίας είναι γνωστά (Πίνακας 6-6, Πίνακας 5-2), ενώ για τη κάθε φάση λειτουργίας λαμβάνεται μία τιμή της ώσης ως συνάρτηση (ποσοστιαία) της ονομαστικής ώσης, σύμφωνα με τον πίνακα 5-1 (Πίνακας 5-1). Κάθε τιμή της ώσης θεωρείται ότι είναι η μέση τιμή για την εκάστοτε φάση λειτουργίας.

Ο κινητήρας θεωρείται ότι είναι ο CFM56-5A, με τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 6-7 : Βασικά χαρακτηριστικά CFM56-5A

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΠΗΓΕΣ
Ονομαστική ώση (απογείωσης)	104.533	N	
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (ονομαστική)	0,0378	Kg/N/h	
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (πλεύση)	0,0590	Kg/N/h	[74]
Ώση πλεύσης (N)	25.000	N	[75]
Καύσιμο	Κηροζίνη (3,16)	Kg CO ₂ / kg fuel	

Πηγή : Janes⁴⁷, Purdue School of Aeronautics and Astronautics, Civil Jet Aircraft Design

⁴⁷ <https://shop.janes.com/aero-engines-yearbook-20-21-6541-3000008247> (Τελευταία πρόσβαση : 17/5/2023)



Από την επεξεργασία του διαγράμματος της Εικόνας 6-1 (Εικόνα 6-1) λαμβάνεται ο επόμενος πίνακας δεδομένων για τον CFM56-5A:

Πίνακας 6-8 : Σχέση ώσης με ειδική κατανάλωση καυσίμου για CFM56

ΩΣΗ (% της ονομαστικής)	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (% της ονομαστικής)
7 (τροχοδρόμηση)	140
30 (κατάβαση)	93,8
24 (πτήση-πλεύση)	156
85 (ανάβαση)	96,4
100 (απογείωση)	100

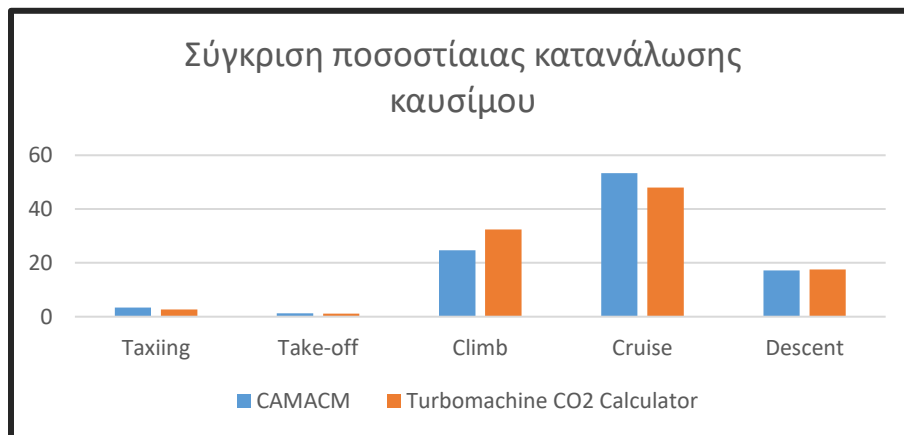
Πηγή : Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών Ε.Μ.Π.

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία του εδαφίου 5.1, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 6-9 : Σύγκριση μεθοδολογίας εργασίας με το λογισμικό SAMASM

ΦΑΣΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ SAMASM [kg fuel]	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ SAMASM για έναν κινητήρα [kg fuel]	ΠΟΣΟΣΤΟ [%] SAMASM	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ [kg fuel]	ΠΟΣΟΣΤΟ [%] ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	ΣΦΑΛΜΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [%]
Τροχοδρόμηση (Taxiing)	163,30	81,65	3,46	64,91	2,69	-20,5
Απογείωση (Take-off)	59,80	29,90	1,26	28,32	1,17	-5,3
Ανάβαση (Climb)	1.165,00	582,50	24,69	782,71	32,38	+25,5
Cruise (Πτήση)	2.518	1.259	53,4	1.160,91	48,03	-7,8
Descent Approach (Κατάβαση-Προσέγγιση)	810,8	405,4	17,19	380,22	17,53	-6,6
ΣΥΝΟΛΟ	4.717,7	2.358,85	-	2.417,07	-	+2,5

Σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου για τις δύο περιπτώσεις γίνεται στην [Εικόνα 6-2](#):



Εικόνα 6-2 : Σύγκριση ποσοστιαίας κατανάλωσης καυσίμου

Αρχικά παρατηρώντας την κατανάλωση καυσίμου κατά την απογείωση, συμπεραίνεται ότι ο κινητήρας που χρησιμοποιείται δεν είναι ο CFM56-5A, αφού θα έπρεπε το σφάλμα μεταξύ των δύο μετρήσεων να είναι πολύ μικρότερο. Παρόλα αυτά, φαίνεται η αξιοπιστία του μοντέλου, αφού αποτυπώνει τη σωστή τάση της κατανάλωσης του καυσίμου ανά φάση λειτουργίας ([Εικόνα 6-2](#)) και δίνει ένα ρεαλιστικό τελικό αποτέλεσμα (σφάλματος μόλις 2,468 %).

Για βελτίωση των αποτελεσμάτων, επιλέγεται ένας κινητήρας CFM56-3C, όπως άλλωστε έχουν τα αεροσκάφη 737-400. Οι ιδιότητες του είναι οι ακόλουθες :

Πίνακας 6-10 : Βασικά χαρακτηριστικά CFM56-3C

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΕΣ
Ονομαστική ώση (απογείωσης)	106.600	N
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (ονομαστική)	0,04	Kg/N/h
Καύσιμο	Κηροζίνη (3,16)	Kg CO ₂ / kg fuel

Πηγές : Janes⁴⁸, Αρχές Αεροπορικών Κινητήρων Ε.Μ.Π.⁴⁹, Aviation Week⁵⁰

⁴⁸ <https://shop.janes.com/aero-engines-yearbook-20-21-6541-3000008247> (Τελευταία πρόσβαση : 17/5/2023)

⁴⁹ <https://helios.ntua.gr/> (Τελευταία πρόσβαση : 17/5/2023)

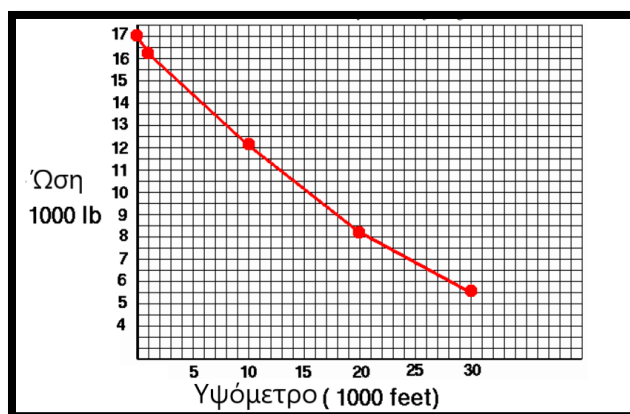
⁵⁰ <https://web.archive.org/web/20181106021310/http://www.geocities.jp/nomonomo2007/AircraftDatabase/AWdata/AviationWeekPages/GTEnginesAWJan2008.pdf> (Τελευταία πρόσβαση : 17/5/2023)



Εφαρμόζοντας ξανά τη μεθοδολογία, λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 6-11 : Πρώτη απόπειρα διόρθωσης κατανάλωσης καυσίμου για CFM56-3C

ΦΑΣΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ CAMACM για έναν κινητήρα [kg fuel]	ΠΟΣΟΣΤΟ [%] CAMACM	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ [kg fuel]	ΠΟΣΟΣΤΟ [%] ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	ΣΦΑΛΜΑ [%]
Τροχοδρόμηση (Taxiing)	81,65	3,46	68,73	2,68	-15,8
Απογείωση (Take-off)	29,90	1,26	29,99	1,17	-0,3
Ανάβαση (Climb)	582,50	24,69	828,79	32,3	+42,28
Cruise (Πτήση)	1.259	53,4	1.229,26	48,02	-2,36
Descent Approach (Κατάβαση- Προσέγγιση)	405,4	17,19	402,6	15,73	-0,69
ΣΥΝΟΛΟ	2.358,85	-	2.559,37	-	+8,5



Εικόνα 6-3 : Παράδειγμα μείωσης της ώσης με το ύψος, του κινητήρα JT8D-17 (Πηγή : NASA⁵¹)

Υπάρχει βελτίωση σε ορισμένες τιμές, αλλά μεγάλη διαφορά στη φάση της ανάβασης. Η ώση σε ποσοστό 80% της ονομαστικής, που προτείνεται από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας, αναφέρεται στα αρχικά στάδια της ανάβασης (στα δύο πρώτα λεπτά μάλιστα), μιας και η ώση των στροβιλοκινητήρων μειώνεται καθώς το αεροσκάφος φτάνει στο κατάλληλο ύψος για τη φάση της πτήσης (cruising). Είναι επίσης λογικό η ώση

⁵¹ <https://www1.grc.nasa.gov/> (Τελευταία πρόσβαση: 17/5/2023)



να μειώνεται σταδιακά, αφού είναι γνωστό ότι κατά τη διάρκεια της πτήσης πέφτει κοντά σε τιμές 20% της ονομαστικής ώσης. Η [Εικόνα 6-3](#) δείχνει την εξάρτηση της ώσης από το ύψος.

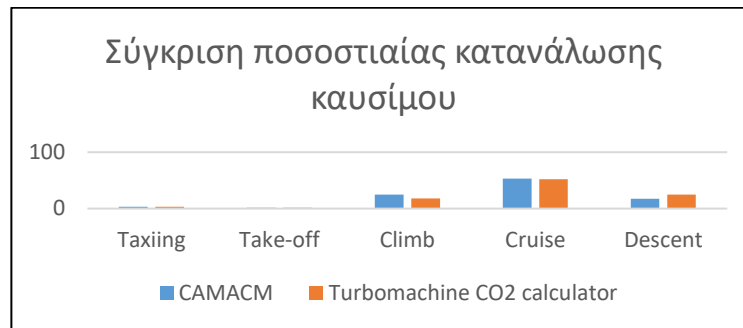
Επομένως:

- όρος της ανάβασης μειώνεται από 80% στο 60%, για να έχει ρόλο ενός υποθετικού μέσου όρου της ανάβασης.
- Ο όρος της τροχοδρόμησης αυξάνεται από 7% σε 9%, για να έχει το ρόλο ενός υποθετικού μέσου όρου της τροχοδρόμησης.
- Ο όρος της κατάβασης, αυξάνεται από 30% σε 32%, για να έχει τον ρόλο ενός υποθετικού μέσου όρου της κατάβασης.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον επόμενο πίνακα ([Πίνακας 6-12](#)). Ο υπολογισμός των ανθρακικών εκπομπών είναι ακριβής, ενώ οι φάσεις λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα αντιπροσωπεύονται καλύτερα από τους υπολογισμούς του πίνακα 6-11 ([Πίνακας 6-11](#)).

Πίνακας 6-12 : Δεύτερη απόπειρα διόρθωσης κατανάλωσης καυσίμου για CFM56-3C

ΦΑΣΗ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ CAMACM για έναν κινητήρα [kg fuel]	ΠΟΣΟΣΤΟ [%] CAMACM	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ [kg fuel]	ΠΟΣΟΣΤΟ [%] ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	ΣΦΑΛΜΑ [%]
Τροχοδρόμηση (Taxiing)	81,65	3,46	76,74	3,27	-6
Απογείωση (Take-off)	29,90	1,26	29,99	1,28	-0,3
Ανάβαση (Climb)	582,50	24,69	585,83	18,24	-0,48
Cruise (Πτήση)	1.259	53,4	1.229,26	52,30	-2,36
Descent Approach (Κατάβαση- Προσέγγιση)	405,4	17,19	428,61	24,92	+5,725
ΣΥΝΟΛΟ	2.358,85	-	2.350,43	-	-0,36



Εικόνα 6-4 : Δεύτερη σύγκριση ποσοστιαίας κατανάλωσης καυσίμου

Μεγάλος παράγοντας της τελικής διαμόρφωσης των αποτελεσμάτων είναι η φάση της πτήσης (πλεύσης), η οποία έχει τη μεγαλύτερη χρονική διάρκεια, άρα τη μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Περισσότερες δοκιμές και αξιολογήσεις μπορούν να γίνουν αναλύοντας τα αποτελέσματα που δίνει ο Υπολογιστής Ανθρακικών Εκπομπών του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO Carbon Emissions Calculator). Ο Υπολογιστής μπορεί να εκτιμήσει τις ανθρακικές εκπομπές ενός ταξιδιού, βάσει της κατανάλωσης του καυσίμου του αεροσκάφους. Από τον χρήστη απαιτείται μόνο το αεροδρόμιο αναχώρησης και άφιξης, και ο Υπολογιστής ελέγχει τα δεδομένα του Διεθνούς Οργανισμού Αεροπορίας ώστε να πραγματοποιήσει την εκτίμηση [76]. Αρχικά, πρέπει να γίνουν ορισμένοι υπολογισμοί. Σύμφωνα με τον πίνακα 6-6 (Πίνακας 6-6), το αεροσκάφος πετάει σε ύψος κοντά στα όρια της τροπόσφαιρας, όπου η θερμοκρασία είναι κατά μέσο όρο 223,15 K (-50 °C) σύμφωνα με τη σχέση 6.1 :

$$T = 15,04 - 0,00649 \cdot h \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.1)$$

Η σχέση (4.30) συνδέει το υψόμετρο h (σε μέτρα) με τη θερμοκρασία (σε βαθμούς Κελσίου) και ισχύει έως το τέρμα της τροπόσφαιρας (περίπου στα 10 χιλιόμετρα) [77]. Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της (μέσης) ταχύτητας του αεροσκάφους στο ύψος της πλεύσης – πτήσης.

Συνδυάζοντας τη σχέση (4.30) με τη σχέση (4.31) :

$$c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot (T + 273,15)} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (6.2)$$

η οποία δίνει τη ταχύτητα του ήχου σε ένα τέλειο αέριο ($\gamma=1,4$ $R=287,05$ J/kgK) και γνωρίζοντας τον αριθμό Mach :

$$M = \frac{u}{c} \quad (6.3)$$

Υπολογίζεται πως για το παράδειγμα του C.A.M.A.C.M., η μέση ταχύτητα πλεύσης είναι 851,55 km/h. Αυτή η ταχύτητα χρησιμοποιείται ως η μέση ταχύτητα για τους ακόλουθους υπολογισμούς και από αυτήν εξάγεται ο μέσος χρόνος που περνά το αεροσκάφος στο ύψος της πλεύσης.



Αναλυτικά, θεωρείται ότι το αεροσκάφος πραγματοποιεί ανάβαση και κατάβαση υπό σταθερή γωνία. Επιλέγεται οι γωνίες αυτές να είναι 6 και 3 μοίρες αντίστοιχα, γνωρίζοντας άλλωστε ότι η άνοδος και η κάθοδος ενός πολιτικού αεροσκάφους γίνεται με μικρή κλίση [78]. Με απλή τριγωνομετρία, μετριέται η οριζόντια απόσταση που διανύει το αεροσκάφος σε αυτές τις δύο φάσεις (η φάση της απογείωσης αμελείται), και εξάγεται η μέση χρονική διάρκεια πτήσης.

Με βάση αυτά, γίνεται η σύγκριση των δύο μεθόδων στον επόμενο πίνακα:

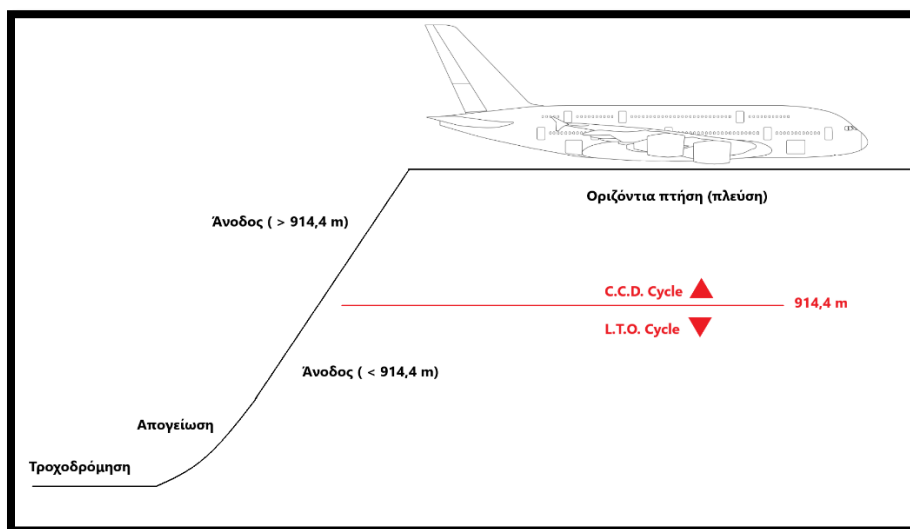
Πίνακας 6-13 : Σύγκριση μεθοδολογίας με τον ICAO Carbon Calculator

Διαδρομή	Μήκος (km)	Κατανάλωση καυσίμου ICAO (kg)	Κατανάλωση καυσίμου μεθοδολογίας (kg)	Εκτιμώμενος χρόνος πτήσης (cruising) (min)	Διαφορά [%]	Σημειώσεις
Αθήνα - Ρόδος	404	1.429,5	1.367	10,4	-4,37	Με ώση ανάβασης 70% της ονομαστικής, και χρόνους ίδιους με το παράδειγμα του CAMACM.
Αθήνα - Λονδίνο	2.390	5.051,65	4.794	150	-5,1	Με ώση ανάβασης 70% της ονομαστικής, και χρόνους ίδιους με το παράδειγμα του CAMACM.
Αθήνα - Κάιρο	1.106	2.796,8	2.574	59,54	-7,96	Με ώση ανάβασης 70% της ονομαστικής, και χρόνους ίδιους με το παράδειγμα του CAMACM.
Αθήνα - Ρώμη	1.085	2.783,5	2.536	58	-8,89	Με ώση ανάβασης 70% της ονομαστικής, και χρόνους ίδιους με το παράδειγμα του CAMACM.
Αθήνα - Ζυρίχη	1.637	3.928,45	3.488	96,8	-11,21	Με ώση ανάβασης 70% της ονομαστικής, και χρόνους ίδιους με το παράδειγμα του CAMACM.

Η παραπάνω μελέτη φανερώνει τα μειονεκτήματα της μεθοδολογίας της εργασίας, η οποία είναι η έλλειψη γνώσης των συνθηκών εκκίνησης και άφιξης των αεροσκαφών, τα είδη των στροβιλοκινητήρων που χρησιμοποιούνται στα ταξίδια και τις συνηθισμένες ρυθμίσεις των πιλότων που εκτελούν τα συγκεκριμένα δρομολόγια.

Με οδηγό το CAMACM, φαίνεται ότι ταξίδια κοντά στα 1.000 χιλιόμετρα μπορούν να αναπαρασταθούν με μία ικανοποιητική ακρίβεια μέσω της μεθοδολογίας της εργασίας. Απαιτεί όμως περισσότερες γνώσεις για τις μεταβλητές που διέπουν το αεροπορικό ταξίδι σε περιπτώσεις πτήσεων διαφορετικού βεληνεκούς και ύψους πτήσης.

Για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων του πίνακα 6-13 (Πίνακας 6-13), ενσωματώνονται στους υπολογισμούς ο κύκλος απογείωσης-προσγείωσης (L.T.O. Cycle : Landing Take-Off Cycle) και ο κύκλος Ανάβασης-Πτήσης-Κατάβασης (C.C.D. Cycle : Climb-Cruise-Descend Cycle), ώστε να γίνεται ο διαχωρισμός της απαιτούμενης ώσης στα χαμηλότερα υψόμετρα της αποστολής, από τα υψηλότερα (Εικόνα 6-5).



Εικόνα 6-5 : Κύκλοι L.T.O. και C.C.D. της αποστολής αεροσκάφους

Με τον διαχωρισμό των δύο κύκλων, τα αποτελέσματα βελτιώνονται σημαντικά, όπως αποτυπώνεται στα δεδομένα του επόμενου πίνακα (Πίνακας 6-14).



Πίνακας 6-14 : Δεύτερη απόπειρα σύγκρισης μεθοδολογίας με τον υπολογιστή εκπομπών I.C.A.O.

Πτήση	I.C.A.O. Calculator (kg fuel/flight)	Turbomachine CO ₂ Calculator ⁵² (kg fuel/flight)	Διαφορά (%)	Εκτιμώμενος χρόνος πτήσης (hours)
1) Αθήνα - Ζυρίχη	3.928,45	3.942,435	+0,36	2,8
2) Αθήνα – Ρώμη	2.783,55	2.849,85	+2,38	2,04
3) Αθήνα - Ελσίνκι	5.014,05	5.205,75	+3,82	3,6
4) Αθήνα - Λονδίνο	4.979,15	5.310,45	+6,65	3,7
5) Αθήνα – Ζάγκρεμπ	2.749,05	2.885,75	+4,97	2,06
6) Αθήνα - Παρίσι	4.520,85	4.675,59	+3,42	3,3
7) Αθήνα - Μαδρίτη	4.884,9	5.144,5	+5,31	3,63
8) Αθήνα - Στοκχόλμη	4.951,9	5.217,77	+5,37	3,7
9) Αθήνα - Βερολίνο	4.192,25	4.210,93	+0,44	3
10) Αθήνα - Κωνσταντινούπολη	2.127,35	2.075,89	-2,42	1,5
11) Αθήνα - Βελιγράδι	2.277	2.342	+2,85	1,7
12) Αθήνα - Ρόδος	2.859,4	2.825,8	+1,17	1,1

Τα βασικά δεδομένα για κάθε πτήση φαίνονται στον πίνακα 6-15 (Πίνακας 6-15). Έχει γίνει η υπόθεση ότι η (μέση) γωνία ανάβασης είναι 6 μοίρες, η (μέση) γωνία κατάβασης είναι 3 μοίρες, ενώ για κάθε φάση εκτιμάται η χρονική της διάρκεια, υποθέτοντας μία μέση, σταθερή ταχύτητα του αεροσκάφους.

⁵² Η ονομασία του υπολογιστικού εργαλείου που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Αναλυτική παρουσίαση του στο κεφάλαιο 14.2



Πίνακας 6-15 : Δεδομένα πτήσεων

Πτήση	Κύκλος I.T.O.	Ύψος πλεύσης (km)	Ανάβαση (χρόνος / ώση)	Πλεύση (χρόνος / ώση)	Ταχύτητα πλεύσης (km/h , Mach)	Κατάβαση (χρόνος / ώση)
1) Αθήνα - Ζυρίχη	I.C.A.O. (Πίνακας 5-1)	10	20 min / 65 %	92 min / 40%	841 km/h, 0,78	20 min / 32 %
2) Αθήνα - Ρώμη	I.C.A.O.	10	20 min / 65 %	55 min / 40%	841 km/h, 0,78	15 min / 32 %
3) Αθήνα - Ελσίνκι	I.C.A.O.	10	20 min / 65 %	151 min / 40%	841 km/h, 0,78	15 min / 32 %
4) Αθήνα - Λονδίνο	I.C.A.O.	10	20 min / 60 %	153 min / 40%	841 km/h, 0,78	18 min / 35 %
5) Αθήνα - Ζάγκρεμπ	I.C.A.O.	10	20 min / 65 %	56 min / 40 %	841 km/h, 0,78	15 min / 32 %
6) Αθήνα – Παρίσι	I.C.A.O.	10	18 min / 65 %	130 min / 40 %	841 km/h, 078	18 min / 32 %
7) Αθήνα - Μαδρίτη	I.C.A.O.	10	18 min / 65 %	149 min / 40%	841 km/h, 0,78	18 min / 32 %
8) Αθήνα – Στοκχόλμη	I.C.A.O.	10	17 min / 65 %	154 min / 40%	841 km/h, 0,78	17 min / 32 %
9) Αθήνα - Βερολίνο	I.C.A.O.	10	20 min / 65 %	108 min / 40%	841 km/h, 0,78	18 min / 32 %
10) Αθήνα - Κωνσταντινούπολη	I.C.A.O.	9	20 min / 65%	21 min / 40 %	853 km/h, 0,78	18 min / 32 %
11) Αθήνα – Βελιγράδι	I.C.A.O.	9	16 min / 65 %	40 min, 40%	822 km/h, 0,78	16 min / 32%
12) Αθήνα - Ρόδος	I.C.A.O.	8,3	12 min / 65 %	12 min / 40%	862 km/h, 0,78	12 min / 32 %

Επιπλέον γίνεται και μία σύγκριση με τα αποτελέσματα του πίνακα 13-6 (Πίνακας 13-6) ως προς τις ανθρακικές εκπομπές σε κάθε φάση. Ο Πίνακας 13-6 αναφέρεται σε ένα τυπικό αεροσκάφος και μία διαδρομή 500 ναυτικών μιλίων (926 χιλιομέτρων). Με τη μεθοδολογία της εργασίας, γίνεται η υπόθεση του ύψους πλεύσης 9 χιλιομέτρων, ενώ η ταχύτητα της πλεύσης ορίζεται στο 0,76 Mach.



Πίνακας 6-16 : Σύγκριση ποσοστών ανθρακικών εκπομπών σε φάσεις της αποστολής

ΣΤΑΔΙΟ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ	CONTRIBUTIONS OF CABIN RELATED AND GROUND OPERATION TECHNOLOGIES TOWARDS FLIGHTPATH 2050 [79] [%]	Turbomachine CO2 Calculator [%]	Διαφορά [%]
ΤΡΟΧΟΔΡΟΜΗΣΗ	8	7,62	0,38
ΑΠΟΓΕΙΩΣΗ	6	2,08	3,92
ΑΝΟΔΟΣ	31	28,78	2,12
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΠΤΗΣΗ, ΠΛΕΥΣΗ	47	46,56	0,44
ΚΑΘΟΔΟΣ	6	11,61	-5,61
ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗ	2	3,35	-1,44

6.2.1 Συζήτηση

Στο εδάφιο 5.1 εξηγήθηκε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου μεταβάλλεται από την ώση αλλά και από τις εξωτερικές συνθήκες και την ταχύτητα του αεροσκάφους. Η [Εικόνα 6-1](#) αναφέρεται σε έναν CFM56 που λειτουργεί στο επίπεδο της θάλασσας. Επομένως, η πρόταση ότι ο κινητήρας λειτουργεί κατά τη διάρκεια της πλεύσης στο 40% της ονομαστικής ισχύος του δεν είναι απολύτως σωστή.

Δεδομένα από τη βιβλιογραφία δείχνουν ότι η ειδική κατανάλωση του καυσίμου αυξάνεται κατά τη διάρκεια της πλεύσης σχεδόν δύο φορές (1,8), ενώ η ώση πέφτει περίπου στο 20 % της ονομαστικής. Αυτοί οι υπολογισμοί έχουν γίνει από τους κατασκευαστές για υψόμετρο λειτουργίας 10.000 μέτρων και ταχύτητα ίση με 0,80 Mach.

Στους υπολογισμούς αυτό που έχει σημασία είναι η εύρεση της κατανάλωσης του καυσίμου. Για καλύτερη ακρίβεια επομένως απαιτείται :

- Προσδιορισμός του υψομέτρου στο οποίο θα γίνει η πλεύση (cruising).
- Επιλογή μίας ταχύτητας (μέσης) με την οποία κινείται το αεροσκάφος.
- Χρήση εργαλείων προσομοίωσης ή βιβλιογραφικών πηγών για την εύρεση της σχέσης της κατανάλωσης του καυσίμου με την ώση, στο συγκεκριμένο ύψος και με την ίδια ταχύτητα.

Αν το τρίτο δεν είναι εφικτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύγκριση είτε :

α) δεδομένα για τις εκπομπές ή την κατανάλωση του καυσίμου από διάφορες πηγές του διαδικτύου (π.χ. υπολογιστικό εργαλείο της I.C.A.O.), είτε:



β) τιμές της κατανάλωσης του καυσίμου στη φάση της πλεύσης, και πραγματοποίηση δοκιμών μέχρι να εντοπιστεί ο κατάλληλος συνδυασμός ώσης και ειδικής κατανάλωσης.

Παρακάτω γίνονται επιπλέον σημαντικές παρατηρήσεις για τα αποτελέσματα του πίνακα 6-15 (Πίνακας 6-15):

- Έγινε σύγκριση για διαδρομές αεροσκαφών A320, υποθέτοντας ότι είναι εξοπλισμένα με κινητήρες CFM56. Όμως, ο υπολογιστής εκπομπών I.C.A.O. δε διευκρινίζει αν πράγματι τα αεροσκάφη κινούνται με κινητήρες CFM56, ενώ μάλιστα δίνει ίδιες τιμές και για άλλα αεροσκάφη (άρα για άλλους στροβιλοκινητήρες).
- Έγινε η θεώρηση ότι η άνοδος του αεροσκάφους είναι ιδανική και όχι βηματική. Βηματική χαρακτηρίζεται η άνοδος που συνοδεύεται από περιόδους σταθερής οριζόντιας πτήσης, ώστε το αεροσκάφος να ανεβαίνει σε «σκαλοπάτια».
- Οι υπολογισμοί του πίνακα 6-15 (Πίνακας 6-15) έχουν γίνει για μία τυπική καμπύλη λειτουργίας ενός CFM56 κινητήρα, χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψιν καιρικές συνθήκες (π.χ. χειμώνας, καλοκαίρι, βροχή) ή το διαφορετικό υψόμετρο των αεροδρομίων. Επειδή, βέβαια, οι ανθρακικές εκπομπές είναι περισσότερες κατά τη διάρκεια της οριζόντιας πλεύσης (cruising), όπου το αεροσκάφος πλέον είναι στη κορυφή της τροπόσφαιρας, οι μεταβολές αυτές (στη πίεση και θερμοκρασία εισόδου, για παράδειγμα) μπορούν να αμεληθούν.
- Οι χρόνοι ανάβασης και κατάβασης προσαρμόστηκαν ανάλογα με το ύψος της πτήσης του αεροσκάφους. Γίνεται η υπόθεση ότι το αεροσκάφος κινείται με έναν μέσο αριθμό Mach (ο οποίος δεν χρειάζεται να υπολογιστεί), υπό σταθερή γωνία 6 μοιρών (ανάβαση) ή 3 μοιρών (κατάβαση) και στη συνέχεια αυξομειώνεται η χρονική διάρκεια ανάβασης και κατάβασης, διαμορφώνοντας το τελικό αποτέλεσμα σύμφωνα με το ύψος. Εάν θεωρηθεί ότι ένα αεροσκάφος έχει έναν σταθερό και δεδομένο βέλτιστο ρυθμό ανάβασης, τότε η ανάβαση (και η κάθοδος) διαρκούν λιγότερο αν το ύψος της οριζόντιας πλεύσης μικρύνει. Το ύψος που αντιστοιχεί στην εμβέλεια κάθε αεροσκάφους, προκύπτει από το συνολικό μήκος του C.C.D. κύκλου του. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος παρέχει ένα υπολογιστικό εργαλείο⁵³ το οποίο αντιστοιχίζει το μήκος C.C.D. ενός αεροσκάφους με το σύνηθες ύψος πτήσης [80] (Εικόνα 6-6).

⁵³ Πρόκειται για ένα αρχείο Microsoft Excel. Πληροφορίες για το Excel υπάρχουν στο κεφάλαιο 14.1.

Αircraft Type	A320
Market for a base (2019)	237,90
Market for a base (2020)	232,54
Market for a base (2021)	224,21
Market for a base (2022)	204,21
Market for a base (2023)	187,00
Market for a base (2024)	170,00
Market for a base (2025)	150,00
Market for a base (2026)	130,00
Market for a base (2027)	110,00
Market for a base (2028)	90,00
Market for a base (2029)	70,00
Market for a base (2030)	50,00
Market for a base (2031)	30,00
Market for a base (2032)	10,00
Market for a base (2033)	0,00
Market for a base (2034)	0,00
Market for a base (2035)	0,00
Market for a base (2036)	0,00
Market for a base (2037)	0,00
Market for a base (2038)	0,00
Market for a base (2039)	0,00
Market for a base (2040)	0,00

Εικόνα 6-6 : Εργαλείο υπολογισμού εκπομπών αεροσκαφών από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος⁵⁴

- Επιπλέον, οι μεταβλητές εισόδου (χρονική διάρκεια κατάβασης – ανάβασης) προσαρμόστηκαν έτσι ώστε τελικά το αεροσκάφος να πραγματοποιεί μία πτήση με ρεαλιστική χρονική διάρκεια. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με αναζήτηση της μέσης χρονικής διάρκειας πτήσεων στο διαδίκτυο από τις αεροπορικές εταιρείες.
- Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency) και τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organisation) το σφάλμα στην εκτίμηση των δεικτών εκπομπής διαφόρων επιβλαβών αερίων έχει μεγάλο εύρος. Συγκεκριμένα, κυμαίνεται από 5-10% για τον κύκλο L.T.O. , ενώ από 15% έως 40% για τον κύκλο C.C.D. [81].

6.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων άλλων κατηγοριών

Η εγκυρότητα των υπολοίπων κατηγοριών θα εξεταστεί σε αυτό το εδάφιο. Η ανάλυση θα είναι πιο συνοπτική, διότι δεν υπάρχει αρκετό υλικό για σύγκριση και αντίθεση.

Η χειροτέρευση του κινητήρα πρέπει κανονικά να ελέγχεται με τη χρήση διαγνωστικών εργαλείων σε πραγματικό περιβάλλον. Ακόμη και διάφορα ηλεκτρονικά εργαλεία πρόβλεψης της χειροτέρευσης που έχουν αναπτυχθεί, απαιτούν πραγματικά δεδομένα για να δώσουν ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στην εργασία ακολουθήθηκε η μέθοδος που προτείνεται από τους Jakovljevic, Mijailovic και Mirosavljevic [30], με μερικές τροποποιήσεις.

Σύμφωνα με την έρευνα τους, οι σχέσεις αυτές είναι ακριβείς για τα αεροσκάφη Airbus A320 (που ωθούνται από κινητήρες CFM56). Από τις περιπτώσεις που μελέτησαν, οι εκπομπές λόγω της χειροτέρευσης του κινητήρα αποτελούν το ποσοστό 1,39 % - 1,69 % των εκπομπών της φυσιολογικής λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα [30]. Με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην εργασία (5.3) και τη χρήση κατάλληλων

⁵⁴ <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1/view> (Τελευταία πρόσβαση : 26/5/2023)



βιβλιογραφικών πηγών (Πίνακας 5-2) το ποσοστό αυτό κυμαίνεται μεταξύ 1,55 % - 1,65 % (Πίνακας 7-12).

Τέλος, για το ανθρακικό αποτύπωμα της απόσυρσης, παρατηρείται μία αναλογία μεταξύ εκείνου του αεροσκάφους και του στροβιλοκινητήρα. Στην έρευνα των Jakovljevic, Mijailovic και Miroslavljivic [30], το αεροσκάφος (μαζί με τους στροβιλοκινητήρες) ζυγίζει 41.244 χιλιόγραμμα. Το ανθρακικό αποτύπωμα της απόσυρσης, για τα σενάρια 75% ανακύκλωσης και 25% υγειονομικής ταφής που ακολουθήθηκαν, είναι μόλις 2 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα. Άρα αναλογικά για μία μάζα 2.337 χιλιόγραμμων, το ανθρακικό αποτύπωμα θα είναι περίπου 0,11 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα.

Στην εργασία αυτή και ακολουθώντας την προαναφερόμενη μεθοδολογία, το ποσό διοξειδίου του άνθρακα που εκτιμάται ότι εκπέμπεται είναι 0,16 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα. Τα μεγέθη έχουν ίδια τάξη μεγέθους, επιβεβαιώνοντας την ευστοχία της μεθόδου.

Τονίζεται, ότι η εργασία των των Jakovljevic, Mijailovic και Miroslavljivic [30] δεν έχει συμπεριλάβει την απαιτούμενη ενέργεια για τη διαδικασία της αποσυρμού. Έχει γίνει η χρήση σχέσεων που αφορούν τη δημιουργία «σκραπ» επιβατικών αυτοκινήτων. Η διαδικασία της ανακύκλωσης των στροβιλοκινητήρων, όμως, απαιτεί τον προσεκτικό διαμελισμό τους. Η παρούσα εργασία συνεκτιμώντας τα παραπάνω, έχει δώσει στις ανθρακικές εκπομπές της απόσυρσης αρκετά υψηλότερη τιμή (0,7 τόνους περίπου). Δε παύει βέβαια η τιμή αυτή να είναι αμελητέα μπροστά στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του στροβιλοκινητήρα, όπως θα φανεί στη συνέχεια (βλέπε εδάφιο 7.7).

6.4 Δοκιμή υπολογισμού ανθρακικού αποτυπώματος ανεμογεννήτριας

Στην ενότητα αυτή γίνεται μία δοκιμή της αναπτυγμένης μεθοδολογίας προς τον υπολογισμό του ανθρακικού αποτυπώματος ενός αιολικού πάρκου. Τα δεδομένα αντλούνται από την εργασία του Μηλιώνη Γ. , στην οποία πραγματοποιείται η ανάλυση κύκλου ζωής ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου ισχύος 216 MW [82].

Το πάρκο έχει συνολικά εξήντα ανεμογεννήτριες, άρα κάθε ανεμογεννήτρια έχει ονομαστική ισχύ 3,6 MW. Η συνολική μάζα, μαζί με τα καλώδια διασύνδεσης που αντιστοιχούν σε μία ανεμογεννήτρια, είναι 1.073 τόνοι περίπου. Η εργασία του Γ. Μηλιώνη δεν περιλαμβάνει πληροφορίες για τις κατεργασίες που πραγματοποιούνται στην ανεμογεννήτρια. Όμως περιλαμβάνει πληροφορίες για τη μεταφορά των ανεμογεννητριών από τη Γερμανία (Siemens) στην Αλεξανδρούπολη.



Πίνακας 6-17 : Υλικά κατασκευής ανεμογεννήτριας

ΤΜΗΜΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	ΥΛΙΚΟ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ [kg CO2eq/kg]	ΜΑΖΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΟΣ / ΥΛΙΚΟΥ [tonnes]	ΠΟΣΟΣΤΟ [%]	ΠΗΓΗ ΓΙΑ ΔΕΙΚΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗΣ
Ρότορας			100	9,32	
	Σίδηρος (Fe)	1,5	23	23	Πίνακας 4-3
	Εποξική Ρητίνη (Epoxy Resin)	6,7	8	8	[83]
	Χάλυβας (A286)	9,2	18	18	Πίνακας 4-4
	Υαλοβάμβακας (Fiberglass)	2,6	51	51	[84]
Άτρακτος			125	11,65	
	Σίδηρος (Fe)	1,5	10	8	Πίνακας 4-3
	Χάλυβας (A286)	9,2	89	71,2	Πίνακας 4-4
	Χρωμιούχος χάλυβας (Inconel 718)	11,3	17	13,6	Πίνακας 4-4
	Χαλκός (Cu)	3,1	5,6	4,48	Πίνακας 4-3
	Αλουμίνιο (Al)	12	2	1,6	Πίνακας 4-3
	Ηλεκτρονικά	10,3	0,5	0,4	[85]
	Λιπαντικό		0,9	0,72	Πίνακας 5-5
Πύργος στήριξης			210	19,58	
	Χάλυβας (A286)	9,2	210	100	Πίνακας 4-4
Μονοπάσσαλη θεμελίωση			400	37,29	
	Χάλυβας (A286)	9,2	400	100	Πίνακας 4-4
Μεταβατικό τμήμα θεμελίωσης			200	18,64	
	Χάλυβας (A286)	9,2	200	100	Πίνακας 4-4
Καλώδια διασύνδεσης			37,7	3,5	
	Αλουμίνιο (Al)	12	16,76	44,47	Πίνακας 4-3
	Χαλκός (Cu)	3,1	2,73	7,26	Πίνακας 4-3
	Πολυαιθυλένιο	1 ή 5	18,2	48,27	[86]

Πηγή : «Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας» (Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Γ. Μηλιώνης)



Πίνακας 6-18 : Μεταφορές εξαρτημάτων ανεμογεννήτριας

Τμήμα	Μάζα [t]	Ρυμουλκό φορτηγό				Φορτηγό πλοίο			
		Από	Προς	Απόσταση [km]	[t km]	Από	Προς	Απόσταση [km]	[t km]
Ρότορας	100	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	370	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6.470	647.000
Άτρακτος	125	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	462,5	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6.470	808.750
Πύργος στήριξης	210	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	777	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6.470	135.8700
Μονοπάσσαλη θεμελίωση	400	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	1.480	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6470	2.588.000
Μεταβατικό τμήμα	200	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	740	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6.470	1.294.000
Ανταλλακτικά	21,7	Siemens Gamesa	Niedersachsen Ports	3,7	80,5	Niedersachsen Ports	Λιμάνι Αλεξανδρούπολης	6.470	140.723
Συνολικά					3.910				6.837.173

Πηγή : «Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας. Ανάλυση Κύκλου Ζωής υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης, συνολικής ισχύος 216 MW» (Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Γ. Μηλιώνης)

Οι ακρίβεια των εκπομπών των μεταφορών εξαρτάται από τον συντελεστή ανθρακικών εκπομπών που θα επιλεγεί για τη θαλάσσια μεταφορά των εξαρτημάτων. Η εργασία του Γ. Μηλιώνη δεν αναφέρει ποιους συντελεστές εκπομπής χρησιμοποίησε. Αν χρησιμοποιηθεί φορτηγό πλοίο μεγάλων διαστάσεων, λόγω του εξαιρετικά μεγάλου ταξιδιού που καλείται να πραγματοποιήσει, τότε ο συντελεστής εκπομπής είναι 0,0124 χιλιόγραμμα ανά τόνο και χιλιόμετρα διαδρομής [87] . Τότε το αποτέλεσμα της παρούσης εργασίας είναι περίπου 84 τόνοι ισοδύναμου άνθρακα, ενώ η εργασία του Γ. Μηλιώνη δίνει το ίδιο αποτέλεσμα ως 76 τόνους. Δηλαδή εδώ η διαφορά στις δύο μετρήσεις είναι περίπου 10%.

Οι εκπομπές λόγω παρασκευής και εξόρυξης των υλικών εκτιμάται ότι αποτελεί περίπου το 77% των εκπομπών του συνολικού ανθρακικού αποτυπώματος. Αυτό δηλαδή αντιστοιχεί σε 1.681 τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για μία ανεμογεννήτρια. Η μεθοδολογία της παρούσης εργασίας υπολογίζει την ίδια ποσότητα ως 1.188 τόνους άνθρακα. Δηλαδή υπάρχει μία διαφορά 29%. Ταυτόχρονα, η εργασία του Γ. Μηλιώνη υποστηρίζει ότι τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις εκπομπές της παρασκευής υλικών έχει ο χάλυβας, σε ποσοστό 56,7 %. Η παρούσα εργασία βρίσκει το ίδιο ποσοστό ίσο με 55,85%. Δηλαδή υπάρχει μία διαφορά μόλις 2% περίπου.

Οι εκπομπές λόγω των κατεργασιών είναι περίπου 3.000 ισοδύναμοι τόνοι διοξειδίου του άνθρακα, σύμφωνα με τον Γ. Μηλιώνη. Δεν παρέχονται τα λεπτομερή δεδομένα για τις κατεργασίες που πραγματοποιούνται στα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας ώστε να προκύψει η τιμή αυτή.



Στην παρούσα εργασία, η χώρα κατασκευής είναι η Γερμανία (Siemens) και η απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία μίας ανεμογεννήτριας είναι 9.873 MWh. Η τιμή που προκύπτει με επιλογή τυπικών διεργασιών (χύτευση, machining, φρεζάρισμα, τρισδιάστατη εκτύπωση, μέθοδος μεταφοράς ρητίνης) και θεωρώντας ότι η ενέργεια προέρχεται κατά 90% από το ηλεκτρικό δίκτυο, είναι 4.081 ισοδύναμοι τόνοι διοξειδίου του άνθρακα. Η διαφορά τότε είναι 33%. Για βελτίωση, γίνεται η θεώρηση ότι η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται σε ποσοστό 100% από το ηλεκτρικό δίκτυο. Τότε οι ανθρακικές εκπομπές υπολογίζονται ως 3.678 τόνοι, έχοντας τώρα διαφορά 23% από τους υπολογισμούς του Γ. Μηλιώνη.

Όσον αφορά τις ανθρακικές εκπομπές λόγω απόσυρσης της ανεμογεννήτριας υπάρχει μεγάλη διαφορά από τις τιμές που δίνει η μεθοδολογία σε σχέση με εκείνες της εργασίας του Γ. Μηλιώνη. Για 90% ανακύκλωση των μετάλλων (10% στη χωματερή) και 50% ανακύκλωση των σύνθετων υλικών (50% αποτέφρωση), η εργασία του δίνει τιμή περίπου 106 ισοδύναμους τόνους διοξειδίου του άνθρακα. Η παρούσα εργασία και η μεθοδολογία της ορίζουν τη τιμή αυτή ως 565 ισοδύναμους τόνους άνθρακα (διαφορά 465%).

Για βελτίωση των αποτελεσμάτων εξετάζεται η απαιτούμενη ενέργεια για την απόσυρση μίας ανεμογεννήτριας. Σύμφωνα με τον Γ. Μηλιώνη αυτή ανέρχεται στις 413.114 kWh. Διαμορφώνοντας, τότε, κατάλληλα την ενέργεια που απαιτείται για την αποσυναρμολόγηση της ανεμογεννήτριας, η μεθοδολογία της παρούσης εργασίας δίνει τιμή 127 ισοδύναμους τόνου διοξειδίου του άνθρακα. Τότε η διαφορά πέφτει στο 27%.

Για σύγκριση, δίνονται παρακάτω τα διαθέσιμα στοιχεία από την εργασία της ανάλυσης κύκλου ζωής της ανεμογεννήτριας και οι υπολογισμοί της μεθοδολογίας της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 6-19 : Εκτίμηση ανθρακικού αποτυπώματος ανεμογεννήτριας

ΦΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	Γ. ΜΗΛΙΩΝΗΣ (ECOSIM)	TURBOMACHINE CO2 CALCULATOR	ΔΙΑΦΟΡΑ [%]
ΕΞΟΡΥΞΗ-ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΛΙΚΩΝ (t)	1.681	1.188	-29
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ (t)	3.000	3.678	+23
ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ (t)	76	84	+10
ΑΠΟΣΥΡΣΗ (t)	106	127	+27

Από τα παραπάνω συμπεραίνονται τα ακόλουθα · αρχικά, τα αποτελέσματα της εξόρυξης και παραγωγής υλικών έχουν μεγάλη ομοιότητα επειδή χρησιμοποιήθηκαν, και στις δύο περιπτώσεις, συντελεστές εκπομπής από τη βάση δεδομένων Ecosim (2.2.3). Τα υπόλοιπα στάδια εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ενέργεια που θεωρείται ότι καταναλώνεται



για κάθε φάση του κύκλου ζωής. Το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε, ακόμη και σε περιπτώσεις όπως στις μεταφορές, που οι τιμές ξέφευγαν από τις αναμενόμενες, δίνει αριθμητικά αποτελέσματα στην κατάλληλη τάξη μεγέθους (δεκάδες χιλιάδες, εκατομμύρια κ.λπ.). Αν είναι γνωστές οι ενεργειακές συνθήκες και οι κατανομές των υλικών και της μάζας, τότε τα αποτελέσματα μπορούν να είναι πολύ ακριβή. Συνεπώς, η μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί μπορεί να ανταποκριθεί επαρκώς στην πραγματικότητα και να αξιοποιηθεί και για τον υπολογισμό του ανθρακικού αποτυπώματος και άλλων προϊόντων εκτός από τους στροβιλοκινητήρες.

6.5 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάστηκε η εγκυρότητα και η ακρίβεια της υπολογιστικής μεθόδου. Για την ικανότητα υποστήριξης πολλών διαφορετικών μελετών, δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό εργαλείο στο Excel, το Turbomachine CO₂ Calculator, προγραμματισμένο σε κώδικα Visual Basic for Applications. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δεν είναι εφικτή να γίνει με πραγματικά μετρητικές διατάξεις σε έναν στροβιλοκινητήρα, επομένως αξιοποιήθηκαν μελέτες περιπτώσεων (case studies) ανθρακικού αποτυπώματος, εργαλεία προσομοίωσης και υπολογιστές ανθρακικού αποτυπώματος.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ακριβής στη μελέτη στροβιλοκινητήρων. Για το στάδιο αυτό απαιτήθηκε να τροποποιηθεί η κατανομή της μάζας του κινητήρα ώστε να συμπεριληφθεί και το κομμάτι του ακροφυσίου. Για τις φάσεις της δημιουργίας υλικών και της κατεργασίας-συναρμολόγησης του στροβιλοκινητήρα, το σφάλμα είναι μικρότερο του 5%, σύμφωνα με αντίστοιχες μελέτες.

Στην περίπτωση της λειτουργίας, απαιτήθηκαν να γίνουν δοκιμές και σχετική έρευνα ώστε να μπορέσουν να προσομοιωθούν όσο καλύτερα και απλά γίνεται, οι μεταβολές στο υψόμετρο, στην ώση, στην κατανάλωση του καυσίμου και στη χρονική διάρκεια της λειτουργίας. Απαιτήθηκαν επίσης δεδομένα για τους προορισμούς ενός αεροσκάφους. Το σφάλμα βρίσκεται εντός του 10% για τη φάση αυτή, σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Τέλος, για να εξεταστεί η χρησιμότητα του υπολογιστικού εργαλείου σε άλλες περιπτώσεις, μελετήθηκε η περίπτωση κατασκευής, μεταφοράς και απόσυρσης μίας ανεμογεννήτριας. Εδώ το σφάλμα είναι μεγαλύτερο αλλά μικρότερο του 30%, σύμφωνα με τη μελέτη που αξιοποιήθηκε για τη σύγκριση.

Τα συμπεράσματα των παραπάνω είναι αρχικά ότι το υπολογιστικό εργαλείο Turbomachine CO₂ έχει δυνατότητες ως ένα εργαλείο υπολογισμού του ανθρακικού αποτυπώματος διάφορων προϊόντων. Η ακρίβεια του εξαρτάται από τις διαθέσιμες πληροφορίες και τις μεταβλητές εισαγωγής, τους δείκτες εκπομπής που χρησιμοποιούνται δηλαδή. Η ακρίβεια αυτή επίσης, αυξάνεται όταν χρησιμοποιείται ως ένα εργαλείο υπολογισμού του ανθρακικού αποτυπώματος στροβιλοκινητήρων, όπως άλλωστε προορίζεται και ακολουθώντας τη μεθοδολογία των προηγούμενων κεφαλαίων.



Η εκτίμηση του ανθρακικού αποτυπώματος είναι μία δύσκολη διαδικασία η οποία με τη σειρά της βασίζεται στην εμπιστοσύνη που έχει ο μελετητής για τις μετρήσεις που λαμβάνει και αξιοποιεί. Γενικά, κάθε μελέτη ανθρακικού αποτυπώματος περιλαμβάνει μία δόση αβεβαιότητας στα τελικά αποτελέσματα. Εντούτοις, η ανάλυση του CFM56 αποδείχθηκε συμβατή με τα ευρήματα των υπολοίπων ερευνητών, οπότε και η διαδικασία προσδιορισμού του ανθρακικού αποτυπώματος μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής.



7. Εφαρμογή σε συγκεκριμένους αεροπορικούς κινητήρες

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η υπολογιστική μέθοδος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας μπορεί να δώσει μία ικανοποιητική εικόνα για το ανθρακικό αποτύπωμα του κύκλου ζωής ενός στροβιλοκινητήρα. Όσα περισσότερα δεδομένα είναι γνωστά για έναν στροβιλοκινητήρα (κατανομή μάζας, υλικά, κατεργασίες, χώροι κατασκευής, αεροσκάφος, αριθμός πτήσεων, αριθμός επισκευών), τόσο καλύτερα εκτιμάται το πραγματικό του μερίδιο στη κλιματική αλλαγή.

Στη διάρκεια της εργασίας αναπτύχθηκε υπολογιστικό εργαλείο (Turbomachine CO₂ Calculator) μέσω του προγράμματος Microsoft Excel, ώστε να είναι πιο εύκολοι και πρακτικοί οι υπολογισμοί. Το υπολογιστικό εργαλείο παρουσιάζεται στο παράρτημα III (14) εκτενώς. Με τη χρήση του, μπορούν να πραγματοποιηθούν μελέτες περίπτωσης (case studies) για να συγκριθούν οι ανθρακικές εκπομπές βάσει τεχνολογίας, υλικών ή καυσίμων.

Ο CFM56 είναι από τους πιο γνωστούς στροβιλοκινητήρες της αεροπορίας, επειδή προωθεί ένα μεγάλο ποσοστό των στόλων των Ευρωπαϊκών αεροδρομίων. Σύμφωνα με τα στοιχεία της CFM International, 33.000 στροβιλοκινητήρες έχουν παραδοθεί για πτήση, ενώ έχουν συνολικά συμπληρώσει ένα δισεκατομμύριο ώρες λειτουργίας [88].

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται μια εικόνα για το αποτύπωμα σύγχρονων κινητήρων και μάλιστα υπό την οπτική της σύγκρισης με ανερχόμενες τεχνολογίες καύσης υδρογόνου. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται δε θα πρέπει σε καμία περίπτωση να εκληφθούν ως συγκριτικά, δεδομένου ότι για όλους τους κινητήρες οι εκτιμήσεις βασίζονται σε σειρά δεδομένων που χαρακτηρίζονται από σημαντική αβεβαιότητα. Έτσι, αναδεικνύονται τα προτερήματα του υπολογιστικού εργαλείου «Turbomachine CO₂ Calculator» και πιστοποιείται η εγκυρότητα της μεθοδολογίας προσδιορισμού των ανθρακικών εκπομπών.

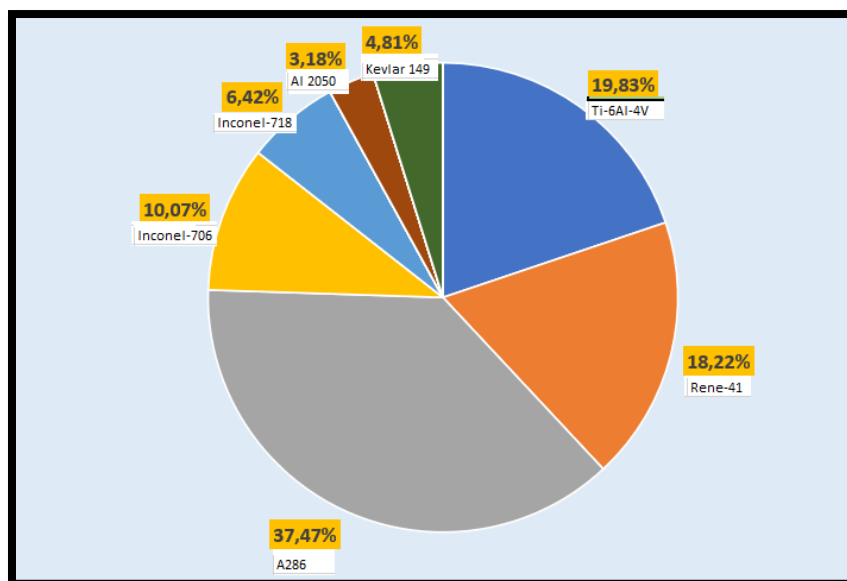
Στην αρχή του κεφαλαίου, το ανθρακικό αποτύπωμα του CFM56-5A περιγράφεται διεξοδικά και αναλυτικά. Στα επόμενα εδάφια, αναφέρεται η περίπτωση του

στροβιλοκινητήρα, αναγράφονται οι μεταβλητές εισαγωγής και παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα. Ως μεταβλητές εισαγωγής ορίζονται όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά τα οποία θα εισαχθούν στο «Turbomachine CO₂ Calculator» και διαφοροποιούν κάθε στροβιλοκινητήρα από την περίπτωση του CFM56-5A.

7.1 Υλικά και κατανομή μάζας του στροβιλοκινητήρα CFM56-5A

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στον CFM56-5A λαμβάνονται από τον πίνακα 4-2 (Πίνακας 4-2), ενώ ο καταμερισμός τους στα εξαρτήματα γίνεται σύμφωνα με τα δεδομένα της ύπο δημοσίευσης διδακτορικής εργασίας του Κόλια Ι. (Πίνακας 3-4). Από την ίδια εργασία λαμβάνεται η κατανομή της μάζας του κινητήρα (Πίνακας 3-4). Η (ξηρή) του μάζα είναι γνωστή από πολλές έντυπες και διαδικτυακές πηγές, και λαμβάνεται ίση με 2.337 χιλιόγραμμα.

Ακολουθώντας τη διαδικασία του εδαφίου 4.1.1 και χρησιμοποιώντας το Turbomachine CO₂ Calculator (14.2.4), προκύπτουν τα ακόλουθα:

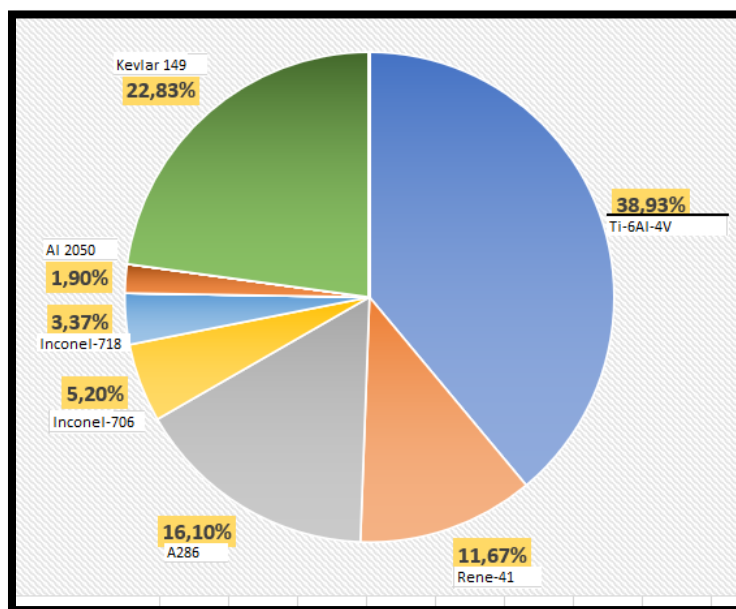


Εικόνα 7-1 : Ποσοστό κάθε υλικού στον CFM56-5A

Στην Εικόνα 7-1 φαίνεται το ποσοστό που καταλαμβάνει κάθε κράμα ή σύνθετο υλικό στη συνολική (ξηρή) μάζα του CFM56-5A. Το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνει ο χάλυβας A286, μιας και χρησιμοποιείται σε αρκετά παρελκόμενα, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων. Την αμέσως επόμενη θέση λαμβάνει το κράμα τιτανίου Ti-6Al-4V, από το οποίο αποτελούνται τα πτερύγια του ανεμιστήρα. Προφανώς αυτά έχουν μεγάλη μάζα και σύμφωνα με τους υπολογισμούς, καταλαμβάνουν το 11,34 % της συνολικής μάζας (περίπου 265 χιλιόγραμμα). Τη τρίτη θέση λαμβάνει το κράμα νικελίου Rene-41, από το οποίο αποτελούνται εξαρτήματα τα οποία πρέπει να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και βρίσκονται σε πολλά μέρη του κινητήρα (θάλαμος καύσης, πτερύγια στροβίλων).

Ενδιαφέρουσα είναι η **Εικόνα 7-2**, η οποία δείχνει τις ανθρακικές εκπομπές που αντιστοιχούν στην εξόρυξη ή δημιουργία κάθε υλικού του στροβιλοκινητήρα. Αν και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό μάζας στον κινητήρα, ο χάλυβας A286 έχει σχετικά μικρό συντελεστή εκπομπής άνθρακα και λαμβάνει τη τρίτη θέση στο ανθρακικό αποτύπωμα. Αναμενόμενα, τότε, λόγω του υψηλού συντελεστή (ή δείκτη) εκπομπής του τιτανίου (**Πίνακας 4-3**), περνάει στη πρώτη θέση των εκπομπών το κράμα Ti-6Al-4V.

Η σύνθεση, όμως, του υλικού Kevlar 149, σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα (**Πίνακας 4-5**), ξεπερνά ακόμη και τις διαδικασίες εξόρυξης των κραμάτων. Ενώ χρησιμοποιείται ελάχιστα και για μόλις ένα είδος εξαρτήματος του κινητήρα (**Εικόνα 7-1**), προκαλεί το 22,83 % των εκπομπών κατά τη δημιουργία των υλικών. Αυτό δείχνει ότι η δημιουργία σύνθετων υλικών είναι μια πολύ ενεργειακά εξαντλητική διαδικασία. Τα δεδομένα αυτά, βεβαίως, μπορούν να αλλάξουν, εφόσον ακολουθηθούν πιο οικολογικές πρακτικές κατά την παρασκευή σύνθετων υλικών.



Εικόνα 7-2 : Ποσοστό ανθρακικών εκπομπών λόγω εξόρυξης ή σύνθεσης υλικού

Στο σενάριο αυτό αμελούνται οι άδηλες εκπομπές που μπορεί να οφείλονται σε άλλα αέρια εκτός του διοξειδίου του άνθρακα (π.χ. CH₄), και γίνεται εστίαση μόνο στις εκπομπές εξαιτίας ενεργειακής δαπάνης. Έστω ότι χρησιμοποιούνται μόνο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή τεχνικές απαγωγής άνθρακα (12.3.2) για τη σύνθεση των τεχνικών υλικών. Τότε αποτρέπεται η εκπομπή περίπου 2,9 (ισοδύναμων) τόνων διοξειδίου του άνθρακα ανά κινητήρα. Το μέγεθος αυτό αντιστοιχεί στις εκπομπές οδήγησης ενός αυτοκινήτου για οδήγηση 12.000 χιλιομέτρων .

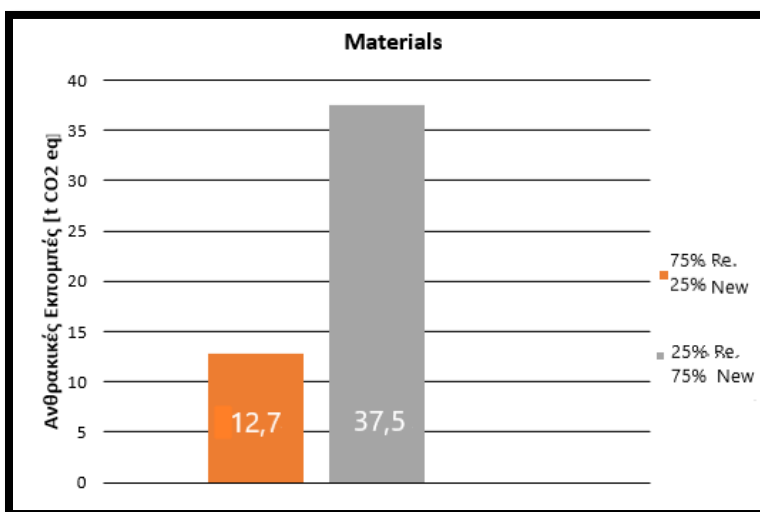
Οι υπολογισμοί έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση δεικτών εκπομπής άνθρακα και έτσι πιθανώς να υπάρχουν αποκλίσεις καθώς η τεχνολογία βελτιώνεται και τα δεδομένα ανανεώνονται. Η διακύμανση λόγω της αβεβαιότητας της ακρίβειας των δεικτών, βέβαια,

λήφθηκε υπόψιν στους υπολογισμούς. Έτσι μπορούν να γίνουν δεκτά τρία πιθανά σενάρια για τις εκπομπές των υλικών:

Πίνακας 7-1 : Μέση τιμή και άκρα ανθρακικών εκπομπών υλικών

	ΑΝΘΡΑΚΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ (t CO ₂)
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	12,7
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΔΥΝΑΤΗ ΤΙΜΗ	11,7
ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΤΗ ΤΙΜΗ	14

Για όλα τα παραπάνω έχει γίνει η υπόθεση ότι κατά 75% κάθε υλικό του στροβιλοκινητήρα προέρχεται από μεθόδους ανακύκλωσης, ενώ το 25% είναι καθαρά παρθένο. Αν τα ποσοστά αυτά αντιστραφούν, τότε προκύπτει το ακόλουθο :



Εικόνα 7-3 : Σύγκριση χρήσης νέων υλικών σε σχέση με ανακυκλωμένα

Φαίνεται ότι η ανακύκλωση των υλικών μειώνει σημαντικά το ολικό ανθρακικό αποτύπωμα και ειδικότερα οι εκπομπές παρασκευής των υλικών μειώνονται τουλάχιστον τρεις φορές. Ανακύκλωση σε ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό (π.χ. 90%) αναμένεται να μειώσει περισσότερο τις εκπομπές της παρασκευής των υλικών.

7.2 Ανθρακικό αποτύπωμα κατεργασιών του CFM56-5A

Στο στάδιο αυτό η μελέτη στράφηκε στην ενεργειακή κατανάλωση και στις ανθρακικές εκπομπές που της αντιστοιχούν. Έτσι και στο Turbomachine CO₂ Calculator (14.2.5) οι υπολογισμοί στηρίζονται στη χώρα προέλευσης κάθε εξαρτήματος και στο ενεργειακό μίγμα κάθε χώρας.

Οι πηγές για τις μεταβλητές εισαγωγής περιέχονται στο εδάφιο 4.2 (Πίνακας 4-8,



Πίνακας 4-9, Πίνακας 4-10, Πίνακας 4-11). Έγινε η θεώρηση ότι στις ενεργειακές ανάγκες το δίκτυο ενέργειας συμμετέχει κατά 90%, ενώ άλλες εφεδρικές πηγές (Μ.Ε.Κ. Diesel συγκεκριμένα) χρησιμοποιήθηκαν για το υπόλοιπο 10%.

Οι περιοχές στις οποίες κατασκευάζεται κάθε κομμάτι του στροβιλοκινητήρα βρίσκονται στον πίνακα 4-13 (Πίνακας 4-13), ενώ η τελική τοποθεσία συναρμολόγησης βρίσκεται στη Γαλλία (Πίνακας 4-14). Η κατεργασία που υφίσταται κάθε κομμάτι (και το ποσοστό της) παρουσιάζεται στους επόμενους πίνακες (Πίνακας 7-2).

Πίνακας 7-2 : Κατεργασίες ανεμιστήρα και συμπιεστή χαμηλής πίεσης (L.P.T.) .

ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 1	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 2	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 3	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)
Rotor Blades	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
IGVS	Χύτευση BOF - BF	60	Machining	30	Gas Tungsten Arc Welding	10
OGVS	Injection Molding (Υδραυλική)	60	Machining	30	Gas Tungsten Arc Welding	10
Disk	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Hardware	Χύτευση BOF - BF	40	Machining	40	Φρεζάρισμα (CNC)	20
Casings	Χύτευση BOF - BF	60	Machining	30	Gas Tungsten Arc Welding	10
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (LPT)						
Rotor Blades	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Stator Blades	Χύτευση BOF - BF	60	Machining	40		
IGVS	Injection Molding (Υδραυλική)	70	Machining	30		
Disks	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Hardware	Χύτευση BOF - BF	40	Machining	40	Φρεζάρισμα (CNC)	20
Casings	Χύτευση BOF - BF	60	Θερμή Έλαση Χάλυβα	30	Machining	10

Πίνακας 7-3 : Κατεργασίες συμπιεστή και στροβίλου υψηλής πίεσης, θαλάμου καύσης



ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (HPC)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 1	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 2	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 3	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)
Rotor Blades (1)	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Stator Blades	Χύτευση BOF - BF	60	Machining	40		
IGVS	Injection Molding (Υδραυλική)	70	Machining	30		
Disks (1)	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Hardware	Χύτευση BOF - BF	40	Machining	40	Φρεζάρισμα (CNC)	20
Casings (1)	Χύτευση BOF - BF	60	Θερμή Έλαση Χάλυβα	30	Machining	10
Rotor Blades (2)	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Disks (2)	Σφυρηλάτηση	70	Machining	30	Φρεζάρισμα (CNC)	
Casings (2)	Χύτευση BOF - BF	60	Θερμή Έλαση Χάλυβα	30	Machining	10
ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ (COMBUSTION CHAMBER)						
Casings	Σφυρηλάτηση	70	Machining	25	Gas Tungsten Arc Welding	5
Burners	Χύτευση BOF - BF	60	Machining	30	Gas Tungsten Arc Welding	10
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (HPT)						
Rotor Blades	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Stator Blades	Χύτευση BOF - BF	60	Machining	40		
IGVS		70	Machining	30		
Disks	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Hardware	Χύτευση BOF - BF	40	Machining	40	Φρεζάρισμα (CNC)	20



Πίνακας 7-4 : Κατεργασίες στροβίλου χαμηλής πίεσης, δομικών στοιχείων και αξεσουάρ

ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (LPT)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 1	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 2	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 3	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)
Rotor Blades	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Stator Blades	Χύτευση BOF - BF	60	Machining	40		
IGVS		70	Machining	30		
Disks	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Hardware	Χύτευση BOF - BF	40	Machining	40	Φρεζάρισμα (CNC)	20
Casings	Χύτευση BOF - BF	60	Θερμή Έλαση Χάλυβα	30	Machining	10
STRUCTURAL COMPONENTS						
Shaft 1	Σφυρηλάτηση	70	Machining	20	Φρεζάρισμα (CNC)	10
Shaft 2	Σφυρηλάτηση	60	Machining	40		
Other	Χύτευση BOF - BF	70	Machining	30		
ACCESSORIES						
	Θερμή Έλαση Χάλυβα	50	Shielded Metal Arc Welding	40	Machining	10
	Χύτευση BOF - BF	50	Shielded Metal Arc Welding	50		

Σημειώνεται εδώ ότι το σημαντικό πλεονέκτημα του Turbomachine CO₂ Calculator είναι η δυνατότητα αλλαγής των παραπάνω δεδομένων μέσω επιλογής από λίστα (drop-down list). Άρα, αν τα δεδομένα αλλάξουν ή γνωστοποιηθούν με ακρίβεια οι κατεργασίες που υφίστανται τα τμήματα του CFM56-5A, είναι εύκολη η γρήγορη ανανέωση των δεδομένων. Παρακάτω (Πίνακας 7-5) φαίνεται η απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται για τη διαδικασία των κατεργασιών και της συναρμολόγησης :

Πίνακας 7-5 : Απαιτούμενη ενέργεια κατεργασιών - συναρμολόγησης

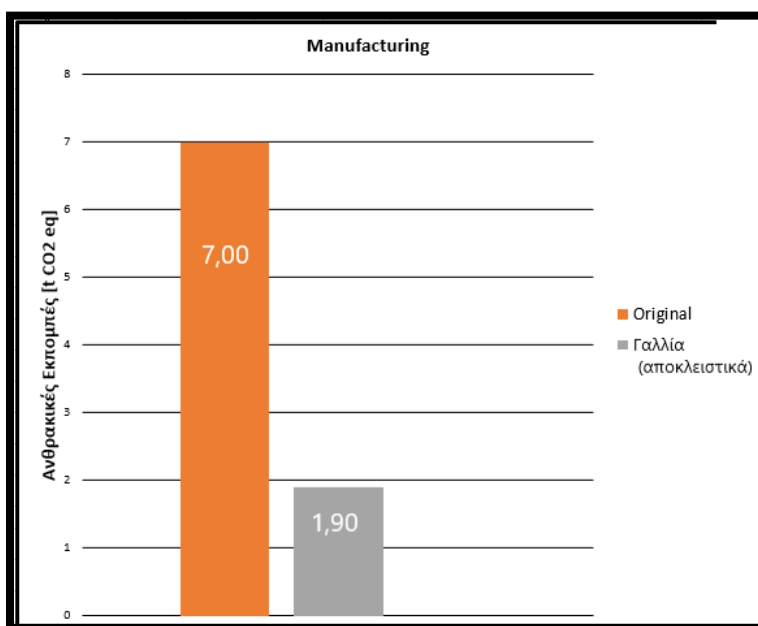
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MJ)	149.096
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ (MJ)	97.682
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (MJ)	51.414

Με όλα τα παραπάνω δεδομένα και εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία του εδαφίου 4.2 προκύπτει το ανθρακικό αποτύπωμα των κατεργασιών και της συναρμολόγησης του κινητήρα.

Πίνακας 7-6 : Ανθρακικές εκπομπές κατεργασιών-συναρμολόγησης

ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ (t CO₂)	7,00
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ (t CO₂)	5,83
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (t CO₂)	1,17

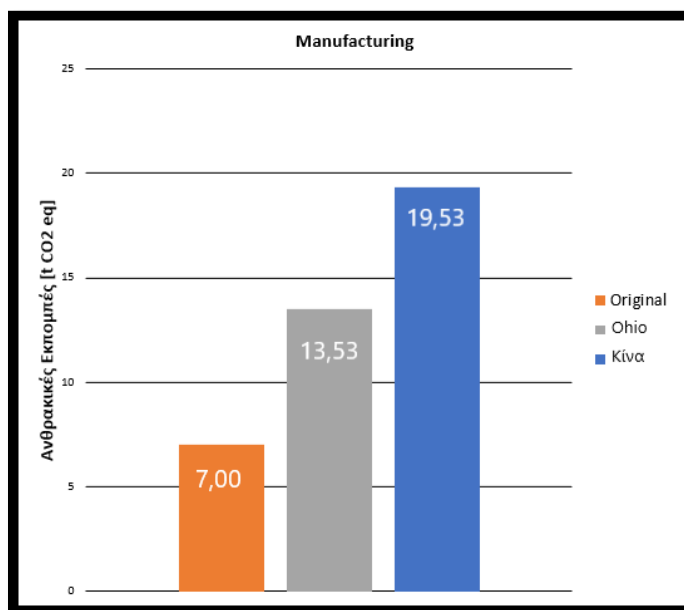
Οι εκπομπές στο στάδιο αυτό εξαρτώνται κυρίως από το ενεργειακό μίγμα της χώρας προέλευσης του κάθε εξαρτήματος. Οι συνολικές εκπομπές είναι μικρότερες των εκπομπών εξόρυξης και δημιουργίας υλικών, καθώς οι περισσότερες διεργασίες πραγματοποιούνται στη Γαλλία. Η Γαλλία παραλαμβάνει την ενέργεια της σε ποσοστό 70% από σταθμούς πυρηνικής τεχνολογίας. Αν ο κινητήρας κατασκευαζόταν εξ ολοκλήρου στη Γαλλία, τότε τα ποσά ανθρακικού αποτυπώματος θα ήταν ακόμη λιγότερα:

**Εικόνα 7-4 : Υπόθεση κατασκευής στροβιλοκινητήρα μόνο στη Γαλλία**

Παρατηρείται μία σημαντική διαφορά 5,1 τόνων (ισοδύναμου) διοξειδίου του άνθρακα. Είναι εμφανές ότι ένα ισορροπημένο μίγμα μη-ανθρακούχων (carbon free) τεχνολογιών (υδρογόνο, πυρηνική τεχνολογία) και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τις ανθρακικές εκπομπές.

Για μεγαλύτερη έμφαση, στην **Εικόνα 7-5** γίνεται σύγκριση των εκπομπών για την υπόθεση αποκλειστικής κατασκευής στη πολιτεία Ohio (εκεί δημιουργούνται οι CFM-56 για την αμερικάνικη αγορά) και στην Κίνα. Η Κίνα μαζί με τις Ηνωμένες Πολιτείες είναι πρώτες στις ανθρακικές εκπομπές (**Πίνακας 12-2**), διότι δεν έχουν, έως τώρα τουλάχιστον, εντάξει επαρκώς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο ενεργειακό τους μίγμα. Αυτό αποτυπώνεται και στα αποτελέσματα του υπολογισμού. Όπως φαίνεται, οι εκπομπές των

κατεργασιών φτάνουν (ή ακόμη ξεπερνούν) το χειρότερο σενάριο για τη δημιουργία των υλικών (Εικόνα 7-5, Πίνακας 7-1).



Εικόνα 7-5 : Σύγκριση εκπομπών κατασκευής στις Η.Π.Α. και στην Κίνα

Για περισσότερες πληροφορίες, σχετικές με την ενέργεια και την κλιματική αλλαγή, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο παράρτημα Ι (12.3.3).

7.3 Ανθρακικό αποτύπωμα μεταφορών CFM56-5A

Για τον προσδιορισμό των ανθρακικών εκπομπών των μεταφορών, απαιτούνται οι χώροι αναχώρησης και άφιξης των εξαρτημάτων (Πίνακας 4-13), όπως και πληροφορίες για τα μέσα μεταφοράς που αξιοποιούνται. Γίνεται η υπόθεση ότι για τις επίγειες μεταφορές χρησιμοποιούνται φορτηγά μεταφορών. Ο κινητήρας και κάθε εξάρτημα του θεωρούνται ότι είναι προϊόντα, άρα οι εκπομπές εξαρτώνται από τη μεταφερόμενη μάζα.

Οι μεταφορές των εξαρτημάτων δημιουργούν ένα αποτύπωμα 2 τόνων διοξειδίου του άνθρακα περίπου. Αν ένα εξάρτημα δεν αναγκαστεί να μετακινηθεί αεροπορικά, το αποτύπωμα της μεταφοράς του είναι πολύ μικρό. Το συγκρότημα του ανεμιστήρα δε φεύγει από τη Γαλλία και η μεταφορά οδικώς του δίνει ανθρακικό αποτύπωμα μόλις 58 χιλιόγραμμα άνθρακα. Στον αντίποδα, ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης που εισάγεται στη Γαλλία από τις Ηνωμένες Πολιτείες, δίνει ένα ανθρακικό αποτύπωμα 817,25 χιλιόγραμμων. Αν και δεν επιχειρήθηκε, λόγω έλλειψης δεδομένων για τα δρομολόγια, περαιτέρω μείωση εκπομπών επιτυγχάνεται με τη χρήση των σιδηροδρομικών γραμμών.

Οι εκπομπές στο στάδιο αυτό, όπως αναφέρθηκε, εξαρτώνται από τη μάζα. Αν γίνει η υπόθεση ότι ο κινητήρας που μεταφέρεται είναι ο CFM56-5C (μάζας 2.644,4 kg) και ότι η κατανομή της μάζας είναι η ίδια, τότε οι εκπομπές αυξάνονται σε 2,3 τόνους άνθρακα.



Επισημαίνεται, ξανά, ότι η χρήση συντελεστών εκπομπής ενδέχεται να περιλαμβάνει σφάλμα από 5-40% [81]. Στην περίπτωση αυτή, το σφάλμα 40% δεν αλλάζει κατά πολύ τη γενική εικόνα που έχει δημιουργηθεί για τις μεταφορές (για 2 τόνους δημιουργεί εύρος 1,2 – 2,8). Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, οι 2 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα είναι σχεδόν αμελητέοι μπροστά στις εκπομπές των άλλων φάσεων του κύκλου ζωής.

7.4 Ανθρακικό αποτύπωμα λειτουργίας CFM56-5A

Το στάδιο της λειτουργίας είναι το πιο καθοριστικό για τον κύκλο ζωής του κινητήρα. Οι μεταβλητές εισόδου είναι πολυάριθμες:

- Αριθμός πτήσεων
- Αναχώρηση και προορισμός κάθε πτήσης
- Στοιχεία για κάθε φάση της πτήσης (υψόμετρο, ταχύτητα, ώση)

Τα αποτελέσματα εξαρτώνται ολοφάνερα από το προφίλ των αποστολών για τις οποίες προορίζεται ο στροβιλοκινητήρας. Για αυτό τον λόγο, για κάθε μέτρηση του ανθρακικού αποτυπώματος που πραγματοποιείται, θεωρείται ότι υπάρχει ένα σφάλμα 10%.

7.4.1 1^η Περίπτωση

Αρχικά, γίνεται ένας δοκιμαστικός υπολογισμός μιας υποτιθέμενης λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα. Ο δοκιμαστικός υπολογισμός ορίζει 45.000 πτήσεις μήκους 1.000 χιλιομέτρων και 500 χιλιομέτρων. Η τιμή των 1.000 χιλιομέτρων επιλέγεται ως μία μέση τυπική εμβέλεια ενός αεροσκάφους που ταξιδεύει εντός της Ευρώπης (Πίνακας 6-15). Η πρώτη διαρκεί περίπου 1,54 ώρες σύμφωνα με τα δεδομένα του CAMACM (Πίνακας 6-6), οπότε γίνεται η υπόθεση ότι η απόσταση των 500 χιλιομέτρων καλύπτεται σε περίπου 0,77 ώρες (46 λεπτά περίπου).

Οι πτήσεις μοιράζονται σε 22.500 πτήσεις 500 χιλιομέτρων και σε 22.500 πτήσεις 1.000 χιλιομέτρων. Οι μεταβλητές εισαγωγής κάθε κύκλου πτήσης δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7-7). Για κάθε πτήση επιλέγεται ο κύκλος απογείωσης-προσγείωσης της I.C.A.O. (Πίνακας 5-1).

Πίνακας 7-7 : Δεδομένα πτήσεων πρώτης περίπτωσης

Εμβέλεια πτήσης (km)	Χρόνος πλεύσης (min)	Ώση (% max)	Χρόνος ανάβασης (min)	Ώση (%max)	Χρόνος καθόδου (min)	Ώση (%max)
1.000	47,3	40	14-14,5	58-60	13-14	32
500	11,6	40	12	65	12	30

Οι παραπάνω υποθέσεις δίνουν τα ακόλουθα αποτελέσματα :



Πίνακας 7-8 : Ανθρακικό αποτύπωμα πρώτης περίπτωσης

Συνολικές εκπομπές (φυσιολογικής) λειτουργίας (kt CO ₂ eq)	267 ± 27
Κατανάλωση καυσίμου (kt fuel)	84
Κατανάλωση ελαίων (kt lubricant)	0,013
Συνολικός χρόνος λειτουργίας (hours)	66.169
Σύνολο πτήσεων	45.000
Λόγος $r = EFH / EFC$ (Hours/Flight Cycle)	1,47

Όπως έχει προαναφερθεί, ένα αεροσκάφος μπορεί να εκτιμηθεί ότι λειτουργεί 260 ώρες ανά μήνα (χωρίς φυσικά αυτό να είναι δεσμευτικό) (5.5, [66]). Άρα σε ένα χρόνο λειτουργεί για 3.120 ώρες, οπότε ο κινητήρας της ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 1 έχει διάρκεια ζωής 21,2 έτη, που είναι μία φυσιολογική και αναμενόμενη ηλικία αλλαγής ή απόσυρσης στροβιλοκινητήρα.

Επιπλέον, ο λόγος ωρών πτήσης προς τους κύκλους πτήσεων (EFH/EFC) αντιστοιχεί με καλή ακρίβεια σε τυπικές, ιδεατές τιμές για έναν στροβιλοκινητήρα CFM56, σύμφωνα με σχετικά τεχνολογικά άρθρα (η τιμή για τον CFM56-3 δίνεται ως 1,4 [89]). Συνεπώς, η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 είναι αντιπροσωπευτική των κινητήρων CFM56 και ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Για πληρότητα, δίνονται οι εκπομπές που αντιστοιχούν σε κάθε στάδιο των πτήσεων :

Πίνακας 7-9 : Ποσοστό ανθρακικού αποτυπώματος ανά φάση κύκλου πτήσης

ΣΤΑΔΙΟ ΚΥΚΛΟΥ ΠΤΗΣΗΣ	ΑΝΘΡΑΚΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ (kt CO ₂)	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ (hours)
ΤΡΟΧΟΔΡΟΜΗΣΗ	24	9,00	19.500
ΑΠΟΓΕΙΩΣΗ	7	2,46	525
ΠΡΩΤΗ ΑΝΑΒΑΣΗ – ΣΤΡΕΨΗ (CLIMB-OUT)	17	6,33	1.650
ΑΝΑΒΑΣΗ (CLIMB)	71	26,59	9.844
ΠΛΕΥΣΗ	102	38,53	22.088
ΚΑΘΟΔΟΣ	35	13,04	9.562
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ-ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗ	11	4,05	3.000



Αναμενόμενα η πλεύση, λόγω της μεγάλης διάρκειας της, προκαλεί τις περισσότερες ανθρακικές εκπομπές. Η ώση έχει μικρότερο ρόλο στις εκπομπές και η επίδραση της εξαρτάται από τη σχέση που έχει με την κατανάλωση καυσίμου (Εικόνα 6-1). Τονίζεται επίσης ότι ο χρόνος της τροχοδρόμησης τείνει να είναι αρκετά μικρότερος (περίπου 5 λεπτά) σε σχέση με τους χρόνους που προτείνει η I.C.A.O. (26 λεπτά), όποτε και οι εκπομπές στη διάρκεια της τροχοδρόμησης αναμένονται να είναι λιγότερες στη πραγματικότητα.

Αν η τροχοδρόμηση γινόταν μονάχα με κάποιου είδους ηλεκτρικού βοηθήματος (έναν ηλεκτροκινητήρα) ή με κάποιο κινητήρα υδρογόνου, τότε οι εκπομπές της τροχοδρόμησης θα ήταν μηδενικές (χωρίς βέβαια να ληφθούν υπόψιν οποιαδήποτε άλλα λειτουργικά ή δομικά προβλήματα). Το ανθρακικό αποτύπωμα του στροβιλοκινητήρα θα μειωνόταν κατά 24.000 τόνους περίπου (άρα 48.000 τόνους για ένα αεροσκάφος), με τελικό αποτύπωμα 242.782 τόνους (ισοδύναμου) διοξειδίου του άνθρακα (9% πτώση περίπου).

Αν το αεροσκάφος εκτελούσε επιτυχώς μία προσέγγιση συνεχούς κατάβασης (continuous descent approach) (βλέπε εδάφιο 1.2), άρα οι κινητήρες του κατάφερναν να προσεγγίσουν το αεροδρόμιο με ελάχιστη καύση καυσίμου, τότε οι εκπομπές θα μειωνόντουσαν κατά 4% περίπου (θεωρώντας για απλότητα ότι δεν καταναλώνεται καθόλου καύσιμο). Δηλαδή θα υπήρχε μείωση 10.900 τόνων (ισοδύναμου) διοξειδίου του άνθρακα. Και οι δύο περιπτώσεις εφαρμοσμένες μαζί, δίνουν μία μείωση 34 τόνων άνθρακα από τον κύκλο ζωής του στροβιλοκινητήρα. Η ποσότητα αυτή είναι ισοδύναμη με τη δημιουργία (υλικά-κατεργασίες) δύο νέων στροβιλοκινητήρων CFM56-5A.

7.4.2 2^η Περίπτωση

Στη δεύτερη περίπτωση, σκοπός είναι η μελέτη της επίδρασης του αριθμού των πτήσεων σε σχέση με τη συνολική χρονική διάρκεια λειτουργίας, δηλαδή τη μεταβολή του λόγου r (σχέση 3.16, 5.3). Οι προορισμοί και αναχωρήσεις των πτήσεων προέρχονται από τον πίνακα 6-15 (Πίνακας 6-15). Εξετάζονται τρεις υποπεριπτώσεις στροβιλοκινητήρα που χρησιμοποιείται για μικρά ταξίδια, για ταξίδια μεσαίας απόστασης και για ταξίδια μεγάλης απόστασης. Τονίζεται ότι το μήκος των ταξιδιών αφορά γενικά αποστολές μέσης εμβέλειας, αφού άλλωστε ο CFM56-5A δεν προορίζεται για υπερατλαντικά ταξίδια.

Για τη περίπτωση αυτή, ο αριθμός των συνολικών πτήσεων (κύκλοι πτήσεων) θα είναι 34.000. Οι πτήσεις που αντιστοιχούν σε κάθε προφίλ εμβέλειας φαίνονται στον πίνακα 7-10 (Πίνακας 7-10). Οι μεταβλητές εισαγωγής για κάθε πτήση είναι αυτές που φαίνονται στον πίνακα 6-15 (Πίνακας 6-15) και ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζονται αναλύεται στο αντίστοιχο εδάφιο. Εν συντομία, εντοπίζεται η μέση χρονική διάρκεια και το μήκος κάθε διαδρομής, και σύμφωνα με αυτά επιλέγεται το πιο συνηθισμένο ύψος πτήσης. Έτσι, διαμορφώνεται η χρονική διάρκεια κάθε φάσης της λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα.



Πίνακας 7-10 : Δεδομένα πτήσεων δεύτερης περίπτωσης⁵⁵

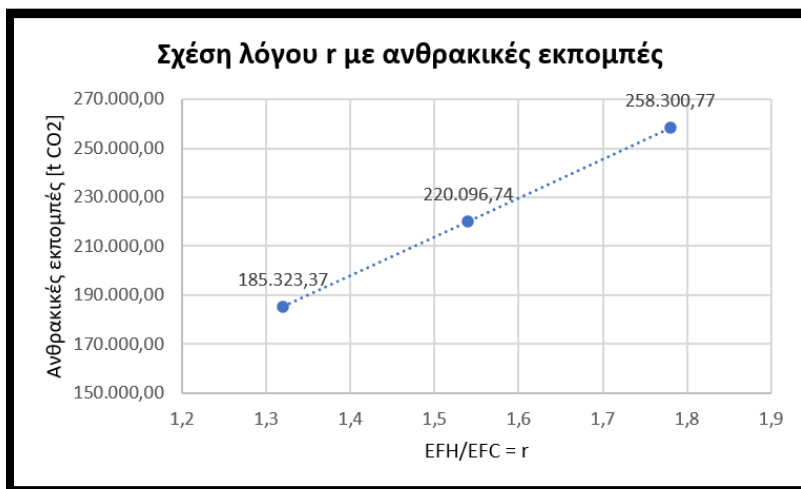
ΠΡΟΦΙΛ ΠΤΗΣΕΩΝ	ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ
Μικρής Εμβέλειας	16.000 Αθήνα – Κωνσταντινούπολη 18.000 Αθήνα - Ρόδος
Μεσαίας Εμβέλειας	2.000 Αθήνα – Ζάγκρεμπ 2.000 Αθήνα – Ρώμη 10.000 Αθήνα – Κωνσταντινούπολη 10.000 Αθήνα – Βελιγράδι 10.000 Αθήνα - Ρόδος
Μεγάλης Εμβέλειας	1.000 Αθήνα – Ζάγκρεμπ 1.000 Αθήνα – Λονδίνο 2.000 Αθήνα – Ρώμη 1.000 Αθήνα – Ελσίνκι 1.000 Αθήνα – Ζυρίχη 1.000 Αθήνα – Παρίσι 1.000 Αθήνα – Στοκχόλμη 6.000 Αθήνα - Βελιγράδι 10.000 Αθήνα – Κωνσταντινούπολη 10.000 Αθήνα - Ρόδος

Με τη χρήση των πληροφοριών των πινάκων 6-15 και 7-10 (Πίνακας 6-15, Πίνακας 7-10) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 7-11 : Ανθρακικό αποτύπωμα δεύτερης περίπτωσης

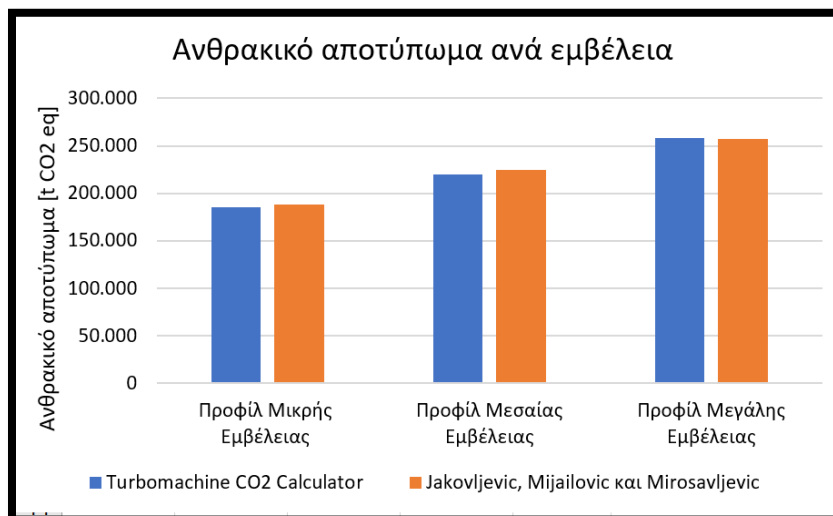
Είδος πτήσεων	Προφίλ μικρής εμβέλειας	Προφίλ μεσαίας εμβέλειας	Προφίλ μεγάλης εμβέλειας
Λόγος $r = EFH/EFC$ (Hours / flight cycle)	1,32	1,54	1,78
Συνολικές εκπομπές (φυσιολογικής) λειτουργίας (kt CO ₂ eq)	185	220	258
Κατανάλωση καυσίμου (kt fuel)	59	70	82
Συνολικός χρόνος λειτουργίας (hours)	45.000	52.300	60.400
Έτη λειτουργίας (260 hours/month)	14	17	19
Σύνολο πτήσεων	34.000	34.000	34.000

⁵⁵ Ως προφίλ πτήσεων εννοείται ο συνδυασμός χρόνου λειτουργίας και συνολικού μήκους διαδρομών, που δίνουν έναν λόγο r που αντιστοιχεί σε ένα τυπικό αεροσκάφος μικρής, μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας. Αυτός είναι και ο λόγος που στις κατηγορίες μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας εντοπίζονται και διαδρομές μικρής εμβέλειας.



Εικόνα 7-6 : Σχέση λόγου r με τις ανθρακικές εκπομπές

Παρατηρείται ότι ο λόγος r είναι ανάλογος του χρόνου λειτουργίας του κινητήρα. Ως εκ τούτου, οι ανθρακικές εκπομπές είναι ανάλογες του λόγου r και άρα της εμβέλειας του αεροσκάφους (Εικόνα 7-6). Ένας στροβιλοκινητήρας που ταξιδεύει μόνο εντός Ελλάδος θα έχει ανθρακικό αποτύπωμα μικρότερο από έναν στροβιλοκινητήρα, παρόμοιας ηλικίας, που πραγματοποιεί ταξίδια μεταξύ ευρωπαϊκών χωρών.



Εικόνα 7-7 : Επαλήθευση ανθρακικού αποτυπώματος αυξανόμενης εμβέλειας

Οι εκπομπές που βρέθηκαν ανά εμβέλεια αλλά και ηλικία στροβιλοκινητήρα, προσομοιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα των Jakovljevic, Mijailovic και Miroslavljevic [30], οι οποίοι μελέτησαν αεροσκάφη διαφορετικών ηλικιών. Λαμβάνοντας δεδομένα από τον πίνακα 6-1 (Πίνακας 6-1, αεροσκάφη 1,2 και 4) και 7-11 (Πίνακας 7-11), η ομοιότητα των ευρημάτων αποτυπώνεται στην Εικόνα 7-7.

7.5 Ανθρακικό αποτύπωμα χειροτέρευσης του CFM56-5A

Οι μεταβλητές εισαγωγής για αυτό το στάδιο είναι το ανώτατο όριο υποβάθμισης B_n και το ποσοστό της υποβάθμισης που υφίσταται ο κινητήρας αναπόφευκτα, ύστερα από κάθε επισκευή. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται καλύτερα στο εδάφιο 5.3, ενώ πηγές για τη χρονική διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα χωρίς επισκευές δίνονται από τον πίνακα 5-2 (Πίνακας 5-2). Σύμφωνα με τον πίνακα, και επειδή οι πτήσεις είναι 45.000, οι χρονικές περίοδοι χρήσης-επισκευής χωρίζονται στη μέση (22.500 δηλαδή). Η μέγιστη επιτρεπόμενη υποβάθμιση ορίζεται ως 3%, ενώ η βαθμιαία υποβάθμιση μετά από κάθε επισκευή είναι 0,3%. Τα ίδια ισχύουν και για τη 2η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ, με τη διαφορά ότι οι πτήσεις είναι 34.000.

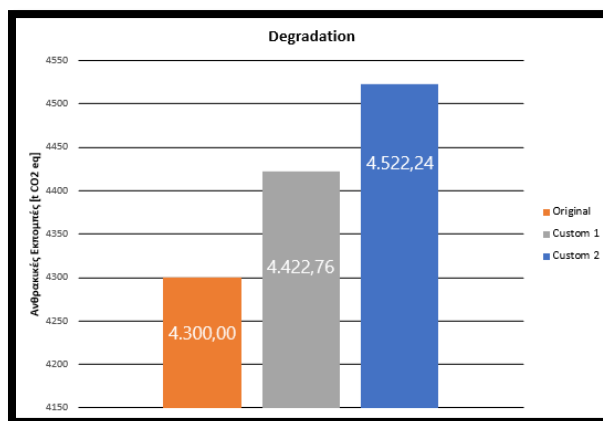
7.5.1 1η Περίπτωση

Για την πρώτη περίπτωση τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 7-12 : Ανθρακικό αποτύπωμα χειροτέρευσης πρώτης περίπτωσης

ΕΚΠΟΜΠΕΣ (t CO₂)	4.300
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΠΟΜΠΩΝ (%)	1,59
ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΕΙΡΟΤΕΡΕΥΣΗΣ (%)	1,65

Παρατηρείται ότι οι εκπομπές λόγω της χειροτέρευσης είναι μεγάλες σε μέγεθος. Ξεπερνούν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις εκπομπές των υλικών, των κατεργασιών και των μεταφορών. Εξαρτώνται από τη μέγιστη επιτρεπόμενη υποβάθμιση και την υπολειπόμενη υποβάθμιση κάθε φορά. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και με εφαρμογές για διάφορες περιπτώσεις.

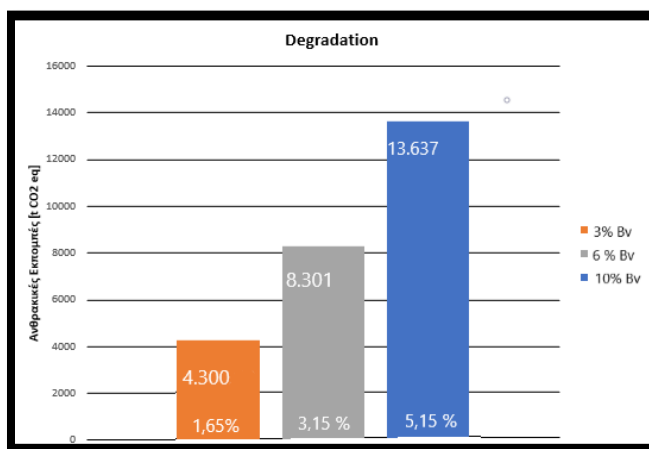


Εικόνα 7-8 : Χειροτέρευση και διαστήματα επισκευής

Δοκιμάζεται, πρώτα, η περίπτωση διαφορετικών χρονικών διαστημάτων επισκευής, σύμφωνα με τον πίνακα 5-2 (Πίνακας 5-2).

Η χειροτέρευση σταδιακά αυξάνεται από 1,65 %, μέχρι 1,73%, καθώς αυξάνονται ανά μία οι περίοδοι κατασκευής. Αυτό οφείλεται στο τρόπο με τον οποίο εκτιμώνται οι εκπομπές λόγω χειροτέρευσης. Τα διαγράμματα δείχνουν τι συμβαίνει όταν ο κινητήρας «φτάνει» στο οριακό σημείο χειροτέρευσης περισσότερες φορές. Πολύ απλά, δηλαδή, έχει αυξηθεί η τάση του κινητήρα να χαλάει (Εικόνα 7-8).

Εξετάζεται τώρα η περίπτωση αύξησης της ανοχής της χειροτέρευσης. Γίνεται μία εκτίμηση για 6% και 10%. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω, στην Εικόνα 7-9. Η χειροτέρευση του κινητήρα αυξάνεται από 1,65% σε 5,15%. Παρατηρείται η εξάρτηση των εκπομπών από το όριο της υποβάθμισης που επιτρέπεται να έχει ο στροβιλοκινητήρας. Άρα, φαίνεται πλέον η αναγκαιότητα για την έγκαιρη και συστηματική συντήρησή του. Στο μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί, η συνεπής συντήρηση, μπορεί να εκφραστεί με μείωση του όρου *Bv*, ώστε δηλαδή η ομάδα συντήρησης να «προλαβαίνει» τον κινητήρα πριν χειροτερεύσει η κατάσταση. Όλα αυτά όμως φέρνουν και μία αύξηση του κόστους, η οποία δεν έχει υπολογιστεί στη μελέτη αυτή και πιθανώς επηρεάζει τα διαθέσιμα χρονικά διαστήματα για έλεγχο και συντήρηση του κινητήρα.



Εικόνα 7-9 : Χειροτέρευση και ανώτατο όριο υποβάθμισης

Η χειροτέρευση του κινητήρα προκαλεί τη μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου, άρα την ανάγκη για μεγαλύτερη παραγωγή του και αύξηση των αντίστοιχων ανθρακικών εκπομπών.

Τέλος, η υπερκατανάλωση των ελαίων που οφείλεται στο παραπάνω είδος υπερκατανάλωσης εκτιμάται περίπου στο 1,6% της φυσιολογικής κατανάλωσής τους. Δηλαδή, εξαιτίας της χειροτέρευσης καταναλώνονται επιπλέον περίπου 210 χιλιόγραμμα ελαίων.

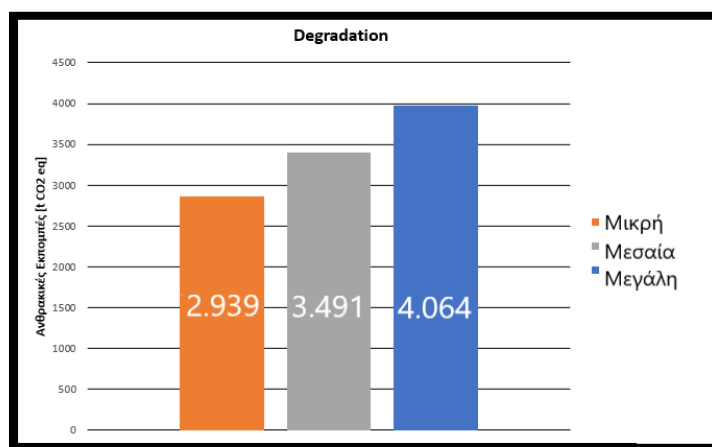
7.5.2 2η Περίπτωση

Στη δεύτερη περίπτωση οι πτήσεις είναι 34.000 για κάθε εμβέλεια. Οπότε σύμφωνα με τον πίνακα 5-2 (Πίνακας 5-2) οι περίοδοι επισκευής θα είναι τρεις. Για τη δεύτερη περίπτωση τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 7-13 : Χειροτέρευση και λόγος χρόνου λειτουργίας προς κύκλων πτήσεων

Είδος πτήσεων	Μικρής εμβέλειας	Μέσης εμβέλειας	Μεγάλης εμβέλειας
ΛΟΓΟΣ $r = \text{EFH}/\text{EFC}$ (Hours / flight cycle)	1,32	1,54	1,78
ΚΥΚΛΟΙ ΠΤΗΣΗΣ	34.000	34.000	34.000
ΕΚΠΟΜΠΕΣ (t CO ₂)	2.939	3.491	4.064
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΠΟΜΠΩΝ (%)	1,56	1,56	1,55
ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΕΙΡΟΤΕΡΕΥΣΗΣ (%)	1,605	1,605	1,605

Παρατηρείται ότι, εφόσον δεν αλλάζουν ο όρος B_n και η υποβάθμιση λόγω επισκευής, τότε η χειροτέρευση του κινητήρα είναι η ίδια (και κοντά σε εκείνη της 1ης Περίπτωσης), ενώ είναι καθαρά ανάλογη του καυσίμου που καταναλώνεται (Εικόνα 7-10).



Εικόνα 7-10 : Χειροτέρευση και λόγος ωρών προς κύκλους πτήσης

7.6 Ανθρακικό αποτύπωμα συντήρησης και καυσίμων του CFM56-5A

Για τη συντήρηση ως μεταβλητές εισόδου επιλέγονται η συνολική διάρκεια του κύκλου ζωής του κινητήρα σε κύκλους πτήσεις (45.000 για την 1^η Περίπτωση 1, 34.000 για τη 2^η Περίπτωση) και η διάρκεια ζωής κάθε εξαρτήματος που απαρτίζει τον στροβιλοκινητήρα, σύμφωνα με τον πίνακα 5-6 (Πίνακας 5-6).

7.6.1 1^η Περίπτωση

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο εδάφιο 5.5, προκύπτει ότι η συντήρηση του στροβιλοκινητήρα προκαλεί την εκπομπή 2 τόνων (ισοδύναμου) διοξειδίου του άνθρακα. Η χαμηλή τιμή οφείλεται στο γεγονός ότι τα εξαρτήματα του στροβιλοκινητήρα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Αντίθετα, στην εργασία τους οι



Jakovljevic, Mijailovic και Miroslavljivic [30] αναφέρουν ότι η φάση της συντήρησης παράγει τα περισσότερα ποσά διοξειδίου του άνθρακα μετά τη φάση της λειτουργίας, εξαιτίας του μεγάλου αριθμού εξαρτημάτων που χρειάζονται αλλαγές. Πράγματι, η ίδια εργασία αναφέρει ότι το σύστημα προσγείωσης ενός αεροσκάφους (landing gear) αλλάζει ανά 100 πτήσεις.

Για να φανεί η τεράστια αυτή διαφορά, πραγματοποιείται η ακόλουθη εφαρμογή. Τα πτερύγια του ανεμιστήρα ζυγίζουν συνολικά 265 χιλιόγραμμα περίπου, αποτελώντας το 11,34% της μάζας του στροβιλοκινητήρα. Αν μόνο αυτά άλλαζαν ανά 100 πτήσεις, τότε οι ανθρακικές εκπομπές θα εκτινασσόντουσαν στους 180 τόνους (ισοδύναμου) διοξειδίου του άνθρακα. Στην περίπτωση εκείνη, οι εκπομπές θα αποτελούσαν το 0,066% των συνολικών εκπομπών του κύκλου ζωής του στροβιλοκινητήρα (ποσοστιαία αύξηση 6,5 %).

Όσον αφορά τα καύσιμα και τα λιπαντικά, ως μεταβλητές εισαγωγής ορίζονται ο συνολικός χρόνος λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα και η συνολική ποσότητα καυσίμου που καταναλώθηκε. Αποτελέσματα για διάφορα καύσιμα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 7-14).

Πίνακας 7-14 : Ανθρακικό αποτύπωμα καυσίμου ή λαδιού λίπανσης

ΕΙΔΟΣ	ΑΝΘΡΑΚΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ (kt CO ₂)
Λιπαντικό πετρελαίου – (Λίπανση-Ψύξη)	0,013
Πολύ-Άλφα-Ολεφίνη - (Λίπανση-Ψύξη)	0,024
Κηροζίνη (Γαλλία) – (Καύσιμο)	63
Κηροζίνη (Η.Π.Α.) – (Καύσιμο)	57
Η.Ε.Φ.Α. – (Βιοκαύσιμο)	82
Ε.Τ.Ι. (Miscanthus) – (Βιοκαύσιμο)	2
Α.Τ.Ι. (Συμβατικές μέθοδοι) – (Βιοκαύσιμο)	118
Α.Τ.Ι. (Ανανεώσιμες πηγές)-(Βιοκαύσιμο)	67
Fischer-Tropsch (Ευρώπη) – (Βιοκαύσιμο)	-42
Fischer-Tropsch (Η.Π.Α.) – (Βιοκαύσιμο)	-82

Παρατηρείται ότι τα βιοκαύσιμα δεν έχουν πάντα τον αναμενόμενο θετικό αντίκτυπο που αναμένεται και μπορούν μάλιστα να προκαλέσουν την εκπομπή περισσότερων ανθρακικών εκπομπών από το συμβατικό καύσιμο της αεροπορίας (κηροζίνη). Γενικά τα βιοκαύσιμα μειώνουν το ανθρακικό αποτύπωμα μόνο αν ληφθεί υπόψιν όλος ο κύκλος ζωής του στροβιλοκινητήρα. Ορισμένα βιοκαύσιμα φυτικής προελεύσεως μπορούν να δώσουν ακόμη και αρνητικό ανθρακικό αποτύπωμα.

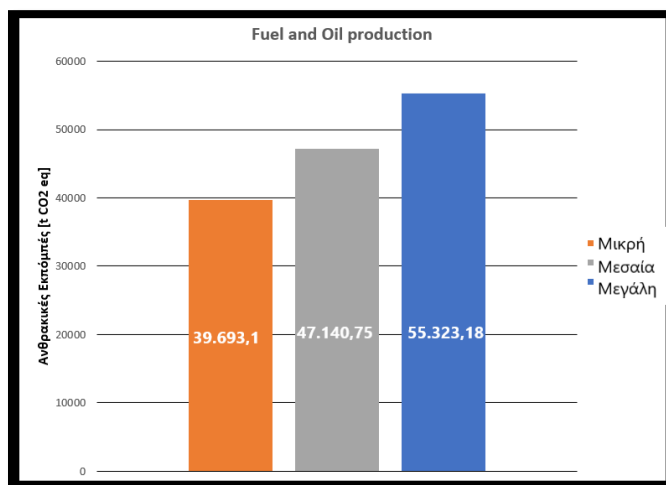
Κάθε βιοκαύσιμο που αντλεί άνθρακα από την ατμόσφαιρα κατά την ανάπτυξη της βιομάζας (με φωτοσύνθεση) μπορεί να έχει ανθρακικό αποτύπωμα το οποίο μπορεί να

καταστεί αρνητικό. Αυτό γίνεται επιστρέφοντας ένα τμήμα της βιομάζας στο έδαφος. Ο πιο απλός τρόπος για να γίνει αυτό είναι μέσω παραγωγή βιοεξανθρακώματος (biochar). Η δημιουργία του βιοεξανθρακώματος γίνεται μέσω της πυρόλυσης ενός τμήματος του βιοκαυσίμου. Η επιλογή της ποσότητας του τμήματος αυτού καθορίζεται από τους αγρότες και τους παραγωγούς καυσίμων [90]. Τονίζεται ότι ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας, με τα τωρινά δεδομένα τουλάχιστον, διερευνά ακόμη το κατά πόσο επαληθεύεται η ικανότητα ορισμένων βιοκαυσίμων να προσφέρουν αρνητικό ανθρακικό αποτύπωμα [59]. Περισσότερη ανάλυση πάνω στις ιδιότητες των βιοκαυσίμων πραγματοποιείται στο παράρτημα II (βλέπε 13.1.1).

Όσον αφορά το λιπαντικό, είναι εμφανές ότι η συνεισφορά του στις ανθρακικές εκπομπές είναι μικρή συγκριτικά με τις εκπομπές της παραγωγής των καυσίμων, αλλά ανάλογες της δημιουργίας του κινητήρα. Η δημιουργία συμβατικού λαδιού για τον κύκλο ζωής του στροβιλοκινητήρα, παράγει τις ίδιες εκπομπές με τη δημιουργία ενός στροβιλοκινητήρα CFM56.

7.6.2 2η Περίπτωση

Για τη δεύτερη περίπτωση όλες οι πτήσεις πραγματοποιούνται με καύσιμο απλή κηροζίνη. Η **Εικόνα 7-11** δείχνει τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξε η προσομοίωση. Ο κινητήρας που πετά για μεγαλύτερη διάρκεια θα απαιτήσει περισσότερο καύσιμο, αυξάνοντας την ανάγκη για τη παραγωγή του. Επίσης, το λάδι το οποίο χάνει ο κινητήρας είναι ανάλογο του χρόνου λειτουργίας του.



Εικόνα 7-11 : Κατανάλωση καυσίμου και λόγος ωρών λειτουργίας προς κύκλους πτήσης

7.7 Ανθρακικό αποτύπωμα απόσυρσης του CFM56-5A

Στο στάδιο αυτό, η μάζα και το υλικό κάθε εξαρτήματος είναι γνωστά. Ως μεταβλητές εισαγωγής ορίζονται η χώρα απόσυρσης και τα ποσοστά επαναχρησιμοποίησης, αποτέφρωσης, ανακύκλωσης ή ταφής κάθε εξαρτήματος. Επαναχρησιμοποίηση δεν υπάρχει, ενώ ακολουθούνται οι υποθέσεις των S. Howe, A.J. Kolios και F.P. Brennan [31]



για τα υπόλοιπα ποσοστά. Συγκεκριμένα, κάθε κράμα ανακυκλώνεται κατά 75 % (το υπόλοιπο 25 πάει στη χωματερή), ενώ τα σύνθετα υλικά αποτεφρώνονται και πάνε στη χωματερή κατά 50 % αντίστοιχα.

Όπως και στο στάδιο των κατεργασιών και της συναρμολόγησης, πρέπει να οριστεί το μερίδιο του δικτύου ενέργειας και των εφεδρικών πηγών (M.E.K. Diesel), μιας και ο υπολογισμός των εκπομπών της αποτέφρωσης και της χρήσης της χωματερής εξαρτώνται από τη χώρα απόσυρσης. Η ανακύκλωση εκτιμάται με τη χρήση των αντίστοιχων συντελεστών εκπομπής.

Εκτιμάται ότι το δίκτυο συνεισφέρει κατά 70%, ενώ άλλες πηγές ενέργειας συμμετέχουν κατά 30% για την απόσυρση. Η αποσυναρμολόγηση πραγματοποιείται σε ειδικούς ελεγχόμενους χώρους. Επομένως, η συνεισφορά του δικτύου εδώ θα είναι 90%, ενώ οι εφεδρικές πηγές συμμετέχουν κατά 10%.

Πίνακας 7-15 : Απαιτούμενη ενέργεια για την απόσυρση του στροβιλοκινητήρα

ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MJ)	28.644
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ (MJ)	4.011
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΧΩΜΑΤΕΡΗΣ (MJ)	1.260
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (MJ)	23.373

Παρατηρείται ότι η απαιτούμενη ενέργεια για τη ταφή σε χωματερή είναι ιδιαίτερα χαμηλή, οπότε και αναμένεται οι ανθρακικές εκπομπές να είναι και εκείνες χαμηλές. Από την άλλη, οι ενεργειακές ανάγκες για αποτέφρωση είναι αρκετά υψηλές⁵⁶. Υπενθυμίζεται ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό της μάζας του στροβιλοκινητήρα αποτεφρώνεται⁵⁷. Ο επόμενος πίνακας δείχνει τις ανθρακικές εκπομπές κάθε διεργασίας της απόσυρσης και το άθροισμα τους.

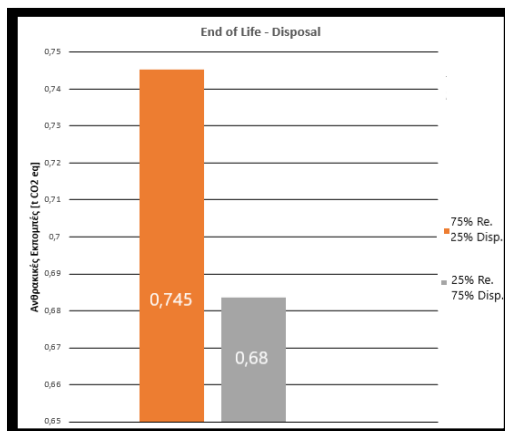
Πίνακας 7-16 : Ανθρακικές εκπομπές απόσυρσης-αποσυναρμολόγησης

ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ (t CO₂)	0,0950
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ (t CO₂)	0,0690
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΧΩΜΑΤΕΡΗΣ (t CO₂)	0,0004
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΠΟΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ (t CO₂)	0,5820
ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ (t CO₂)	0,7464

⁵⁶ Έχουν ληφθεί υπόψιν και οι ανθρακικές εκπομπές λόγω της ίδιας της καύσης, μέσω αντίστοιχου συντελεστή εκπομπής.

⁵⁷ Συγκεκριμένα, τα εξαρτήματα που είναι κατασκευασμένα από σύνθετο υλικό και σε ποσοστό 50% (0,024% της συνολικής μάζας του κινητήρα).

Ο Πίνακας 7-16 δείχνει ότι η ταφή του στροβιλοκινητήρα στη χωματερή είναι μια πιο οικολογική πρακτική από το να ανακυκλώνεται! Μάλιστα, αν αντιστραφούν τα ποσοστά, και 75 % των κραμάτων πάει στη χωματερή, ενώ το 25% αυτών ανακυκλωθεί, προκύπτει το παρακάτω απρόοπτο (Εικόνα 7-12):



Εικόνα 7-12 : Σύγκριση ανακύκλωσης με χρήση χωματερής

Το παραπάνω ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η απαιτούμενη ενέργεια για τη ταφή των κραμάτων είναι μικρή, ενώ βέβαια δεν εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα όσο καιρό μένουν στη γη. Επιπλέον, η τεχνική ανακύκλωσης είναι πηγές ανθρακικών εκπομπών, αλλά βέβαια μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές στο πρώτο στάδιο εύρεσης και δημιουργίας των υλικών. Τέλος, η μελέτη του ανθρακικού αποτυπώματος δε δείχνει την πλήρη εικόνα των επιπτώσεων ορισμένων πρακτικών (π.χ. η χωματερή ενδέχεται να οδηγήσει στην απελευθέρωση τοξικών ουσιών στο έδαφος).

7.8 Ανθρακικό αποτυπώματος κύκλου ζωής CFM56-5A

Ο κινητήρας CFM56-5A μελετήθηκε για δύο περιπτώσεις πτήσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα για αυτές τις δύο περιπτώσεις:



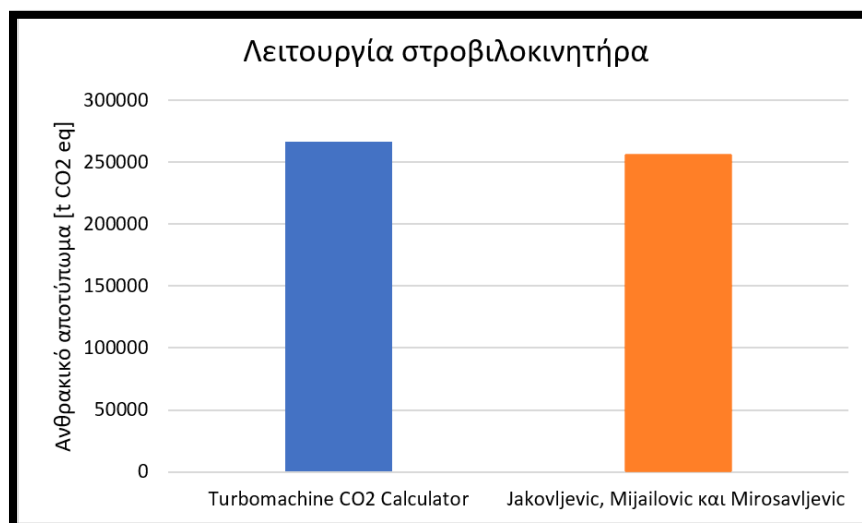
7.8.1 1^η Περίπτωση

Πίνακας 7-17 : Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής (1^η Περίπτωση)

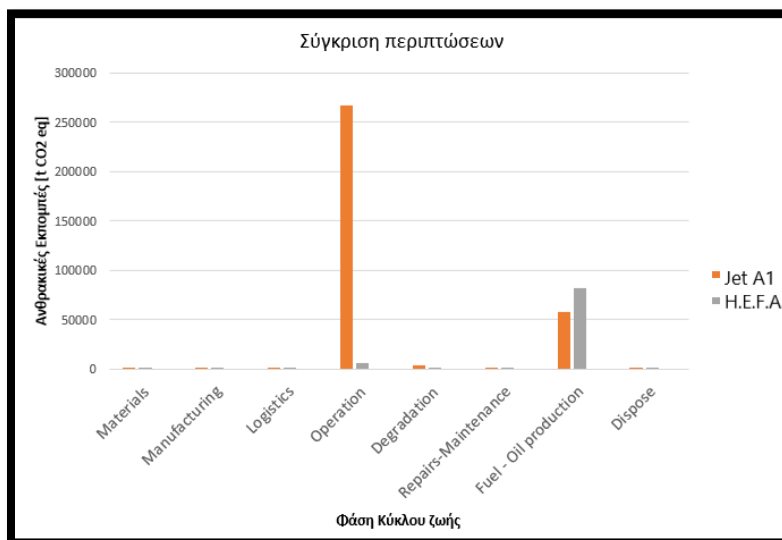
ΦΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	ΑΝΘΡΑΚΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ (tCO ₂ eq.)	ΠΟΣΟΣΤΟ (%) ΚΗΡΟΖΙΝΗ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%) Η.Ε.Φ.Α.
Δημιουργία / Εξόρυξη υλικών	12,7	0,0039	0,0047
Κατεργασίες και Συναρμολόγηση	7	0,0020	0,0025
Μεταφορές	2	0,0006	0,0007
Λειτουργία (45.000 πτήσεις - Μήκους 1.000 km και 500 km)	266.779 ± 26.678 (Κηροζίνη 6.505 ± 650,5 (Η.Ε.Φ.Α.)	81,05	97,8200
Χειροτέρευση κινητήρα	4.300 (Κηροζίνη) 105 (Η.Ε.Φ.Α.)	1,3063	1,5000
Συντήρηση	2	0,0006	0,0007
Παραγωγή καυσίμων και λιπαντικών	58.061 (Συμβατική κηροζίνη) 81.849 (Η.Ε.Φ.Α.)	17,6	0,7000
Ανακύκλωση, αποτέφρωση, χωματερή	0,7	0,00023	0,0003
Σύνολο	329.164 ± 26.678 (κηροζίνη) 88.483 ± 15 (Η.Ε.Φ.Α.)	100	100

Οι 266.779 τόνοι άνθρακα ισοδυναμούν με ένα αεροσκάφος που παράγει περίπου 531.558 τόνους άνθρακα στον κύκλο ζωής του. Η τιμή αυτή έχει απόκλιση 4 % από τη τιμή που υπολόγισαν για ένα αεροσκάφος με κινητήρες CFM56 οι Jakovljevic, Mijailovic και

Mirosavljevic στην εργασία τους [30] (Πίνακας 6-1). Το αποτέλεσμα επομένως είναι αποδεκτό (Εικόνα 7-13).

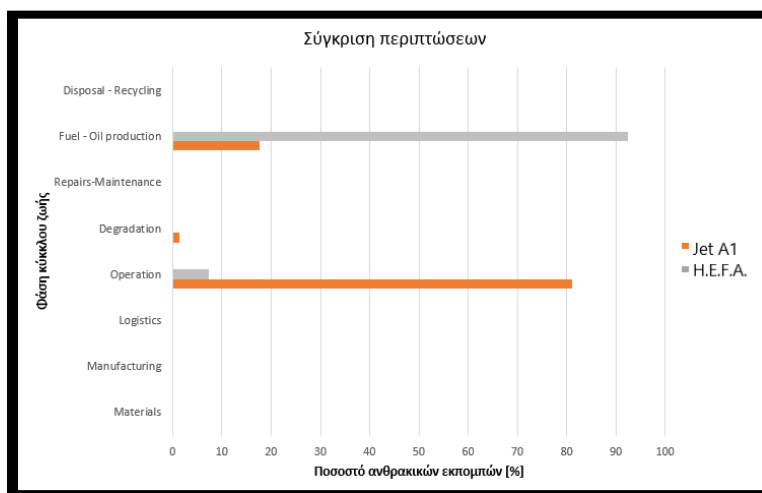


Εικόνα 7-13 : Ανθρακικό αποτύπωμα λειτουργίας τυπικού στροβιλοκινητήρα πολιτικής αεροπορίας



Εικόνα 7-14 : Σύγκριση χρήσης βιοκαυσίμου αντί για κηροζίνη

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση βιοκαυσίμου (H.E.F.A.) αντί της κοινής κηροζίνης (Jet-A). Οι εκπομπές της λειτουργίας πέφτουν κατά 97,5%, αλλά αυξάνονται οι εκπομπές λόγω παραγωγής του καυσίμου κατά 40% (Εικόνα 7-14).



Εικόνα 7-15 : Σύγκριση ποσοστιαίων εκπομπών βιοκαυσίμου και κηροζίνης

Αυτό το χαρακτηριστικό αλλάζει τελείως τη δυναμική του ανθρακικού αποτυπώματος του κύκλου ζωής, με την παραγωγή των καυσίμων-λιπαντικών να λαμβάνει τη πρώτη θέση (Εικόνα 7-15). Η μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος του κύκλου ζωής είναι περίπου 73% (Πίνακας 7-17).

Επιπλέον στοιχεία για τον κύκλο ζωής της 1^{ης} Περίπτωσης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 7-18 : Σύγκριση επιπλέον στοιχείων για την 1^η Περίπτωση

	ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΜΕ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ (H.E.F.A.)	ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΚΑΥΣΙΜΟ
Εκπομπές 1 ^{ης} Κατηγορίας (Scope 1 Emissions) (kt CO2 eq)	7	271
Εκπομπές 2 ^{ης} Κατηγορίας (Scope 2 Emissions) (kt CO2 eq)	0,009	0,009
Εκπομπές 3 ^{ης} Κατηγορίας (Scope 3 Emissions) (kt CO2 eq)	82	58
ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ (t CO ₂ eq/flight)	1,97	7,31
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΝΤΡΩΝ (εκατομμύρια)	4	14
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΔΑΣΩΝ (10.000 m ²)	7.374	27.337
ECO-COST (ανά πτήση) (ευρώ)	229	848
ECO-COST (κύκλου ζωής) (εκατομμύρια ευρώ)	10	38



Στα παραπάνω, γίνεται η αντιστοιχία των ανθρακικών εκπομπών με δέντρα και δάση [91]. Μια τακτική των αεροπορικών εταιρειών είναι η αντιστάθμιση των ανθρακικών εκπομπών με τη φύτευση δέντρων (13.3). Ως Eco-Cost ορίζεται το μέσο κόστος της αντιστάθμισης των ρύπων, και η τιμή λαμβάνεται ως 116 ευρώ ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα [92].

Το συνολικό κόστος για την αντιστάθμιση όλων των εκπομπών κυμαίνεται από 10.305.000 ευρώ μέχρι 38.160.000 ευρώ. Το κόστος πώλησης ενός κινητήρα CFM56 κυμαίνεται από 6.000.000 δολάρια, μέχρι και 11.000.000 δολάρια (λόγω πληθωρισμού) [93] [94] [95]. Δηλαδή οι κυρώσεις για τις ανθρακικές εκπομπές ενός στροβιλοκινητήρα CFM56 μπορούν να φτάσουν τη λιανική τιμή τριών στροβιλοκινητήρων.

Η επιλογή όμως του βιοκαυσίμου γίνεται από τις αεροπορικές εταιρείες. Ο Πίνακας 7-19 δείχνει ότι οι λόγοι αποφυγής της χρήσης των βιοκαυσίμων είναι καθαρά οικονομικοί, γεγονός που επιβεβαιώνει και η βιβλιογραφία (13.1.1).

Πίνακας 7-19 : Κόστος βιοκαυσίμων και συμβατικού καυσίμου

	ΚΗΡΟΖΙΝΗ	Η.Ε.Φ.Α.	ΠΗΓΗ
ΚΑΥΣΙΜΟ (t)	84.424	84.424	
ΚΟΣΤΟΣ (€/kg)	0,5	1,06	[70]
ΚΟΣΤΟΣ ΑΓΟΡΑΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (€) (εκατομμύρια)	43	89	
ECO-COST ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΠΡΩΤΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ (€) (εκατομμύρια)	9	0,8	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ (€) (εκατομμύρια)	52	90	

Πηγή : Λειτουργία Κινητήρων Turbofan Πολιτικών Αεροσκαφών με Καύσιμα από Ανανεώσιμες Πηγές: Υδρογόνο, Βιοκαύσιμα

Ξεκάθαρα είναι πιο οικονομική η απλή αντιστάθμιση των ανθρακικών εκπομπών, παρά η χρήση των ακριβών βιοκαυσίμων (13.1.1).

Αναμενόμενα, λόγω της μεγάλης επιρροής της φάσης της λειτουργίας, οι εκπομπές της 1^{ης} κατηγορίας (score 1) είναι περισσότερες, με αμέσως επόμενες εκείνης της 3^{ης} κατηγορίας (score 3), λόγω της παραγωγής των καυσίμων και των λιπαντικών. Αυτή η σειρά αλλάζει στη περίπτωση χρήσης βιοκαυσίμων, με τις εκπομπές 3^{ης} κατηγορίας να λαμβάνουν την πρώτη θέση και τη δεύτερη θέση να λαμβάνουν οι εκπομπές 1^{ης} κατηγορίας.

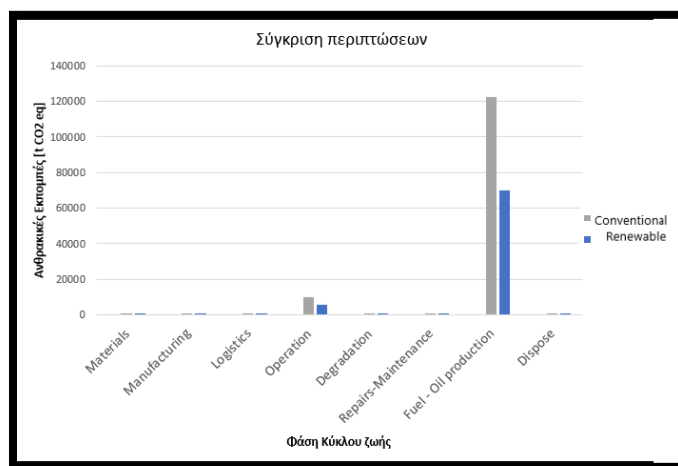
Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται μία εφαρμογή για να συγκριθεί η χρήση πιο δραστικών βιοκαυσίμων (Fischer–Tropsch Ευρώπης, Η.Ε.Φ.Α.), και προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα :

Πίνακας 7-20 : Σύγκριση χρήσης βιοκαυσίμων

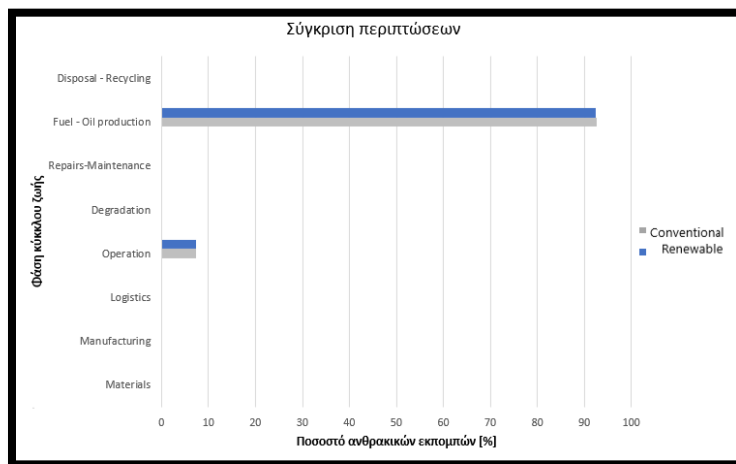
	ΚΗΡΟΖΙΝΗ	H.E.F.A.	Fischer–Tropsch
Εκπομπές 1 ^{ης} κατηγορίας (Scope 1 Emissions) (kt CO ₂ eq)	6	271	-3
Εκπομπές 2 ^{ης} κατηγορίας (Scope 2 Emissions) (kt CO ₂ eq)	0,009	0,009	0,009
Εκπομπές 3 ^{ης} κατηγορίας (Scope 3 Emissions) (kt CO ₂ eq)	82	58	-44
Συνολικές Εκπομπές (kt CO ₂ eq)	88	329	-47

Διαπιστώνεται ότι η χρήση ενός βιοκαυσίμου με αρνητικό συντελεστή εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα προκαλεί μείωση (ή καλύτερα απορρόφηση) εκπομπών του κύκλου ζωής του κινητήρα. Η χρήση και η εγκυρότητα τέτοιων συντελεστών, όμως, είναι ακόμη αμφιλεγόμενη από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας [59].

Τέλος, γίνεται μία σύγκριση για τον τρόπο παραγωγής των βιοκαυσίμων και συγκεκριμένα για A.T.J. (Alcohol-to-Jet fuel) κατασκευασμένο με συμβατικές ενεργειακές πηγές και με ανανεώσιμες (Εικόνα 7-16, Εικόνα 7-17).



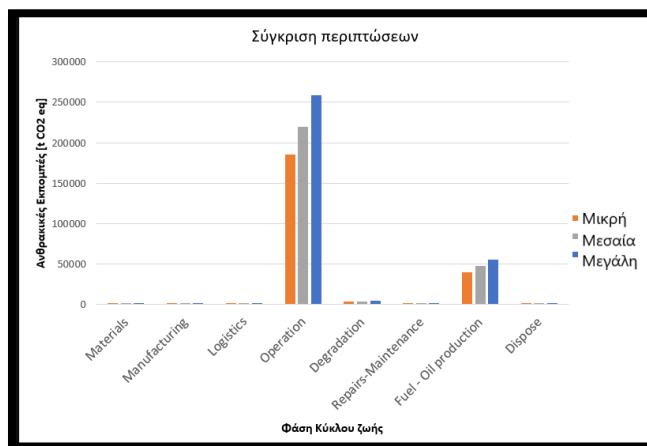
Εικόνα 7-16 : Σύγκριση εκπομπών για χρήση A.T.J.



Εικόνα 7-17 : Ποσοστιαία κατανομή εκπομπών για χρήση Α.Τ.Ι.

Η Εικόνα 7-17 δείχνει ότι η κατανομή των εκπομπών παραμένει πρακτικά αμετάβλητη ακόμη και με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή των καυσίμων. Δηλαδή και σε αυτή την περίπτωση το μερίδιο «ευθύνης» για τις ανθρακικές εκπομπές το έχει το στάδιο της παραγωγής. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βέβαια μειώνει τις ανθρακικές εκπομπές του κύκλου ζωής του στροβιλοκινητήρα από 132.502 τόνους σε 75.440 τόνους (43% μείωση). Σε σχέση με τη κηροζίνη, η μείωση αυτή είναι 77% (Πίνακας 7-20).

7.8.2 2^η Περίπτωση



Εικόνα 7-18 : Σύγκριση εκπομπών φάσεων των κύκλων ζωής της 2ης Περίπτωσης

Όμοια, δημιουργούνται πίνακες με το σύνολο των αποτελεσμάτων για τις πτήσεις της 2^{ης} Περίπτωσης.

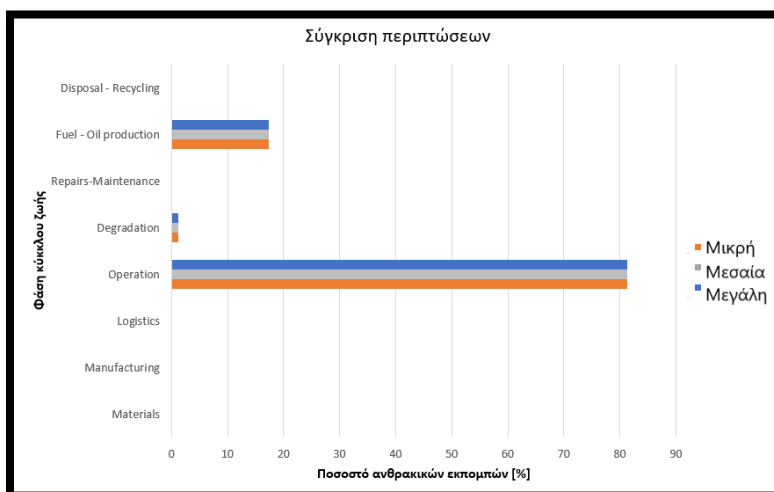


Φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται η χρονική διάρκεια χρήσης του στροβιλοκινητήρα, αποκτούν πολύ μεγαλύτερη αξία οι φάσεις της λειτουργίας, της χειροτέρευσης και της παραγωγής καυσίμων-λιπαντικών, ενώ οι υπόλοιπες τείνουν να γίνουν αμελητέες.

Πίνακας 7-21 : Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής (2η Περίπτωση)

ΦΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ	ΠΡΟΦΙΛ ΜΙΚΡΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑ ΠΟΣΟΣΤΑ (%)	ΠΡΟΦΙΛ ΜΕΣΑΙΑΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑ ΠΟΣΟΣΤΑ (%)	ΠΡΟΦΙΛ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑ ΠΟΣΟΣΤΑ (%)
Δημιουργία / Εξόρυξη υλικών	0,0056	0,0047	0,0040
Κατεργασίες και Συναρμολόγηση	0,0028	0,00235	0,00200
Μεταφορές	0,0009	0,0008	0,0006
Λειτουργία (45.000 πτήσεις - Μήκους 1.000 km και 500 km)	81,2600	81,25000	81,27
Χειροτέρευση κινητήρα	1,3290	1,33400	1,3155
Συντήρηση	0,0007	0,0006	0,0005
Παραγωγή καυσίμων και λιπαντικών	17,4000	17,4000	17,4
Ανακύκλωση, αποτέφρωση, χωματερή	0,0003	0,0003	0,00023
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ (kt CO₂ eq.)	228	271	318

Τα παραπάνω αποτυπώνονται και στα διαγράμματα της Εικόνας 7-18 (Εικόνα 7-18) και της Εικόνας 7-19 (Εικόνα 7-19). Σύμφωνα με τη δεύτερη, η κατανομή των εκπομπών παραμένει αμετάβλητη και ανεξάρτητη από το προφίλ εμβέλειας.



Εικόνα 7-19 : Σύγκριση ποσοστών κάθε φάσης των κύκλων ζωής της 2ης ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Επιπλέον, όπως και πριν, συντάσσεται ο Πίνακας 7-22 με τα πρόσθετα στοιχεία για τους κύκλους ζωής που μελετήθηκαν στην 2^η Περίπτωση.



Πίνακας 7-22 : Σύγκριση επιπλέον στοιχείων για την 2^η Περίπτωση

	ΜΙΚΡΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑ	ΜΕΣΑΙΑ ΕΜΒΕΛΕΙΑ	ΜΕΓΑΛΗ ΕΜΒΕΛΕΙΑ
Εκπομπές 1 ^{ης} κατηγορίας (Scope 1 Emissions) (kt)	188	224	262
Εκπομπές 2 ^{ης} κατηγορίας (Scope 2 Emissions) (kt)	0,008	0,008	0,009
Εκπομπές 3 ^{ης} κατηγορίας (Scope 3 Emissions) (kt)	40	47	55
ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ (t CO ₂ eq/flight)	6,71	7,97	9,35
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΝΤΡΩΝ (εκατομμύρια)	9,5	11	13
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΔΑΣΩΝ (10.000 m ²)	19.006	22.573	26.486
ECO COST (ανά πτήση) (ευρώ)	778	924	1.084
ECO COST (κύκλου ζωής) (εκατομμύρια ευρώ)	26	31	37

Η ένταση του ανθρακικού αποτυπώματος για κάθε περίπτωση στροβιλοκινητήρα είναι ανάλογη του λόγου r (ώρες λειτουργίας προς κύκλους πτήσεων). Η σχέση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η πλεύση είναι η φάση της λειτουργίας στην οποία το αεροσκάφος διανύει την περισσότερη απόσταση και για την περισσότερη ώρα.

7.9 Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής V2500

Ο I.A.E. (International Aero Engines) V2500 υπήρξε ο μεγάλος αντίπαλος των κινητήρων CFM56. Το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του είναι ότι πρόκειται επίσης για ένα προϊόν συνεργασίας διάφορων κατασκευαστών, όπως ο CFM56. Ως προς τους αμερικάνικους κατασκευαστές, ο V2500 είναι προϊόν της Pratt & Whitney, ενώ ο CFM56, όπως έχει προαναφερθεί, στηρίζεται από την General Electric. Πολλά από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα εμφανίζουν ομοιότητες με εκείνα του CFM56.



Εικόνα 7-20 : Ο στροβιλοκινητήρας V2500

Ο κινητήρας V2500 που θα μελετηθεί, προορίζεται για ένα ευρωπαϊκής προέλευσης αεροσκάφος A320 της Airbus.

7.9.1 Μεταβλητές εισαγωγής

Η ξηρή μάζα (dry weight) του στροβιλοκινητήρα V2500-A5 είναι 2.359 (μόλις 22 χιλιόγραμμα διαφορά από τον CFM56). Σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν στην ενότητα 6.2.1, θα χρησιμοποιηθεί η ίδια καμπύλη λειτουργίας (Εικόνα 6-1) για την εύρεση των εκπομπών του κινητήρα:

Πίνακας 7-23 : Βασικά χαρακτηριστικά V2500-A1

ΜΑΖΑ (DRY WEIGHT) [kg]	2.359	[96]
ΩΣΗ ΑΠΟΓΕΙΩΣΗΣ [N]	111.000	[96], [97]
ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΓΕΙΩΣΗ [kg/N/hr]	0,035	[75]
ΩΣΗ ΠΛΕΥΣΗΣ [N]	22.250 (20% της ονομαστικής)	[74]
ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΣΗ [kg/N/hr]	0,0581 (166% της ονομαστικής)	[74]

Η κατανομή της μάζας του στροβιλοκινητήρα V2500 παρέχεται από ερευνητική μελέτη του M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology) και της N.A.S.A. με χρήση του υπολογιστικού εργαλείου WATE++ (3.2.1) [62].



Πίνακας 7-24 : Κατανομή μάζας του V2530-A5

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΤΜΗΜΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΑΖΑΣ (%)
ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ		25,305
	Ρότορες	30,547
	Στάτορες	23,714
	Δίσκοι	9,727
	Hardware	1,125
	Περιβλήματα	34,887
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ		4,17
	Ρότορες	11,22
	Στάτορες	16,59
	Δίσκοι	28,29
	Hardware	19,02
	Περιβλήματα	24,88
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ		11,31
	Ρότορες	8,63
	Στάτορες	11,33
	Δίσκοι	49,46
	Hardware	9,89
	Περιβλήματα	20,68
ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ		5,74
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ		8,44
	Ρότορες	6,75
	Στάτορες	16,63
	Δίσκοι	36,39
	Hardware	27,95
	Περιβλήματα	12,29
ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ		15,13
	Ρότορες	11,56
	Στάτορες	11,96
	Δίσκοι	26,88
	Hardware	32,26
	Περιβλήματα	17,34
ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ		13,63
	Άξονας υψηλής πίεσης	9,16
	Άξονας χαμηλής πίεσης	51,58
	Άλλα (αγωγοί κ.λπ.)	39,26
ΑΞΕΣΟΥΑΡ		16,27



Ο Πίνακας 7-24 δείχνει το ποσοστό της μάζας που καταλαμβάνει κάθε εξάρτημα του V2500 και δεξιά το ποσοστό της μάζας που καταλαμβάνει κάθε τμήμα του εξαρτήματος στο ίδιο εξάρτημα.

Ο επόμενος πίνακας αναφέρει τις εταιρείες και τα σημεία κατασκευής κάθε εξαρτήματος του V2500 :

Πίνακας 7-25 : Σημεία κατασκευής εξαρτημάτων του V2500

ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	ΧΩΡΑ	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΠΗΓΗ
Ανεμιστήρας	IHI Corporation	Ιαπωνία	Tsurugashima	[98], [99], [100]
Άξονας χαμηλής πίεσης	IHI Corporation	Ιαπωνία	Tsurugashima	[98], [99], [100]
Κάλυμμα ανεμιστήρα	Kawasaki Heavy Industries Aerospace Company	Ιαπωνία	Gifu	[99], [101]
Συμπιεστής χαμηλής πίεσης	Kawasaki Heavy Industries Aerospace Company	Ιαπωνία	Gifu	[99], [101]
Αξεσουάρ (Accessories)	Kawasaki Heavy Industries Aerospace Company	Ιαπωνία	Gifu	[99], [101]
Κάλυμμα συμπιεστή χαμηλής πίεσης	Mitsubishi Heavy Industries	Ιαπωνία	Nagasaki	[99], [102]
Συμπιεστής υψηλής πίεσης	Rolls-Royce	Γερμανία	Dahlewitz	[99]
Κάλυμμα στροβίλου υψηλής πίεσης	Mitsubishi Heavy Industries	Ιαπωνία	Nagasaki	[99], [102]
Θάλαμος Καύσης	Pratt & Whitney	Κονέκτικατ (Connecticut)	Middletown	[99]
Στρόβιλος υψηλής πίεσης	Pratt & Whitney	Κονέκτικατ (Connecticut)	Middletown	[99]
Στρόβιλος χαμηλής πίεσης	MTU Aero Engines	Γερμανία	Langenhagen	[99], [96]
Κιβώτιο ταχυτήτων (external gearbox)	Avio Aero	Ιταλία	Collefero	[99], [97]
Ολική συναρμολόγηση -Τελική	Rolls-Royce ή Pratt & Whitney	Γερμανία ή Κονέκτικατ (Connecticut)	Dahlewitz ή Middletown	[99], [103]

Πηγές : IHI Corporation, MTU Aeroengines, Rolls-Royce, Avio, Kawasaki, Pratt & Whitney

Κανένα εξάρτημα δεν κατασκευάζεται στη Γαλλία, άρα οι εκπομπές των κατεργασιών αναμένονται να είναι υψηλότερες σε σχέση με εκείνες του CFM56. Για τις εκπομπές που οφείλονται στις μεταφορές των εξαρτημάτων στο τελικό προορισμό συναρμολόγησης,



δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 7-26) και εφαρμόζεται η μεθοδολογία του εδαφίου 4.3 (Πίνακας 4-14).

Πίνακας 7-26 : Μεταφορά εξαρτημάτων του V2500

ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΧΩΡΗΣΗΣ	ΣΗΜΕΙΟ ΑΦΙΞΗΣ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ (km)	ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟ ΜΕΣΟ
MTU Aero Engines	Rolls-Royce	278 ή 292	Ρυμουλκό φορτηγό
Avio Aero	Rolls-Royce	47,6	Ρυμουλκό φορτηγό
		1.179	Αερομεταφορά
		18,9 ή 19,3	Ρυμουλκό φορτηγό
Pratt & Whitney	Rolls-Royce	64,3	Ρυμουλκό φορτηγό
		6.225	Αερομεταφορά
		18,9 ή 19,3	Ρυμουλκό φορτηγό
Mitsubishi Heavy Industries	Rolls-Royce	41 ή 42	Ρυμουλκό φορτηγό
		8.707	Αερομεταφορά
		18,9 ή 19,3	Ρυμουλκό φορτηγό
Kawasaki Heavy Industries	Rolls-Royce	70,6	Ρυμουλκό φορτηγό
		8.836	Αερομεταφορά
		18,9 ή 19,3	Ρυμουλκό φορτηγό
IHI Corporation	Rolls-Royce	67,8	Ρυμουλκό φορτηγό
		8.940	Αερομεταφορά
		18,9 ή 19,3	Ρυμουλκό φορτηγό
Rolls-Royce	Airbus	357	Ρυμουλκό φορτηγό

Οι διαδρομές πραγματοποιούνται προς ή από τα κοντινότερα αεροδρόμια της κάθε περιοχής, με τελικό προορισμό το εργοστάσιο της Airbus στο Αμβούργο (Hamburg).



Πίνακας 7-27 : Υλικά και κατεργασίες του V2500

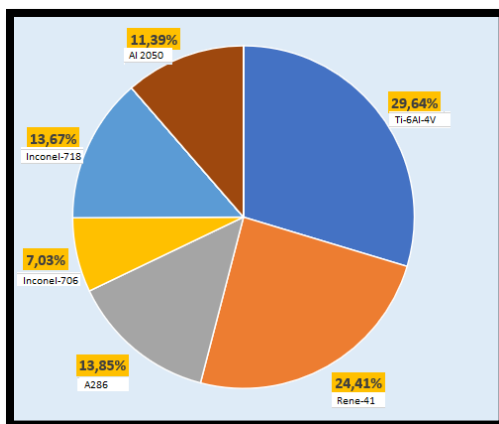
ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ V2500	ΥΛΙΚΑ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΠΗΓΕΣ
Πτερύγια ανεμιστήρα	Ti-6Al-4V	Χύτευση	[104], [105], [106]
Δίσκος ανεμιστήρα	Ti-6Al-4V	Χύτευση	[105], [106]
Περίβλημα / θήκη ανεμιστήρα	Ti-6Al-4V		[105]
Πτερύγια (ρότορες/στάτορες) συμπίεστη χαμηλής πίεσης	Ti-6Al-4V	Χύτευση	[105], [106]
Δίσκος συμπίεστη χαμηλής πίεσης	Ti-6Al-4V		[105]
Τμήματα θαλάμου καύσης – Δομικά στοιχεία (αγωγοί)	Inconel 718		[107]
Κιβώτιο ταχυτήτων	Κράμα αλουμινίου	Χύτευση	[99], [106]
Δίσκοι Στροβίλου υψηλής πίεσης		Κονιομεταλλουργία	[99]
Εξαρτήματα θαλάμου καύσης	Κράμα κοβάλτιου		[99]
Πτερύγια (ρότορες/στάτορες) στροβίλου υψηλής πίεσης	Κράμα νικελίου	Χύτευση	[99], [106]
Δίσκοι Στροβίλου χαμηλής πίεσης	Κράμα νικελίου		[99]
Πτερύγια (ρότορες/στάτορες) Στροβίλου χαμηλής πίεσης	Κράμα νικελίου	Χύτευση	[99], [106]

Πηγές : MTU Aero Engines, Bet Shemesh Engines

Σε αντίθεση με τον CFM56, ο V2500 περιέχει σε πολύ μικρότερη ποσότητα σύνθετα υλικά, η οποία δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

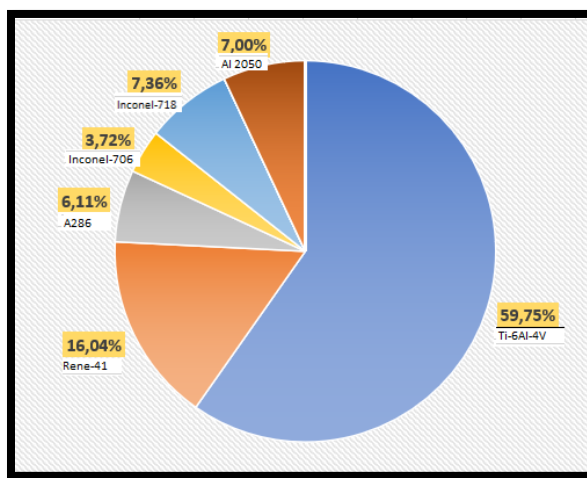
Όλα τα εξαρτήματα του V2500 έχουν διάρκεια ζωής 20.000 κύκλους πτήσεων [108]. Η κατανάλωση των λιπαντικών και ψυκτικών ελαίων λαμβάνεται η ίδια με τον CFM56, ενώ επίσης ίδια θεωρείται και η χειροτέρευση του (5.5.2). Για την απόσυρση του κινητήρα, θα γίνει η υπόθεση ότι το 75% θα ανακυκλωθεί, ενώ το 25% των υλικών θα καταλήξει στη χωματερή [109].

7.9.2 Ανθρακικό αποτύπωμα εξόρυξης και παρασκευής υλικών Ι.Α.Ε. V2500



Εικόνα 7-21 : Κατανομή υλικών στον στροβιλοκινητήρα V2500

Τα διαγράμματα της ενότητας αυτής δείχνουν την κατανομή των υλικών στον στροβιλοκινητήρα V2500 και τις ανθρακικές εκπομπές που οφείλονται σε καθένα από αυτά.



Εικόνα 7-22 : Ανθρακικές εκπομπές λόγω δημιουργίας υλικών του V2500

Σε σχέση με τον CFM56 (Εικόνα 7-1, Εικόνα 7-2) παρατηρείται η απουσία των σύνθετων υλικών και η αύξηση στη χρήση των κραμάτων τιτανίου (Ti-6Al-4V), η οποία αυξάνει τις ανθρακικές εκπομπές.

7.10 Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής CFM LEAP με κηροζίνη

Ο CFM-LEAP είναι ο διάδοχος των κινητήρων CFM56 και τείνει να τον αντικαταστήσει πλήρως. Το μεγάλο του πλεονέκτημα και κύριο χαρακτηριστικό είναι η βελτιωμένη κατανάλωση καυσίμου, εξοικονομώντας 20% σε σχέση με τους κινητήρες της προηγούμενης γενιάς. Ειδικότερα σε σχέση με τον CFM56, η εξοικονόμηση αυτή είναι περίπου 17% [110]. Επίσης μπορεί να υποστηρίξει καθημερινά αεροπορικά ταξίδια 10 ωρών, άρα να λειτουργεί για περίπου 3.500 ώρες το χρόνο [111].



Εικόνα 7-23 : Ο στροβιλοκινητήρας CFM LEAP-1A

Ο CFM LEAP χρησιμοποιείται στα αεροσκάφη A320neo (LEAP-1A), 737 MAX (LEAP-1B), C919 (LEAP 1-C). Στη παρούσα μελέτη περίπτωσης θα μελετηθεί ο LEAP-1A, ο οποίος είναι πιο κοντά στον CFM56-5A.

7.10.1 Μεταβλητές εισαγωγής

Ο κινητήρας CFM LEAP-1A που θα μελετηθεί έχει υγρή μάζα (wet weight) 2.990 χιλιόγραμμα [112], ενώ ο CFM LEAP-1B έχει ξηρή μάζα (dry weight) 2.780 χιλιόγραμμα [113]. Επομένως, θα γίνει η υπόθεση ότι ο CFM LEAP-1A έχει ξηρή μάζα περίπου 2.500 χιλιόγραμμα.

Η βιβλιογραφία δεν παρέχει επαρκείς πληροφορίες για τα υλικά που χρησιμοποιούνται και ούτε είναι γνωστή η κατανομή της μάζας του στροβιλοκινητήρα. Επομένως, η κατανομή της θα θεωρηθεί ότι είναι η ίδια με εκείνη του CFM56 (Πίνακας 3-4), ενώ όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία θα αναζητηθούν στο διαδίκτυο. Γνωστά στοιχεία είναι ότι οι καυστήρες του είναι 25% πιο ελαφριοί από τους αντίστοιχους του CFM56 και ότι το συγκρότημα του ανεμιστήρα έχει μάζα κατά 200 χιλιόγραμμα μικρότερη [111]. Τα υπόλοιπα υλικά ή κατεργασίες θα θεωρηθούν ότι είναι τα ίδια/οι ίδιες με εκείνα/νες του CFM56.



Πίνακας 7-28 : Χαρακτηριστικά του στροβιλοκινητήρα CFM-LEAP

ΤΜΗΜΑ CFM-LEAP	ΥΛΙΚΟ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΠΗΓΗ
Πτερύγια Ανεμιστήρα	Ανθρακονήματα (Carbon Fiber), Κράμα Τιτανίου (Ακμή προσβολής, leading edge)	Μέθοδος Μεταφοράς Ρητίνης (Resin Transfer Molding), Machining	[114], [115]
Περίβλημα ανεμιστήρα	Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites)	Μέθοδος Μεταφοράς Ρητίνης (Resin Transfer Molding), Machining	[114], [116]
Δίσκος ανεμιστήρα	Κράμα Τιτανίου	Χύτευση	[115]
Δίσκοι – Πτερύγια (Blisks) Συμπιεστή Υψηλής Πίεσης	Μεταλλικό κράμα	Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)	[115], [117]
Περιμετρική στεφάνη περυγίων στροβίλου (Turbine Shrouds)	Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites)	Μέθοδος Μεταφοράς Ρητίνης (Resin Transfer Molding), Machining	[116]
Καυστήρες	Μεταλλικό κράμα	Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)	[118]
Θάλαμος Καύσης	Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites)	Μέθοδος Μεταφοράς Ρητίνης (Resin Transfer Molding), Machining	[116]

Πηγές : «FIRST LEAP CORE BEGINS TESTING AS RTM FAN COMPLETES CROSS-WIND, ACOUSTICS TESTING», « A319/A320/A321 TECHNICAL TRAINING MANUAL », «TYPE CERTIFICATE DATA SHEET FOR LEAP-1A, LEAP-1C», « Airbus Gets 1st Production Jet Engines With 3D-Printed Parts From CFM », «Ceramic Matrix Composites taking flight at GE AVIATION – Vol. 98, No. 3»

Ο κινητήρας προορίζεται για χρήση από μία αεροπορική εταιρεία που εξυπηρετεί πτήσεις εντός Ευρώπης από το αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος. Οι τοποθεσίες κατασκευής των εξαρτημάτων παρουσιάζουν ομοιότητες με εκείνες του CFM56 :

Πίνακας 7-29 : Στοιχεία περιοχών κατασκευής του CFM LEAP

ΕΞΑΡΤΗΜΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΡΙΑ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΠΕΡΙΟΧΗ / ΧΩΡΑ / ΠΟΛΙΤΕΙΑ
Τμήματα υψηλής πίεσης (Άξονας, Η.Ρ.Τ., Η.Ρ.Σ.), Θάλαμος Καύσης	General Electric Aviation	Ohio, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής
Ανεμιστήρας, Τμήματα χαμηλής πίεσης (Άξονας, Λ.Ρ.Τ., Λ.Ρ.Σ.), Κιβώτιο ταχυτήτων	Safran (Snecma)	Villaroche, Γαλλία
Δημιουργία σύνθετων υλικών	Albany Safran Composites	New Hampshire, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής Κομερσί (Commercy), Γαλλία
Συναρμολόγηση	Safran	Villaroche, Γαλλία
Προσαρμογή στο αεροσκάφος (Airbus A320neo)	Airbus	Τουλούζη, Γαλλία

Πηγές : «Albany Engineered Composites⁵⁸», «Simple Flying⁵⁹»

⁵⁸ <https://www.albint.com/business/aec/en-us/Pages/Locations.aspx#> (Τελευταία πρόσβαση : 9/6/2023)



Ο προσδιορισμός των μεταφορών (logistics) από περιοχή σε περιοχή θα ακολουθήσει τα ίδια βήματα που περιγράφονται στον Πίνακα 4-14 (Πίνακας 4-14). Εξαιρέση θα αποτελέσουν οι μεταφορές από των σύνθετων υλικών από την Albany Safran Composites στο κάθε αντίστοιχο εργοστάσιο (G.E., Safran).

Δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τη χειροτέρευση του κινητήρα, αλλά επειδή αποτελεί βελτίωση του CFM56, η τιμή B_v (ανώτατη ανοχή χειροτέρευσης) λαμβάνεται ως 2% (αντί για 3% του CFM56-5A), ενώ η διαδοχική γήρανση ανά επισκευή λαμβάνεται ως 0,2% (αντί για 0,3% του CFM56-5A).

Σύμφωνα με τα τωρινά δεδομένα (2022), ένας σύγχρονος κινητήρας της CFM μπορεί να ανακυκλωθεί σε ποσοστό 99% από την Tarmac Aerosave [119], άρα κατοχυρώνονται τα αντίστοιχα ποσοστά για την απόσυρση του CFM LEAP.

Η διάρκεια της ζωής ορισμένων εξαρτημάτων του CFM LEAP είναι μεγαλύτερη από εκείνη του CFM56, όπως δείχνει ο Πίνακας 7-30:

Πίνακας 7-30 : Σύγκριση διάρκεια ζωής εξαρτημάτων CFM56 και CFM LEAP

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ (CFM56) (Κύκλοι Πτήσεων)	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ (CFM LEAP) (Κύκλοι Πτήσεων)
ΠΥΡΗΝΑΣ (CORE)	20.000	20.000
ΤΜΗΜΑΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (LOW PRESSURE)	25.000	30.000

Πηγή : «Taking the LEAP: CFM’s Successor to the Fabulous 56⁶⁰»

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του CFM LEAP-1A παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 7-31):

Πίνακας 7-31 : Χαρακτηριστικά λειτουργίας CFM LEAP-1A23

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΩΣΗ (THRUST AT TAKE-OFF) [N]	106.800
ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΩΣΗ) (THRUST-SPECIFIC FUEL CONSUMPTION) [kg/N/hr]	0,02511
ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΣΗ [kg/N/hr]	0,05184 (s.f.c. / s.f.c.max = 206,4 %)
ΩΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΤΗΣΗ [N]	17.088 ($F_N/F_{Nmax} = 16\%$)

Πηγή : «I.C.A.O Aircraft Emissions Databank⁶¹»

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου δε δίνεται αυτούσια, αλλά υπολογίζεται βάσει των πληροφοριών του ακόλουθου πίνακα :

⁵⁹ <https://simpleflying.com/cfm-leap-engine-advantages/> (Τελευταία πρόσβαση : 9/6/2023)

⁶⁰ <https://www.aviationpros.com/engines-components/aircraft-engines/turbine-engines-parts/article/12328944/taking-the-leap-cfms-successor-to-the-fabulous-56> (Τελευταία πρόσβαση : 9/6/2023)

⁶¹ <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank> (Τελευταία πρόσβαση : 9/6/2023)



Πίνακας 7-32 : Κατανάλωση καυσίμου CFM LEAP-1A

ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΩΣΗ (ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ) [%]	ΩΣΗ (N)	ΠΑΡΟΧΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [kg/s]	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [kg/N/hr]	s.f.c. / s.f.c.max [%]
100	106.800	0,745	0,02511	100
85	94.938	0,616	0,02336	93,03
60 ⁶²	64.080	0,417	0,02343	93,32
30	32.040	0,219	0,02460	97,99
7	7.476	0,087	0,04189	166,83

Πηγή : «I.C.A.O. Aircraft Emissions Databank»

Η σχέση υπολογισμού είναι η ακόλουθη :

$$S.F.C.(F\%) = \frac{m_f(F\%) \cdot 3600}{F_{\%}} \left[\frac{kg}{N \cdot hr} \right] \quad (4.1)$$

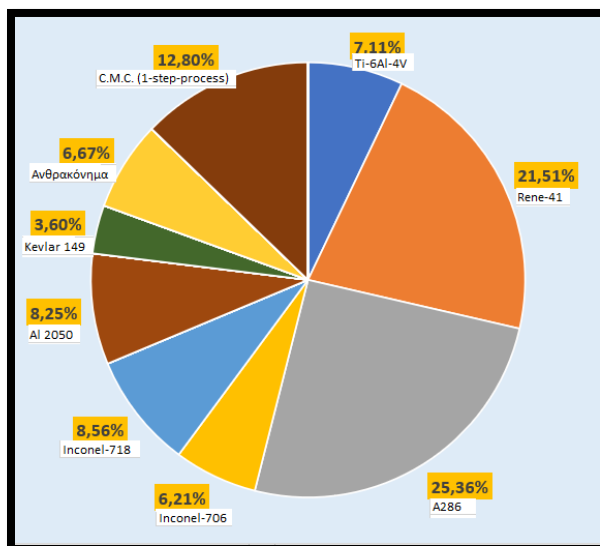
Όπου m_f είναι η παροχή του καυσίμου σε kg/s και $F_{\%}$ είναι η ώση στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας σε N . Στο «Turbomachine CO₂ Calculator» εισάγονται τα δεδομένα του τέταρτου πίνακα (*s.f.c. / s.f.c.max*), που δείχνουν τη ποσοστιαία σχέση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Consumption) με εκείνη της ονομαστικής ώσης.

Για δοκιμή των παραπάνω, γίνεται ο υπολογισμός των εκπομπών κατά τον κύκλο της προσγείωσης-απογείωσης, σύμφωνα με το πρότυπο της Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (I.C.A.O) (Πίνακας 5-1). Για τον CFM LEAP-1A23 η Τράπεζα Δεδομένων (Databank) της I.C.A.O. δίνει ως τιμή καταναλωμένου καυσίμου 301 χιλιόγραμμα. Η χρήση του Turbomachine CO₂ Calculator δίνει τη ποσότητα αυτή ίση με 295 χιλιόγραμμα. Το σφάλμα είναι μικρότερο του 2%, οπότε τα δεδομένα είναι ικανοποιητικά όπως είναι, και το υπολογιστικό εργαλείο αποδεικνύεται ξανά αξιόπιστο.

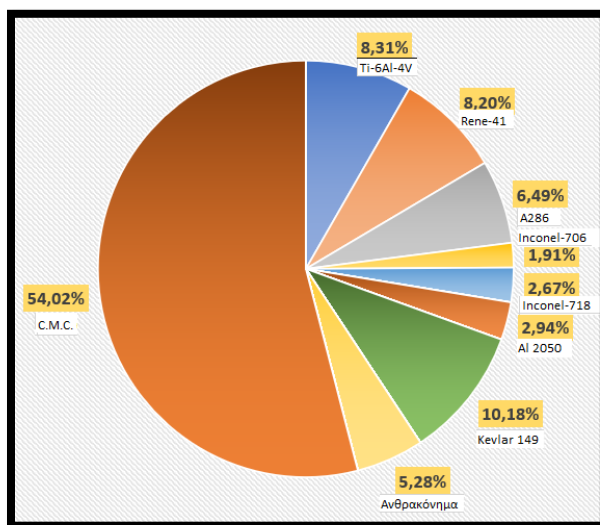
Όπως έχει προαναφερθεί (5.5.2), ο CFM LEAP1-B εκτιμάται ότι καταναλώνει 48,25 λίτρα λιπαντικού σε ένα μήνα λειτουργίας [65]. Γίνεται η παραδοχή ότι η ίδια τιμή ισχύει και για τον CFM LEAP-1A23, άρα δηλαδή ότι ο κινητήρας καταναλώνει περίπου 0,185 χιλιόγραμμα λιπαντικού σε μία ώρα λειτουργίας.

⁶² Εκτίμηση του συγγραφέα.

7.10.2 Ανθρακικό αποτύπωμα εξόρυξης και παρασκευής υλικών CFM LEAP



Εικόνα 7-24 : Κατανομή υλικών του στροβιλοκινητήρα CFM LEAP



Εικόνα 7-25 : Ανθρακικό αποτύπωμα υλικών του CFM LEAP

Η παρατήρηση των παραπάνω κατανομών δείχνει τη μεγάλη επιρροή που έχουν τα προηγμένα υλικά στις ανθρακικές εκπομπές. Η μικρή σχετικά χρήση C.M.C. δίνει ποσοστιαίο ανθρακικό αποτύπωμα που ξεπερνά τα κράματα τιτανίου και τα υπόλοιπα σύνθετα υλικά. Το Kevlar-149, επίσης σύνθετο υλικό, καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση. Τονίζεται ότι για σύγκριση με τους άλλους κινητήρες, έγινε η γνωστή υπόθεση 25% παρθένου και 75% ανακυκλωμένου υλικού. Για 95% ανακύκλωση οι εκπομπές πέφτουν μόλις στους 6 τόνους (πτώση 78%) περίπου.



7.11 Ενδεικτική παρουσίαση ανθρακικού αποτυπώματος κύκλου ζωής των κινητήρων

Έως τώρα, ανατρέχοντας τη βιβλιογραφία και τις σχετικές μελέτες, ήταν εφικτό να μπορεί να γίνει κάποιου είδους επαλήθευση της διαδικασίας υπολογισμού του ανθρακικού αποτυπώματος του CFM56-5A. Το ίδιο δεν ισχύει για τους στροβιλοκινητήρες I.A.E. V2500-A1 και CFM LEAP-1A, για τους οποίους οι σχετικές πληροφορίες είναι ανεπαρκείς.

Λόγω της παραπάνω αδυναμίας, εις το εξής ορίζονται οι υποθετικοί κινητήρες «Κινητήρας 1», «Κινητήρας 2» και «Κινητήρας 3». Οι δύο πρώτοι προσιδιάζουν τους στροβιλοκινητήρες CFM56-5A και I.A.E. V2500-A1 αντίστοιχα, έχοντας τις ιδιότητες που έχουν παρουσιαστεί έως τώρα στην εργασία. Ο «Κινητήρας 3» προσιδιάζει τον CFM-LEAP, ξανά σύμφωνα με τις προσεγγίσεις που έχουν γίνει στην εργασία αυτή. Ο επόμενος πίνακας (Πίνακας 7-33) παρουσιάζει το ανθρακικό αποτύπωμα των τριών στροβιλοκινητήρων που αναφέρθηκαν. Το αποτύπωμα κάθε περίπτωσης μπορεί να αναπαρασταθεί και με τη βοήθεια των επόμενων εικόνων (Εικόνα 7-26, Εικόνα 7-27). Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται η κηροζίνη ως καύσιμο.

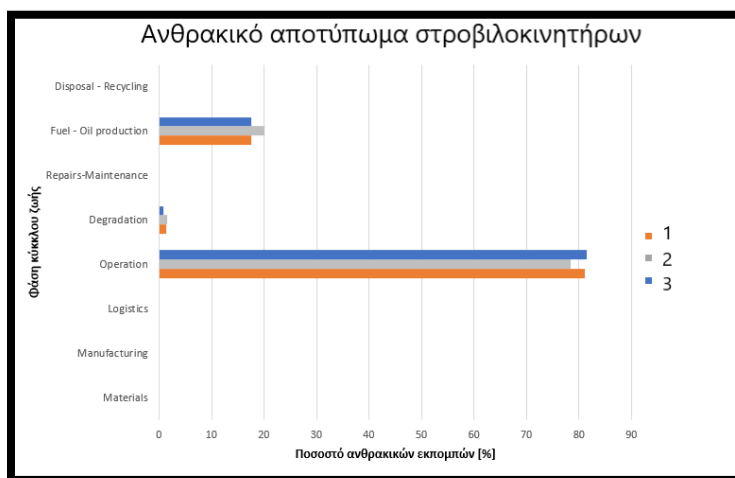
Σημειώνεται εδώ ότι τα μεγέθη που παρουσιάζονται δεν μπορούν σε καμιά περίπτωση να θεωρηθούν ακριβή, δεδομένου ότι προέκυψαν από στοιχεία που έχουν ληφθεί μετά από σειρά προσεγγίσεων και παραδοχών. Το μόνο συμπέρασμα που μπορεί να συναχθεί με ασφάλεια είναι το ότι ο πιο σύγχρονος από τους τρεις παρουσιάζει μια σημαντική μείωση ανθρακικού αποτυπώματος σε σύγκριση με τους παλαιότερους. Μάλιστα δε αυτό προκύπτει ουσιαστικά από τη βελτιωμένη κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα αυτού.

Η παρουσίαση αυτή είναι περισσότερο χρήσιμη για να πιστοποιήσει τις δυνατότητες της μεθοδολογίας που συγκροτήθηκε στην παρούσα εργασία, παρά για τα όποια συγκεκριμένα αριθμητικά μεγέθη παράγει. Εφόσον βέβαια είναι δυνατόν να συγκεντρωθούν αξιόπιστα στοιχεία για όλες τις επί μέρους κατηγορίες εκπομπών, τα αποτελέσματα θα ήταν ποσοτικά ακριβέστερα. Υπό το πρίσμα αυτό και μόνο μπορούν να γίνουν κάποια σχόλια επί των αποτελεσμάτων.



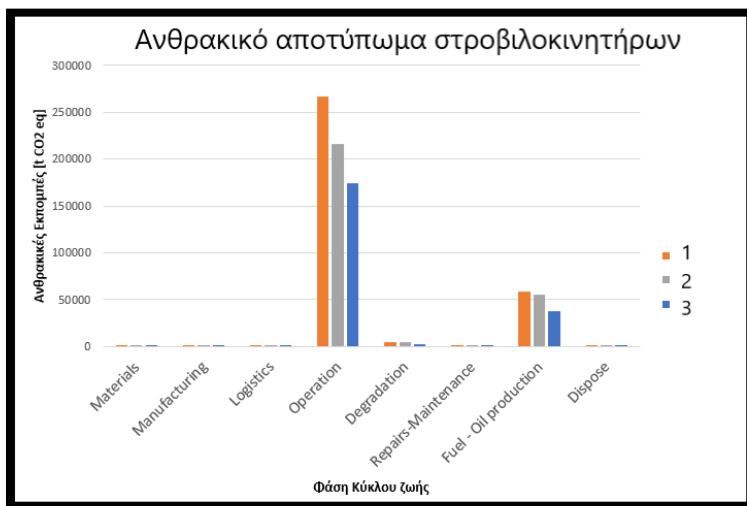
Πίνακας 7-33 : Ενδεικτική παρουσίαση ανθρακικού αποτυπώματος τριών στροβιλοκινητήρων

Φάση Κύκλου Ζωής	Κινητήρας 1	Κινητήρας 2	Κινητήρας 3
Υλικά [%]	0,0039	0,0045	0,01
Κατεργασίες [%]	0,0020	0,0045	0,0036
Μεταφορές [%]	0,0006	0,003	0,0013
Λειτουργία [%]	81,05	78,41	81,47
Χειροτέρευση [%]	1,3063	1,53	0,88
Συντήρηση [%]	0,0006	0,001	0,001
Καύσιμα – Έλαια ψύξης/λίπανσης [%]	17,6	20,04	17,64
Απόσυρση [%]	0,00023	0,00042	0,0009
Συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα [t CO2 eq]	329	276	214
Εκπομπές κατηγορίας 1 [kt CO2 eq]	271	220	176
Εκπομπές κατηγορίας 2 [kt CO2 eq]	0,009	0,015	0,010
Εκπομπές κατηγορίας 3 [kt CO2 eq]	58	56	38
Λόγος EFH / EFC	1,47	1,47	1,47
Ένταση ανθρακικού αποτυπώματος Levelized Carbon Intensity [t CO2 / flight]	7,31	6,13	4,75
Eco-cost: Κύκλος ζωής [Euros] (εκατομμύρια)	38	32	25
Αναλογία σε δέντρα (εκατομμύρια)	14	11	9
Αναλογία σε δάση	27.430	22.977	17.823



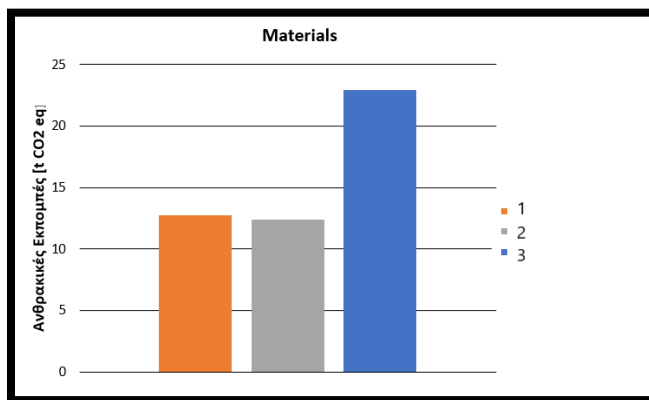
Εικόνα 7-26 : Ποσοστιαία κατανομή ανθρακικών εκπομπών στροβιλοκινητήρων

Η Εικόνα 7-26 δείχνει ότι οι εκπομπές ανά φάση κατανέμονται με τον ίδιο τρόπο ανεξάρτητα της τεχνολογίας και της χρονολογίας κατασκευής κάθε στροβιλοκινητήρα.

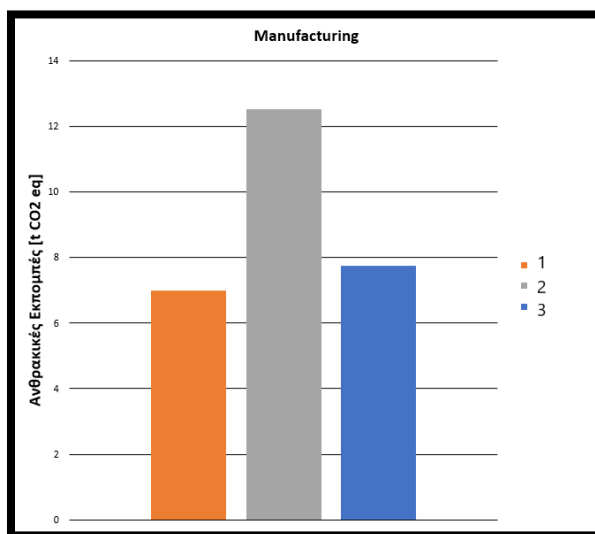


Εικόνα 7-27 : Εκπομπές κάθε φάσης κύκλου ζωής των στροβιλοκινητήρων

Η Εικόνα 7-27 μαζί με τα δεδομένα του προηγούμενου πίνακα απεικονίζει τη μεγάλη σημασία της φάσης της λειτουργίας στο ανθρακικό αποτύπωμα του κύκλου ζωής του στροβιλοκινητήρα. Ο «Κινητήρας 3», ως εξέλιξη πολλών σταδίων των δύο προηγούμενων, μειώνει την κατανάλωση (άρα και τις ανθρακικές εκπομπές) κατά 34% περίπου. Στο στάδιο των υλικών μεγαλύτερο ρόλο παίζει η μάζα του στροβιλοκινητήρα και το είδος των υλικών που αξιοποιούνται (Εικόνα 7-28).



Εικόνα 7-28 : Ανθρακικές εκπομπές παραγωγής υλικών στροβιλοκινητήρων



Εικόνα 7-29 : Ανθρακικές εκπομπές κατεργασιών εξαρτημάτων στροβιλοκινητήρων

Η Εικόνα 7-29 δείχνει επίσης, για άλλη μια φορά, το ρόλο που παίζει η χώρα κατεργασίας και συναρμολόγησης του στροβιλοκινητήρα, αφού ο λογισμός των ανθρακικών εκπομπών στο στάδιο αυτό εξαρτάται από το ενεργειακό μίγμα της κατασκευάστριας χώρας. Ο «Κινητήρας 2» αποτελεί προϊόν συνεργασίας τριών ηπείρων και αυτό αποτυπώνεται και στις ανθρακικές εκπομπές στο στάδιο των κατεργασιών.



7.12 Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής CFM LEAP με υδρογόνο

Στη περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται ένας κινητήρας CFM LEAP ο οποίος προωθεί το αεροσκάφος με χρήση υδρογόνου ως καύσιμο. Σαφώς η περίπτωση αυτή είναι θεωρητική, διότι ο εφοδιασμός με υδρογόνο απαιτεί ολική αναδιαμόρφωση του αεροσκάφους και του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου (13.1.3).

7.12.1 Μεταβλητές εισαγωγής

Το κομμάτι αυτό της εργασίας στηρίζεται στην εργασία του Κοράκη Χ. [70], στην οποία μελετήθηκε η επίδραση των βιοκαυσίμων και του υδρογόνου στις επιδόσεις στροβιλοκινητήρων της πολιτικής αεροπορίας. Σε αυτήν, για τον CFM LEAP-A26 βρέθηκαν τα επόμενα :

ΦΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΠΤΗΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ ΩΣΗΣ ΜΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ [%]	ΑΡΧΙΚΗ ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [kg/N/hr]	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ [%]	ΤΕΛΙΚΗ ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ [kg/N/hr]	ΝΕΟ s.f.c. / s.f.c.max [%]
Απογείωση (Take Off)	100	0,02511	-63,40	0,00919	100
Άνοδος – Στροφή (Climb out)	85	0,02336	-64,20	0,00836	90,97
Ανάβαση (Climb)	60	0,02343	-64,25	0,00838	91,19
Πλεύση (Cruise)	16	0,05184	-64,55	0,01837	199,9
Κατάβαση (Descent) / Προσγείωση (Landing)	30	0,02460	-64,30	0,00878	95,55
Τροχοδρόμηση (Taxiing) ⁶³	7	0,04189	-64,00	0,015	163,22

Πηγή : «Λειτουργία Κινητήρων Turbofan Πολιτικών Αεροσκαφών με Καύσιμα από Ανανεώσιμες Πηγές: Υδρογόνο, Βιοκαύσιμα»

⁶³ Υπόθεση του συγγραφέα.ψω



ΦΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΠΤΗΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ ΩΣΗΣ ΜΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ [%]	ΑΡΧΙΚΗ ΩΣΗ [N]	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΛΟΓΩ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ [%]	ΤΕΛΙΚΗ ΩΣΗ [N]	ΝΕΟ F_n / F_{nmax} [%]
Απογείωση (Take Off)	100	106.800	+ 4,2	111.286	100
Άνοδος – Στροφή (Climb out)	85	94.938	+ 5,4	100.064	89,92
Ανάβαση (Climb)	60	64.080	+ 5,6	67.669	60,8
Πλεύση (Cruise)	16	17.088	+ 5,3	17.994	16,17
Κατάβαση (Descent) / Προσγείωση (Landing)	30	32.040	+ 5,2	33.706	30,28
Τροχοδρόμηση (Taxiing) ⁶⁴	7	7.476	+5,0	7.849,8	7

Πηγή : «Λειτουργία Κινητήρων Turbofan Πολιτικών Αεροσκαφών με Καύσιμα από Ανανεώσιμες Πηγές: Υδρογόνο, Βιοκαύσιμα»

Παρατηρείται ότι η κατανάλωση του καυσίμου γίνεται πολύ μικρότερη, ενώ επίσης αλλάζει η σχέση που έχει με την ώση.

Ως τελική μεταβλητή εισαγωγής, μεταβάλλονται οι παράμετροι της χειροτέρευσης του κινητήρα. Γίνεται η υπόθεση ότι οι θερμικές καταπονήσεις θα είναι συχνότερες και έτσι μεταβάλλεται το όριο της χειροτέρευσης σε $B_n = 10\%$ και η πρώτη επισκευή επαναφέρει τον κινητήρα σε κατάσταση με χειροτέρευση 0,5%.

7.12.2 Ανθρακικό αποτύπωμα CFM LEAP 1-A με υδρογόνο

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται υδρογόνο ως καύσιμο, οι ανθρακικές εκπομπές λειτουργίας μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές. Εξαιρούνται από τους υπολογισμούς η πιθανή αύξηση στις εκπομπές NOx και H₂O (12.1) και η επίδραση τους στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής.

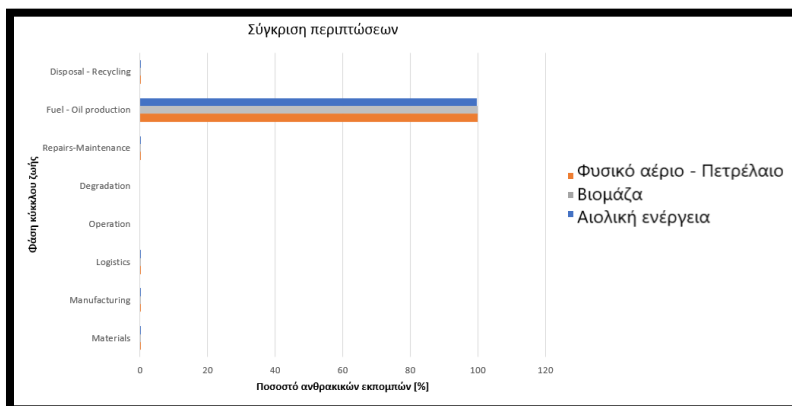
Τα συμπεράσματα από τη μελέτη του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7-34) και των διαγραμμάτων (Εικόνα 7-30, Εικόνα 7-31) είναι ότι η χρήση υδρογόνου μετατοπίζει το βάρος των ανθρακικών εκπομπών στις εκπομπές της τρίτης κατηγορίας που περιλαμβάνουν την δημιουργία των καυσίμων. Οι εκπομπές λόγω της παραγωγής των καυσίμων καταλαμβάνουν σχεδόν το 100% των εκπομπών του κύκλου ζωής του αεροσκάφους. Η παραγωγή του υδρογόνου μέσω συμβατικών μεθόδων, δηλαδή θερμικών σταθμών με καύσιμο φυσικό αέριο ή πετρελαιομηχανών, οδηγεί σε εκπομπές ανάλογες της χρήσης του παλιού, πλέον, CFM56! Η αύξηση των εκπομπών σε σχέση με τη χρήση κηροζίνης στον CFM LEAP 1-A είναι περίπου 40%.

⁶⁴ Υπόθεση του συγγραφέα.

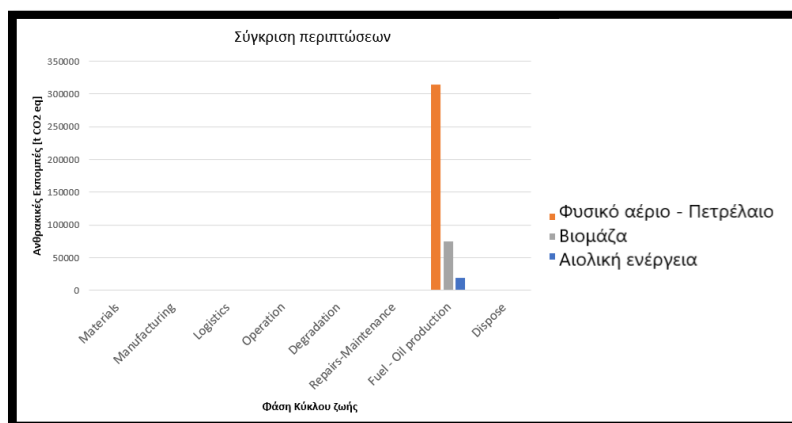


Πίνακας 7-34 : Σύγκριση ανθρακικού αποτυπώματος CFM LEAP-1A για χρήση υδρογόνου

Φάση Κύκλου Ζωής	Φυσικό αέριο- Πετρέλαιο	Βιομάζα	Αιολική ενέργεια
Παραγωγή – Εξόρυξη υλικών [%]	0,01	0,03	0,12
Κατεργασίες - Συναρμολόγηση [%]	0,002	0,01	0,04
Μεταφορές [%]	0,0009	0,004	0,02
Λειτουργία [%]	-	-	-
Χειροτέρευση [%]	-	-	-
Συντήρηση [%]	0,0007	0,003	0,01
Παραγωγή καυσίμων / λιπαντικών [%]	99,99	99,95	99,80
Απόσυρση [%]	0,0006	0,003	0,01
Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής [t CO2 eq]	314	75	19
Ανθρακικές εκπομπές 1 ^{ης} κατηγορίας (Scope 1 Emissions) [kt CO2 eq]	-	-	-
Ανθρακικές εκπομπές 2 ^{ης} κατηγορίας (Scope 2 Emissions) [kt CO2 eq]	0,01	0,01	0,01
Ανθρακικές εκπομπές 3 ^{ης} κατηγορίας (Scope 3 Emissions) [kt CO2 eq]	314	75	19
Λόγος EFH / EFC Ratio	1,47	1,47	1,47
Ένταση Ανθρακικού Αποτυπώματος [t CO2 / flight]	6,99	1,66	0,42
Eco-cost: Life Cycle [Euros] (εκατομμύρια)	37	9	2
Αντιστοιχία δέντρων (εκατομμύρια)	13	3	0,8
Αντιστοιχία δασών	26.208	6.243	1.563



Εικόνα 7-30 : Ποσοστιαία κατανομή εκπομπών για χρήση υδρογόνου ως καύσιμο



Εικόνα 7-31 : Ανθρακικό αποτύπωμα για χρήση υδρογόνου ως καύσιμο

Η **Εικόνα 7-30** απεικονίζει την κυριαρχία των εκπομπών παραγωγής των καυσίμων στην περίπτωση χρήσης καυσίμου υδρογόνου. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή του υδρογόνου μειώνει σημαντικά τις ανθρακικές εκπομπές του κύκλου ζωής του στροβιλοκινητήρα, επιτυγχάνοντας μείωση 94% σε σχέση με τη χρήση συμβατικών μεθόδων (πετρέλαιο-φυσικό αέριο). Μια καλή και ρεαλιστική εναλλακτική λύση είναι η χρήση βιομάζας, η οποία επιτυγχάνει μείωση 76% στις ανθρακικές εκπομπές του κύκλου ζωής.

Δυο παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι πρώτον, ότι η χρήση υδρογόνου μεταφέρει την ευθύνη για τις ανθρακικές εκπομπές στους δημιουργούς των καυσίμων. Επομένως η μελέτη του ανθρακικού αποτυπώματος οδηγείται στα όρια του συστήματος που έχουν οριστεί. Δεύτερον, παρόλο που η χρήση υδρογόνου μειώνει σημαντικά τις ανθρακικές εκπομπές του κύκλου ζωής, αυτές παραμένουν υψηλές (ισοδύναμες με τουλάχιστον 1.500 δάση).



7.12.3 Παραγωγή υδρατμών

Έως τώρα δεν έχει εξεταστεί η επίδραση των υδρατμών (H₂O) στην υπερθέρμανση του πλανήτη, παρόλο που οι ίδιοι αποτελούν αέρια του θερμοκηπίου. Ο λόγος της παράλειψης αυτής είναι εξαιτίας του αμελητέου τους δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (G.W.P. : Global Warming Potential). Σύμφωνα με τον Πίνακα 12-1 (Πίνακας 12-1) η μέγιστη τιμή τους είναι μόλις 0,0005. Δηλαδή όσον αφορά την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, η εκπομπή ενός μορίου H₂O ισοδυναμεί με την εκπομπή 0,0005 μορίων CO₂.

Η μελέτη των εκπεμπόμενων υδρατμών κατά την καύση έχει περισσότερη αξία κατά τη χρήση του υδρογόνου, διότι η παραγωγή των συμπυκνωμάτων είναι 2,5 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την καύση απλής κηροζίνης [70].

Ο συντελεστής (ή δείκτης) εκπομπών των υδρατμών κατά την καύση της κηροζίνης είναι περίπου 1,23 χιλιογράμμο ανά 1 χιλιόγραμμο καίμενης κηροζίνης [120]. Άρα στην περίπτωση που καίγεται υδρογόνο, ο συντελεστής παίρνει τιμή 3,075. Οπότε οι εκτιμήσεις θα στηριχθούν στην ποσότητα του καυσίμου που καταναλώθηκε. Δημιουργείται έτσι ο Πίνακας 7-35 που συγκρίνει την εκπεμπόμενη ποσότητα υδρατμών σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 7-35 : Παραγωγή υδρατμών στον CFM LEAP-1A

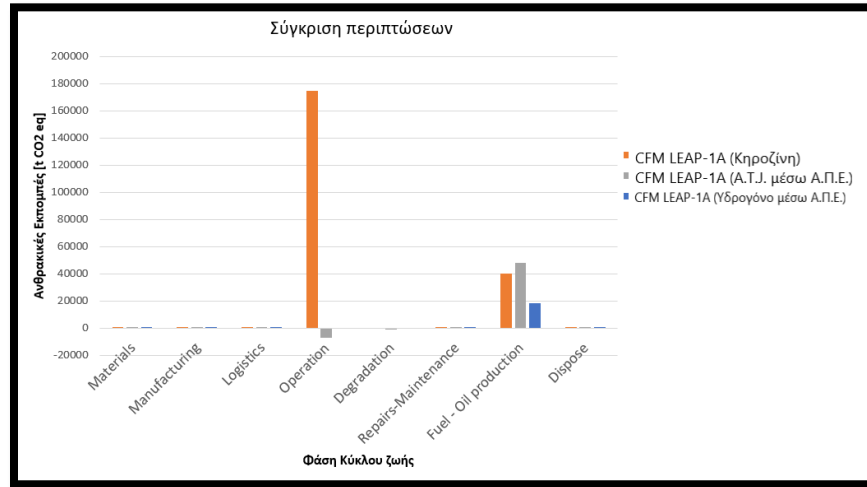
ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	CFM56-5A	I.A.E. V2500-A1	CFM LEAP-1A (κηροζίνη)	CFM LEAP-1A (υδρογόνο)
ΚΑΥΣΙΜΟ ⁶⁵ [kt]	86	70	56	23
ΠΟΣΟΤΗΤΑ CO ₂ [kt]	271	220	176	-
ΠΟΣΟΤΗΤΑ H ₂ O [kt]	106	86	69	70
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ H ₂ O με CO ₂ eq [t]	53	43	35	35
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ CO ₂ με δέντρα (εκατομμύρια)	11	9	7	-
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ H ₂ O με δέντρα	2.208	1.792	1.458	1.458
ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ H ₂ O με δάση	4	4	3	3

Η μείωση στο καύσιμο που καταναλώνεται αντισταθμίζει τις εκπομπές υδρατμών. Δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή τους λόγω της χρήσης υδρογόνου και συνεπώς δεν αυξάνεται ο κίνδυνος του φαινομένου του θερμοκηπίου λόγω της μεγαλύτερης εκπομπής υδρατμών.

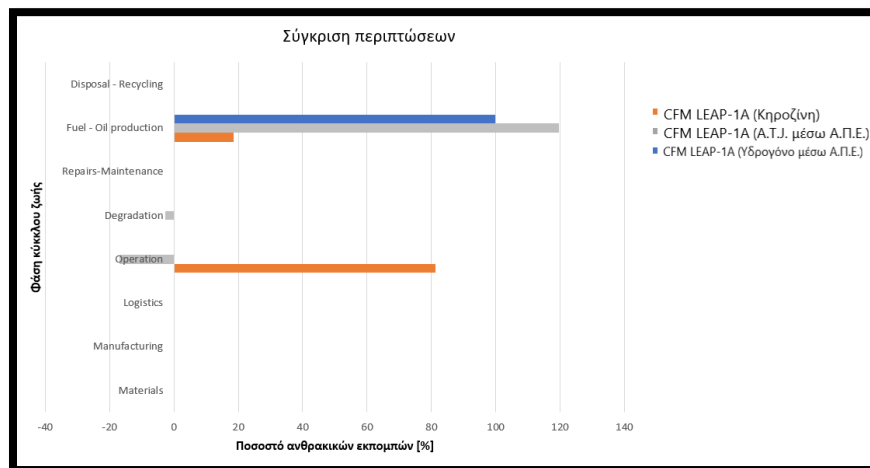
⁶⁵ Συμπεριλαμβάνεται και το καύσιμο που καταναλώνεται λόγω χειροτέρευσης

7.13 Ανθρακικό αποτύπωμα CFM LEAP 1-A με εναλλακτικά καύσιμα

Στο εδάφιο αυτό γίνεται μία σύντομη σύγκριση στις ανθρακικές εκπομπές του κύκλου ζωής του CFM LEAP-1A, με τα καλύτερα δυνατά σενάρια για τα καύσιμα.



Εικόνα 7-32 : Ανθρακικές εκπομπές φάσεων για διάφορα καύσιμα CFM LEAP-1A



Εικόνα 7-33 : Ποσοστιαία κατανομή ανθρακικών εκπομπών φάσεων για διάφορα καύσιμα CFM LEAP-1A

Παρατηρείται ότι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή των καυσίμων, μειώνει σημαντικά τις εκπομπές του κύκλου ζωής του στροβιλοκινητήρα.



Ο Πίνακας 7-36 παρουσιάζει οργανωμένα τα ευρήματα του εδαφίου. Επιβεβαιώνεται ξανά ότι παρόλο που εκ πρώτης όψεως η μείωση στις ανθρακικές εκπομπές φαίνεται μεγάλη, αυτές παραμένουν υψηλές ακόμη και για το πιο αισιόδοξο σενάριο (περίπου 1.600 δάση για την παραγωγή υδρογόνου μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας).

Πίνακας 7-36 : Σύγκριση χρήσης διάφορων καυσίμων στον CFM LEAP-1A

Φάση Κύκλου Ζωής	Κηροζίνη	Βιοκαύσιμο (Α.Π.Ε.)	Α.Τ.Ι.	Υδρογόνο (Α.Π.Ε.)
Παραγωγή – Εξόρυξη υλικών [%]	0,01		0,06	0,12
Κατεργασίες - Συναρμολόγηση [%]	0,00		0,02	0,04
Μεταφορές [%]	0,00		0,01	0,02
Λειτουργία [%]	81,38		- 16,85	-
Χειροτέρευση [%]	-		- 2,77	-
Συντήρηση[%]	0,00		0,01	0,01
Παραγωγή καυσίμων / λιπαντικών [%]	18,60		119,52	99,80
Απόσυρση [%]	0,00		0,00	0,01
Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής [kt CO ₂ eq]	215	40		19
Ανθρακικές εκπομπές 1 ^{ης} κατηγορίας [kt CO ₂ eq]	175	-8		-
Ανθρακικές εκπομπές 2 ^{ης} κατηγορίας [kt CO ₂ eq]	0,001	0,001		0,001
Ανθρακικές εκπομπές 3 ^{ης} κατηγορίας [kt CO ₂ eq]	40	48		19
Λόγος EFH / EFC	1,47	1,47		1,47
Ένταση ανθρακικού αποτυπώματος [t CO ₂ / flight]	4,78	0,89		0,42
Eco-cost: Life Cycle [Euros] (εκατομμύρια)	25	5		2
Αντιστοιχία δέντρων (εκατομμύρια)	9	2		0,8
Αντιστοιχία δασών	17.922	3.352		1.563



7.14 Συζήτηση

Η πλειονότητα των ερευνητικών εργασιών που αφορούν το ανθρακικό αποτύπωμα της αεροπορίας δεν εστιάζει στον κύκλο ζωής του στροβιλοκινητήρα, αλλά επιδιώκει να μελετήσει τη ζωή ολόκληρου του αεροσκάφους. Μια τέτοια προσέγγιση είναι απολύτως λογική · ο στροβιλοαντιδραστήρας εκτελεί έναν όμοιο ρόλο με έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης στο αυτοκίνητο. Εντούτοις, η ειδική αυτή προσέγγιση αποτυγχάνει να αναδείξει όλες τις πτυχές του ανθρακικού αποτυπώματος του στροβιλοκινητήρα, αφήνοντας στάδια όπως την κατασκευή του στο «παρασκήνιο».

Ένας στροβιλοκινητήρας διαφέρει σημαντικά από μία μηχανή εσωτερικής καύσης ενός αυτοκινήτου. Αρχικά, είναι ένα ξεχωριστό προϊόν, το οποίο μπορεί να διαφημίζεται και να προωθείται στους κατασκευαστές των αεροσκαφών. Αντίθετα, ένας κινητήρας αυτοκινήτου, τις περισσότερες φορές, δημιουργείται από τον ίδιο τον κατασκευαστή.

Τα αεροσκάφη κτίζονται κυρίως με στόχο τη ταχύτητα και την εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας. Και οι δύο παράγοντες αυτοί εξαρτώνται άμεσα από τον στροβιλοκινητήρα που θα προωθήσει το αεροσκάφος. Οι επιδόσεις των αυτοκινήτων επίσης εξαρτώνται από τον κινητήρα που τα κινεί, αλλά η σχεδίαση ολόκληρου του αυτοκινήτου δεν εξαρτάται από αυτόν (π.χ. αρχιτεκτονικός σχεδιασμός, ασφάλεια).

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που τους διαφοροποιεί είναι το μέγεθος και το βάρος τους. Το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του τυπικού αυτοκινήτου αδυνατεί να ξεπεράσει το αποτύπωμα ενός στροβιλοκινητήρα. Ενδεικτικά, το ολικό ανθρακικό αποτύπωμα ενός αυτοκινήτου (ηλεκτρικού ή συμβατικού) κυμαίνεται από 5,5 έως 49,6 τόνους ισοδύναμου άνθρακα [121]. Για τον CFM56-5A, αγνοώντας τις εκπομπές παραγωγής καυσίμου και λειτουργίας, το ανθρακικό αποτύπωμα φτάνει τους 23,7 τόνους ισοδύναμου άνθρακα (Πίνακας 7-17).

Είναι εύλογη επομένως η μελέτη του ανθρακικού αποτυπώματος ενός στροβιλοκινητήρα. Η μελέτη του ως προϊόν και η εφαρμογή των κανόνων της μελέτης ανθρακικού αποτυπώματος, βοηθούν να διαλευκανθεί η επιρροή του στις ανθρακικές εκπομπές της πολιτικής αεροπορίας.

Κλείνοντας πρέπει να αναφερθεί ότι η μελέτη του αποτυπώματος του αεροσκάφους έχει το πλεονέκτημα της καλύτερης ανάλυσης της λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα. Η παρούσα εργασία δεν έχει λάβει υπόψιν επιρροές όπως το μεταβαλλόμενο βάρος του αεροσκάφους ή των επιβατών. Οι υπολογισμοί που έχουν προηγηθεί θα μπορούσαν να συγκριθούν με τις μετρήσεις καυσαερίων κινητήρων σε ένα επίγειο εργαστήριο δοκιμών. Οι μετρήσεις όμως αυτές έχουν πάντα τη πιθανότητα να διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές των πραγματικών συνθηκών πτήσης.

Από την άλλη, η εμβάθυνση στο ανθρακικό αποτύπωμα του στροβιλοκινητήρα είναι πολύ χρήσιμη στις περιπτώσεις όπου οι εκπομπές της λειτουργίας μπορούν να αντισταθμιστούν ή να εξαφανιστούν πλήρως (βιοκαύσιμα-υδρογόνο) και τη βαρύτητα τους λαμβάνουν οι εκπομπές των υπολοίπων σταδίων του κύκλου ζωής.



7.15 Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκαν τα ευρήματα για το ανθρακικό αποτύπωμα του στροβιλοκινητήρα CFM56 και αυτά συγκρίθηκαν με εκείνα που μπορούν να προκύψουν από αλλαγές στον κύκλο ζωής και με τα ευρήματα από τον κύκλο ζωής άλλων στροβιλοκινητήρων. Επίσης μελετήθηκε η περίπτωση χρήσης εναλλακτικών και προηγμένων καυσίμων.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων των υπολογισμών οδηγεί σε συμπεράσματα ειδικά για τον κινητήρα CFM56 αλλά και για τη βιομηχανία – λειτουργία των στροβιλοκινητήρων γενικότερα.

Τα υλικά τα οποία αποτελούν τον στροβιλοκινητήρα CFM56 είναι από τα πιο προηγμένα, ενώ επίσης απαιτούν αρκετά σπάνια μέταλλα [34] λόγω των ιδιοτήτων τους. Δυστυχώς οι μέθοδοι εύρεσης, ανασκαφής και επεξεργασίας των μετάλλων αυτών είναι επιβαρυντικές για το περιβάλλον και αυτό φαίνεται στους συντελεστές των ανθρακικών εκπομπών τους (Πίνακας 4-3). Όσο μεγαλύτερος και βαρύτερος είναι ο στροβιλοκινητήρας, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα υλικών χρειάζεται στη δόμηση του, άρα αυξάνεται το ανθρακικό αποτύπωμα. Ανάλογα αυξάνονται και οι εκπομπές όταν παραστεί ανάγκη για τη μεταφορά του.

Η εργασία επιβεβαιώνει τη μεγάλη σημασία της ανακύκλωσης των στροβιλοκινητήρων. Μία τακτική των κατασκευαστριών εταιρειών, που όχι μόνο είναι οικονομική, αλλά και πολύ ωφέλιμη για το ανθρακικό αποτύπωμα, καταφέρνει να μειώσει τις ανθρακικές εκπομπές των υλικών σε βαθμό τουλάχιστον 62,5% (Εικόνα 7-3, Εικόνα 7-12).

Ως γενική εικόνα συμπεραίνεται ότι οι προηγμένες μέθοδοι κατεργασιών καταναλώνουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας σε σχέση με τις συμβατικές. Καθοριστικός παράγοντας όμως στις ανθρακικές εκπομπές των κατεργασιών αποτελεί η χώρα κατασκευής του κινητήρα, η οποία έχει ικανότητα να μεταβάλλει το αποτέλεσμα κατά 44% τουλάχιστον (Εικόνα 7-5).

Η εργασία επίσης επιβεβαιώνει ότι η λειτουργία του κινητήρα παράγει την πλειονότητα των ανθρακικών εκπομπών του κύκλου ζωής του (άνω του 80%). Δικαιολογείται έτσι η προσπάθεια αναβάθμισης των στροβιλοκινητήρων, η οποία περιλαμβάνει τη βελτίωση της κατανάλωσης του καυσίμου. Προφανώς ένα κίνητρο είναι οικονομικού χαρακτήρα, αλλά ο χρόνος λειτουργίας και η κατανάλωση καυσίμου είναι οι δύο κύριοι παράγοντες που επιδρούν στην παραγωγή ανθρακικών εκπομπών. Και στις περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η μείωση του χρόνου λειτουργίας, οι καλύτερες επιδόσεις έχουν τη μέγιστη επίδραση στα αποτελέσματα. Η φάση λειτουργίας με τις περισσότερες εκπομπές είναι η οριζόντια πλεύση, και το εύρημα αυτό είναι σύμφωνο με τα αποτελέσματα άλλων δημοσιεύσεων (Πίνακας 13-6).

Στο ίδιο μήκος κύματος, η εργασία αναδεικνύει τη σοβαρότητα της συνεχούς παρακολούθησης και διαγνωστικής του στροβιλοκινητήρα. Με την υπόθεση της



προσεγγμένης και έγκαιρης συντήρησης, οι εκπομπές εξαιτίας της χειροτέρευσης αυξάνουν το ολικό ανθρακικό αποτύπωμα σε βαθμό τουλάχιστον 2%. Μπορεί κανείς να φανταστεί πόσο υψηλότερο είναι αυτό το ποσοστό αν αμεληθεί ο έλεγχος αυτός. Η συντήρηση του κινητήρα, βάσει των στοιχείων της εργασίας, συμφέρει από πλευράς εξοικονόμησης καυσίμου (άρα αποφεύγονται επιπρόσθετα κόστη) αλλά και από πλευράς ανθρακικού αποτυπώματος, αφού οι εκπομπές λόγω συντήρησης είναι σχεδόν αμελητέες. Μάλιστα αυτές μπορούν να περιοριστούν με υιοθέτηση πιο οικολογικών συνηθειών στους αερολιμένες (1.3).

Τέλος, οφείλει να γίνει μία αναφορά στα ρευστά που χρησιμοποιούνται στους στροβιλοκινητήρες. Τα λιπαντικά για τη ψύξη και τη λίπανση γενικά καταναλώνονται σε μικρό βαθμό και βέβαια ο ρυθμός κατανάλωσης εξαρτάται από τη ποιότητα κατασκευής του συστήματος ψύξης και λιπάνσεως.

Όσον αφορά τα καύσιμα, μέσα από την εργασία φανερώνονται δύο δεδομένα για τα βιοκαύσιμα. Από τη μία πλευρά, επιβεβαιώνονται οι ισχυρισμοί ότι μπορούν να μειώσουν κατά 80% (και παραπάνω) τις ανθρακικές εκπομπές που θα είχαν προκληθεί εξαιτίας συμβατικού καυσίμου αεροπορίας. Η μελέτη έδειξε ότι η χρήση του εγκεκριμένου βιοκαυσίμου H.E.F.A. από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας, οδηγεί σε μείωση των εκπομπών κύκλου ζωής κατά 73% (Πίνακας 7-17). Παρατηρείται όμως ότι υπάρχει και σημαντική αύξηση στις εκπομπές κατά τη διάρκεια παραγωγής του καυσίμου, με την αύξηση αυτή να είναι ίση με 40% (Πίνακας 7-17), σε σχέση με την παραγωγή συμβατικού καυσίμου. Οι εκπομπές είναι μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες. Διαπιστώνεται ότι η παραγωγή των βιοκαυσίμων είναι αρκετά δαπανηρή από πλευράς πόρων, χρημάτων και ενέργειας (Πίνακας 7-18, Πίνακας 7-19).

Από την άλλη πλευρά, τα βιοκαύσιμα από μόνα τους δεν είναι ικανά να αποτρέψουν τα προβλήματα της κλιματικής αλλαγής. Οι εκπομπές του στροβιλοαντιδραστήρα παρέμειναν οι ίδιες σε κάθε περίπτωση, παρόλο που θεωρητικά υπήρξε αντιστάθμιση τους. Εν αντιθέσει με τις τεχνικές απαγωγής του διοξειδίου του άνθρακα (12.3.2), η χρήση των βιοκαυσίμων «καθυστερεί» μόνο την κλιματική αλλαγή, μέχρι η γέννηση ή η φύτευση νέων δέντρων και φυτών να μην μπορούν να αντισταθμίσουν τις εκπομπές λειτουργίας.

Η χρήση υδρογόνου εξαφανίζει πλήρως τις άμεσες ανθρακικές εκπομπές, αλλά απαιτεί κατάλληλες μεθόδους παραγωγής, λόγω της μεγάλης απαιτούμενης ενέργειας παραγωγής του. Οπότε, δικαιολογείται έτσι η προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας για αξιοποίηση του υδρογόνου ως νέου καυσίμου προώθησης των αεροσκαφών. Προϋπόθεση όμως για την εδραίωση του είναι να παράγεται με όσο το δυνατόν πιο οικολογικές μεθόδους. Με την υψηλή του θερμογόνο ικανότητα και την καύση δίχως απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα (13.1.3), θα μπορέσει να φέρει πιο κοντά την αεροπορία στους στόχους των ανθρακικά-μηδενικών πτήσεων (carbon-free flights).



8. Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

Πρωταρχικός στόχος της εργασίας ήταν η εκτίμηση του ανθρακικού αποτυπώματος ενός στροβιλοκινητήρα για τον κύκλο της ζωής του. Για την επίτευξη του στόχου αυτού ακολουθήθηκαν τα διεθνή πρότυπα που ορίζουν τη μελέτη του ανθρακικού αποτυπώματος. Ο στροβιλοκινητήρας λογίστηκε ως προϊόν.

Αρχικά απαιτήθηκε ο ορισμός του συστήματος που θα μελετηθεί και η εύρεση πληροφοριών για όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του στροβιλοκινητήρα. Επίσης χρειάστηκε να γίνει η κατηγοριοποίηση των ανθρακικών εκπομπών ως έμμεσων και άμεσων και εν συνεχεία να προσδιοριστούν οι ροές μάζας και ενέργειας του συστήματος.

Τα στάδια του κύκλου ζωής ενός στροβιλοκινητήρα είναι τα ακόλουθα:

Έμμεσες εκπομπές

- Εξόρυξη πρώτων υλών και δημιουργία υλικών
- Κατεργασία εξαρτημάτων και συναρμολόγηση στροβιλοκινητήρα
- Μεταφορές εξαρτημάτων
- Συντήρηση στροβιλοκινητήρα
- Παραγωγή καυσίμων και λιπαντικών / ψυκτικών ελαίων
- Απόσυρση στροβιλοκινητήρα (υγειονομική ταφή, αποτέφρωση, ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση ως έχει)

Άμεσες εκπομπές

- Λειτουργία στροβιλοκινητήρα
- Χειροτέρευση του στροβιλοκινητήρα

Για κάθε ένα από αυτά τα στάδια δημιουργήθηκαν ή τροποποιήθηκαν υπάρχουσες σχέσεις υπολογισμού, που στηρίζονται κυρίως στις ροές μάζας και ενέργειας του συστήματος. Η χρήση των σχέσεων αυτών απαιτεί πρόσβαση σε όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστες πηγές πληροφοριών για το σύστημα διότι είναι ευαίσθητες και μπορούν διαφορετικά να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα.



Οι σχέσεις για τη λειτουργία του στροβιλοκινητήρα είναι πρωτότυπες. Προτάθηκε και μία σχέση εκτίμησης των ανθρακικών εκπομπών ενός αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος η οποία δε δοκιμάστηκε στην εργασία αυτή. Εκτιμάται, όμως, ότι είναι ακριβής, λόγω της σταθερότητας των εξωτερικών συνθηκών στις οποίες συνήθως λειτουργεί ένας αεριοστρόβιλος μηχανικής ισχύος.

Πηγές για τις πληροφορίες που απαιτήθηκαν ήταν οι κατασκευάστριες εταιρείες, επιστημονικές ιστοσελίδες και δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά. Δεν υπήρξε δυνατότητα πρόσβασης σε προγράμματα ανάλυσης κύκλου ζωής, όπως τα Ecosim και Simapro, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία. Αξιοποιήθηκε, βέβαια, η βάση δεδομένων για τις εκπομπές στροβιλοκινητήρων της Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (I.C.A.O.).

Το κύριο μέρος της αξιολόγησης της διαδικασίας πραγματοποιήθηκε με σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τις δύο βασικές δημοσιεύσεις που αναλύθηκαν στο εδάφιο 2.3. Τα αποτελέσματα ταίριαζαν σε ποσοστό 95% για τα στάδια της κατασκευής και των κατεργασιών. Για τη φάση της λειτουργίας του στροβιλοκινητήρα το ποσοστό συμφωνίας είναι περίπου 80-90 %, υπό την απαίτηση βέβαια κατάλληλης προσαρμογής παραγόντων όπως ο χρόνος λειτουργίας, το ύψος πτήσης, η ώση και η ειδική κατανάλωση του καυσίμου. Στα ίδια ποσοστά κυμαίνεται και ο λογισμός των ανθρακικών εκπομπών λόγω χειροτέρευσης του στροβιλοκινητήρα.

Η μεθοδολογία έχει δυνατότητες εφαρμογής και σε άλλα προϊόντα πέρα από τους στροβιλοκινητήρες. Μια σύντομη δοκιμή για την περίπτωση κατασκευής μίας ανεμογεννήτριας έδωσαν ακρίβεια περίπου 70%. Η πτώση αυτή οφείλεται στην έλλειψη πληροφοριών για τα υλικά και για τις κατεργασίες που εφαρμόστηκαν κατά τη δημιουργία της ανεμογεννήτριας. Δεδομένων των δυσκολιών αυτών, η ακρίβεια αυτή είναι ικανοποιητική. Άλλη πρόταση για πιθανή μελέτη είναι η ανάλυση του κύκλου ζωής ενός αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος με αναγεννητή, με χρήση της μεθόδου της εργασίας.

Η παραπάνω μεθοδολογία έπρεπε να μπορεί να εφαρμόζεται εύκολα σε πολλαπλούς κινητήρες ή προϊόντα και έτσι παράλληλα δημιουργήθηκε μία εφαρμογή υπολογισμού ανθρακικού αποτυπώματος στο Microsoft Excel, το Turbomachine CO₂ Calculator. Περιέχει περίπου 4.500 γραμμές κώδικα Visual Basic και αναλυτική περιγραφή του μπορεί να βρεθεί στο Παράρτημα III (14). Συνοπτικά αναφέρεται ότι το Turbomachine CO₂ Calculator δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της κατανομής της μάζας ενός στροβιλοκινητήρα, ενώ παρέχει και μία βιβλιοθήκη με κατανομές μάζας για διάφορους στροβιλοκινητήρες. Κάθε στάδιο λειτουργίας μοντελοποιείται σε ένα φύλλο εργασίας του Excel, ενώ η ενσωματωμένη βάση δεδομένων που περιέχει μπορεί να ανανεώνεται από τον χρήστη.

Ο υπολογισμός του ανθρακικού αποτυπώματος πραγματοποιήθηκε για τέσσερις κύριες περιπτώσεις · του CFM56-5A , του I.A.E. V2500-A1, του CFM LEAP-1A και του CFM LEAP-1A με χρήση υδρογόνου. Τα αποτελέσματα είναι όμοιας τάξης με εκείνα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, επιβεβαιώνοντας την εγκυρότητα τους. Κάθε κύρια περίπτωση χωρίστηκε



σε υποπεριπτώσεις που περιλάμβαναν τη χρήση βιοκαυσίμων και τη πραγματοποίηση πτήσεων διαφορετικού αριθμού και εμβέλειας. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα :

- Μια ενδεικτική τιμή για το ανθρακικό αποτύπωμα ενός τυπικού στροβιλοκινητήρα ηλικίας 20 ετών είναι περίπου 2,5 χιλιάδες τόνοι διοξειδίου του άνθρακα. Για έναν σύγχρονο στροβιλοκινητήρα η ποσότητα αυτή πέφτει περίπου στους 1,7 χιλιάδες τόνους διοξειδίου του άνθρακα.
- Η μάζα του κινητήρα και τα υλικά του από τα οποία κατασκευάζεται επηρεάζουν τις εκπομπές στα στάδια της παρασκευής, μεταφοράς και απόσυρσης του στροβιλοκινητήρα. Αποδεικνύεται όμως ότι στο σύνολο του κύκλου ζωής οι ανθρακικές εκπομπές των φάσεων αυτών είναι αμελητέες, καθώς πάντοτε ο μεγαλύτερος παράγοντας των ανθρακικών εκπομπών είναι η κατανάλωση του καυσίμου. Η κατανάλωση του καυσίμου επηρεάζει και τις άμεσες (λειτουργία) αλλά και τις έμμεσες (παραγωγή καυσίμων) εκπομπές. Αγνοώντας άλλους οικονομικούς παράγοντες και εστιάζοντας καθαρά και μόνο στις ανθρακικές εκπομπές, μία κατασκευάστρια εταιρεία μπορεί να μειώσει τις ανθρακικές εκπομπές του στροβιλοκινητήρα της αν βελτιώσει τις επιδόσεις του · ακόμη και αν αυτές απαιτούν την εξόρυξη πολύτιμων στοιχείων ή τη δημιουργία προηγμένων υλικών.
- Στο στάδιο των κατεργασιών σημαντικό ρόλο παίζει η πηγή της ενέργειας που αξιοποιείται. Η επιλογή διαφορετικής χώρας κατασκευής είναι ικανή να μεταβάλλει το ανθρακικό αποτύπωμα σε ποσοστό έως και 44%. Η ενέργεια που καταναλώνεται για την κατεργασία και συναρμολόγηση ενός στροβιλοκινητήρα 2,5 τόνων είναι περίπου 40 MWh, που ισοδυναμούν με τις ετήσιες ηλεκτρικές ανάγκες 25 ευρωπαϊκών σπιτιών [122] .
- Οι εκπομπές του σταδίου των μεταφορών επηρεάζονται από τις χώρες κατασκευής κάθε εξαρτήματος. Οι εκπομπές στις Η.Π.Α. και στην Ασία τείνουν να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες της Ευρώπης, η οποία εφαρμόζει αυστηρά μέτρα περιορισμού των ανθρακικών εκπομπών.
- Επιβεβαιώνεται η αξία της ανακύκλωσης των στροβιλοκινητήρων, η οποία επιτυγχάνει μείωση τουλάχιστον 62,5% των ανθρακικών εκπομπών του σταδίου εξόρυξης και παραγωγής των υλικών.
- Η συντήρηση του στροβιλοκινητήρα παράγει αμελητέες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, σε σχέση με τα άλλα στάδια του κύκλου ζωής, διότι τα εξαρτήματα του έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Η λειτουργία του κινητήρα ευθύνεται για περίπου το 80% των ανθρακικών εκπομπών του κύκλου ζωής του στροβιλοκινητήρα.
- Η χειροτέρευση του κινητήρα συμβάλει περίπου σε ποσοστό 2% στις ανθρακικές εκπομπές του κύκλου ζωής. Αν δε τηρούνται σωστά τα μέτρα συντήρησης και διαγνωστικής αυτό το ποσό μπορεί να αυξηθεί ραγδαία. Η κατανάλωση των



ελαίων λίπανσης ή/και ψύξης τείνουν να έχουν μικρή επίδραση στο ανθρακικό αποτύπωμα.

- Επιβεβαιώνονται οι ισχυρισμοί ότι μπορούν να μειώσουν κατά 80% (και παραπάνω) τις ανθρακικές εκπομπές που θα είχαν προκληθεί εξαιτίας συμβατικού καυσίμου αεροπορίας. Η μελέτη έδειξε ότι η χρήση του εγκεκριμένου βιοκαυσίμου H.E.F.A. από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας, οδηγεί σε μείωση των εκπομπών κύκλου ζωής κατά 73%. Παρατηρείται όμως ότι υπάρχει και σημαντική αύξηση στις εκπομπές κατά τη διάρκεια παραγωγής του καυσίμου, με την αύξηση αυτή να είναι ίση με 40% σε σχέση με την παραγωγή συμβατικού καυσίμου. Οι εκπομπές είναι μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες. Διαπιστώνεται ότι η παραγωγή των βιοκαυσίμων είναι αρκετά δαπανηρή από πλευράς πόρων, χρημάτων και ενέργειας.
- Όμοια ευρήματα προκύπτουν και για το υδρογόνο. Παρόλο που η χρήση του εξαφανίζει πλήρως τις άμεσες ανθρακικές εκπομπές, η παραγωγή του αυξάνει τρομερά τις έμμεσες ανθρακικές εκπομπές. Συγκεκριμένα, παρατηρείται αύξηση των ανθρακικών εκπομπών για τον CFM LEAP-1A που λειτουργεί με υδρογόνο σε σχέση με τον CFM LEAP-1A που λειτουργεί με συμβατική κηροζίνη κατά 47%. Ο CFM LEAP-1A που λειτουργεί με υδρογόνο έχει όμοιο ανθρακικό αποτύπωμα με τον προηγούμενης τεχνολογίας CFM56-5A που λειτουργεί με κηροζίνη.
- Η παραγωγή καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μειώνει σημαντικά το ανθρακικό αποτύπωμα του κύκλου ζωής του στροβιλοκινητήρα. Βιοκαύσιμα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να έχουν μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα κατά 43%. Ακόμη πιο εντυπωσιακά, παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οδηγεί στη μείωση κατά 94% του ανθρακικού αποτυπώματος.
- Η χρήση υδρογόνου οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσότητα υδρατμών, η οποία αντισταθμίζεται από την μικρότερη κατανάλωση καυσίμου λόγω της υψηλής θερμογόνου ικανότητας του. Άρα δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη αλλαγή στις ανθρακικές εκπομπές.

Εν κατακλείδι, τα βασικά βήματα για την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης της αεροπορίας, σύμφωνα με τα συμπεράσματα της εργασίας, είναι:

- Εύρεση της βέλτιστης μάζας και μεγέθους του στροβιλοκινητήρα προς μείωση των απαραίτητων υλικών και αύξηση των επιδόσεων.
- Βελτίωση του συστήματος καύσης, χρήση των βιοκαυσίμων ως μεταβατικό στάδιο και έπειτα ανάπτυξη στροβιλοκινητήρων με καύσιμο το υδρογόνο (13.1.4).
- Συνεχής επίβλεψη και επιμελής συντήρηση των στροβιλοκινητήρων, προς αποφυγή βλαβών και μείωσης των επιδόσεων.
- Ενημέρωση του επιβατικού κοινού ώστε να μειωθούν, όσο γίνεται, τα αεροπορικά ταξίδια και οι ώρες λειτουργίας των κινητήρων ανά χρόνο (13.3).



9. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1 : Κύκλος Προσγείωσης και Απογείωσης.....	20
Πίνακας 1-2 : Ποσοστό παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα στο αεροδρόμιο	21
Πίνακας 1-3 : Χαρακτηριστικά στροβιλοαντιδραστήρα της έρευνας.....	26
Πίνακας 1-4 : Ανθρακικό και οικονομικό κόστος στροβιλοαντιδραστήρα.....	27
Πίνακας 2-1 : Βήματα της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	34
Πίνακας 2-2 : Λεπτομέρειες της Ανάλυσης Επίδρασης του Κύκλου Ζωής	35
Πίνακας 2-3 : Βήματα του Προτύπου Καταγραφής και Αναφοράς του Κύκλου Ζωής Προϊόντος.....	38
Πίνακας 2-4 : Είδη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου	39
Πίνακας 2-5 : Κατηγορία εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου	39
Πίνακας 2-6 : Ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα για τον κύκλο ζωής αεροσκάφους.....	43
Πίνακας 2-7 : Εκπομπές κύκλου ζωής αεροσκαφών	43
Πίνακας 2-8 : Ποσοστιαία κατανομή για το ανθρακικό αποτύπωμα των κατεργασιών - συναρμολόγησης	45
Πίνακας 3-1 : Δομικά υλικά στροβιλοκινητήρα CFM56.....	50
Πίνακας 3-2 : Διαστάσεις στροβιλοκινητήρα CFM56-5B.....	51
Πίνακας 3-3 : Εκτιμήσεις μεγεθών στροβιλοαντιδραστήρα.....	53
Πίνακας 3-4 : Ανάλυση της κατανομής της μάζας του CFM56.....	54
Πίνακας 3-5 : Εκτίμηση διαστάσεων και αναλογιών του κινητήρα CFM56.....	57
Πίνακας 4-1 : Τυπικά υλικά για τη κατασκευή ενός στροβιλοκινητήρα	60
Πίνακας 4-2 : Πληροφορίες υλικών και κραμάτων του CFM56	61
Πίνακας 4-3 : Δείκτης εκπομπής διαφόρων μετάλλων της αεροπορικής βιομηχανίας.....	62
Πίνακας 4-4 : Δείκτες εκπομπής κραμάτων των αεριοστρόβιλων	63
Πίνακας 4-5 : Δείκτες εκπομπής για την παραγωγή σύνθετων υλικών	64
Πίνακας 4-6 : Τυπικές διεργασίες για την κατασκευή ενός στροβιλοκινητήρα.....	66
Πίνακας 4-7 : Κατεργασίες σε έναν στροβιλοκινητήρα CFM56	67
Πίνακας 4-8 : Ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια για συμβατικές κατεργασίες	69
Πίνακας 4-9 : Ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια για προηγμένες κατεργασίες	70
Πίνακας 4-10 : Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κρατών λόγω ηλεκτροπαραγωγής.....	71
Πίνακας 4-11 : Δείκτης Εκπομπών κυριότερων καυσίμων βιομηχανικού τομέα.....	71
Πίνακας 4-12: Δείκτες εκπομπής διαφόρων μέσων μεταφορών προϊόντων.....	73
Πίνακας 4-13 : Περιοχές δημιουργίας τμημάτων του CFM56.....	74
Πίνακας 4-14 : Διαδρομές των εξαρτημάτων του κινητήρα CFM56	75
Πίνακας 4-15 : Δείκτες εκπομπής για την ανακύκλωση διάφορων υλικών	78
Πίνακας 5-1 : Κύκλος Προσγείωσης και Απογείωσης του Διεθνή Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας	82
Πίνακας 5-2 : Περίοδοι ολικής επισκευής στροβιλοκινητήρα.....	87
Πίνακας 5-3 : Δείκτης εκπομπής για την παραγωγή βιοκαυσίμων	88
Πίνακας 5-4 : Δείκτες εκπομπής για την παραγωγή συμβατικών καυσίμων	89
Πίνακας 5-5 : Δείκτες εκπομπής διαφόρων λιπαντικών.....	91



Πίνακας 5-6 : Διάρκεια ζωής εξαρτημάτων στροβιλοκινητήρα CFM56-7B.....	92
Πίνακας 6-1 : Ανθρακικές εκπομπές για τέσσερις περιπτώσεις αεροσκαφών	96
Πίνακας 6-2 : Ανθρακικές εκπομπές στροβιλοκινητήρα για το στάδιο των κατεργασιών ..	97
Πίνακας 6-3 : Κινητήρας CFM56 με ακροφύσιο	97
Πίνακας 6-4 : Κατανομή μάζας ακροφυσίου στροβιλοκινητήρα	98
Πίνακας 6-5 : Μελέτη περιπτώσεων κατανομών CFM56 και εκπομπών υλικών-κατεργασιών.....	99
Πίνακας 6-6 : Δεδομένα από το CAMACM	100
Πίνακας 6-7 : Βασικά χαρακτηριστικά CFM56-5A	101
Πίνακας 6-8 : Σχέση ώσης με ειδική κατανάλωση καυσίμου για CFM56	102
Πίνακας 6-9 : Σύγκριση μεθοδολογίας εργασίας με το λογισμικό CAMACM	102
Πίνακας 6-10 : Βασικά χαρακτηριστικά CFM56-3C	103
Πίνακας 6-11 : Πρώτη απόπειρα διόρθωσης κατανάλωσης καυσίμου για CFM56-3C	104
Πίνακας 6-12 : Δεύτερη απόπειρα διόρθωσης κατανάλωσης καυσίμου για CFM56-3C... ..	105
Πίνακας 6-13 : Σύγκριση μεθοδολογίας με τον ICAO Carbon Calculator	107
Πίνακας 6-14 : Δεύτερη απόπειρα σύγκρισης μεθοδολογίας με τον υπολογιστή εκπομπών I.C.A.O.	109
Πίνακας 6-15 : Δεδομένα πτήσεων	110
Πίνακας 6-16 : Σύγκριση ποσοτών ανθρακικών εκπομπών σε φάσεις της αποστολής... ..	111
Πίνακας 6-17 : Υλικά κατασκευής ανεμογεννήτριας	115
Πίνακας 6-18 : Μεταφορές εξαρτημάτων ανεμογεννήτριας	116
Πίνακας 6-19 : Εκτίμηση ανθρακικού αποτυπώματος ανεμογεννήτριας	117
Πίνακας 7-1 : Μέση τιμή και άκρα ανθρακικών εκπομπών υλικών	123
Πίνακας 7-2 : Κατεργασίες ανεμιστήρα και συμπιεστή χαμηλής πίεσης (L.P.T.)	124
Πίνακας 7-3 : Κατεργασίες συμπιεστή και στροβίλου υψηλής πίεσης, θαλάμου καύσης ..	124
Πίνακας 7-4 : Κατεργασίες στροβίλου χαμηλής πίεσης, δομικών στοιχείων και αξεσουάρ	126
Πίνακας 7-5 : Απαιτούμενη ενέργεια κατεργασιών - συναρμολόγησης.....	126
Πίνακας 7-6 : Ανθρακικές εκπομπές κατεργασιών-συναρμολόγησης	127
Πίνακας 7-7 : Δεδομένα πτήσεων πρώτης περίπτωσης	129
Πίνακας 7-8 : Ανθρακικό αποτύπωμα πρώτης περίπτωσης.....	130
Πίνακας 7-9 : Ποσοστό ανθρακικού αποτυπώματος ανά φάση κύκλου πτήσης.....	130
Πίνακας 7-10 : Δεδομένα πτήσεων δεύτερης περίπτωσης	132
Πίνακας 7-11 : Ανθρακικό αποτύπωμα δεύτερης περίπτωσης.....	132
Πίνακας 7-12 : Ανθρακικό αποτύπωμα χειροτέρευσης πρώτης περίπτωσης.....	134
Πίνακας 7-13 : Χειροτέρευση και λόγος χρόνου λειτουργίας προς κύκλων πτήσεων.....	136
Πίνακας 7-14 : Ανθρακικό αποτύπωμα καυσίμου ή λαδιού λίπανσης	137
Πίνακας 7-15 : Απαιτούμενη ενέργεια για την απόσυρση του στροβιλοκινητήρα	139
Πίνακας 7-16 : Ανθρακικές εκπομπές απόσυρσης-αποσυναρμολόγησης	139
Πίνακας 7-17 : Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής (1 ^η Περίπτωση).....	141
Πίνακας 7-18 : Σύγκριση επιπλέον στοιχείων για την 1 ^η Περίπτωση.....	143
Πίνακας 7-19 : Κόστος βιοκαυσίμων και συμβατικού καυσίμου	144



Πίνακας 7-20 : Σύγκριση χρήσης βιοκαυσίμων	145
Πίνακας 7-21 : Ανθρακικό αποτύπωμα κύκλου ζωής (2η Περίπτωση)	147
Πίνακας 7-22 : Σύγκριση επιπλέον στοιχείων για την 2 ^η Περίπτωση.....	148
Πίνακας 7-23 : Βασικά χαρακτηριστικά V2500-A1	149
Πίνακας 7-24 : Κατανομή μάζας του V2530-A5.....	150
Πίνακας 7-25 : Σημεία κατασκευής εξαρτημάτων του V2500.....	151
Πίνακας 7-26 : Μεταφορά εξαρτημάτων του V2500.....	152
Πίνακας 7-27 : Υλικά και κατεργασίες του V2500	153
Πίνακας 7-28 : Χαρακτηριστικά του στροβιλοκινητήρα CFM-LEAP	156
Πίνακας 7-29 : Στοιχεία περιοχών κατασκευής του CFM LEAP	156
Πίνακας 7-30 : Σύγκριση διάρκειας ζωής εξαρτημάτων CFM56 και CFM LEAP.....	157
Πίνακας 7-31 : Χαρακτηριστικά λειτουργίας CFM LEAP-1A23	157
Πίνακας 7-32 : Κατανάλωση καυσίμου CFM LEAP-1A.....	158
Πίνακας 7-33 : Ενδεικτική παρουσίαση ανθρακικού αποτυπώματος τριών στροβιλοκινητήρων.....	161
Πίνακας 7-34 : Σύγκριση ανθρακικού αποτυπώματος CFM LEAP-1A για χρήση υδρογόνου	166
Πίνακας 7-35 : Παραγωγή υδρατμών στον CFM LEAP-1A.....	168
Πίνακας 7-36 : Σύγκριση χρήσης διάφορων καυσίμων στον CFM LEAP-1A.....	170
Πίνακας 12-1 : Ιδιότητες των αερίων του θερμοκηπίου	211
Πίνακας 12-2 : Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου	212
Πίνακας 12-3 : Χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων και επενδύσεις πράσινης τεχνολογίας στην Ευρώπη.....	221
Πίνακας 12-4 : Αγορά και κατοχύρωση νέων αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2019.	223
Πίνακας 13-1 : Πρόγνωση επιπέδων ρύπων μέσω της εφαρμογής μοντελοποίησης IMPACT.	227
Πίνακας 13-2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας.....	228
Πίνακας 13-3 : Σχεδιασμός υβριδικών αεροσκαφών	230
Πίνακας 13-4 : Εκπομπές αερομεταφορών	238
Πίνακας 13-5 : Συνολικές εκπομπές αερομεταφορών	239
Πίνακας 13-6 : Ποσοστό παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα σε μία αποστολή ενός αεροσκάφους.....	241
Πίνακας 13-7 : Παραγωγή CO ₂ σε συνάρτηση με τον αριθμό των επιβατών (2019).....	242



10. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1 : Σχέση παραγωγής ρύπων με την ποιότητα καύσης (Πηγή : "Λειτουργία Αεριοστρόβιλων και Ατμοστρόβιλων").....	17
Εικόνα 1-2 : Ρύποι ενός αεροσκάφους με δύο κινητήρες διπλού ρεύματος (Πηγή: Ευρωπαϊκή υπηρεσία ασφαλείας αεροπορίας)	17
Εικόνα 1-3 : Επίγεια Σταθερή Ηλεκτρική Ισχύς (Πηγή : Aviation Benefits)	19
Εικόνα 1-4 : Παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα κινεζικού αεροπορικού στόλου (Πηγή : China's aircraft-related CO2 emissions: Decomposition analysis, decoupling status, and future trends)	22
Εικόνα 1-5 : Πειραματική διάταξη ανάλυσης βιοκαυσίμου (Πηγή: Performance and Emissions of a Microturbine and Turbofan Powered by Alternative Fuels)	24
Εικόνα 1-6 : Συμπεράσματα για υδρογονοκατεργασμένους εστέρες και λιπαρά οξέα (Πηγή: Performance and Emissions of a Microturbine and Turbofan Powered by Alternative Fuels)	24
Εικόνα 1-7 : Συμπεράσματα χρήσης βιοκαυσίμου με νανοσωματίδια (Πηγή: Combustion analysis of biodiesel-powered propeller engine for least environmental concerns in aviation industry [11])	25
Εικόνα 2-1 : Ανάλυση του κύκλου ζωής προϊόντος	31
Εικόνα 2-2 : Κατηγορίες επίδρασης της ανάλυσης κύκλου ζωής στο περιβάλλον (Πηγή: Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής).....	36
Εικόνα 2-3 : Σχέση κατηγορίας εκπομπών και κύκλου ζωής ενός οργανισμού κατά την παραγωγή προϊόντων	40
Εικόνα 2-4 : Κύκλος ζωής ενός αεροσκάφους (Πηγή : Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft).....	41
Εικόνα 2-5 : Κύκλος ζωής του αεροσκάφους (Πηγή: Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners)	44
Εικόνα 3-1 : Εκπομπές του συστήματος "Στροβιλοκινητήρας"	48
Εικόνα 3-2 : Κύκλος ζωής του συστήματος στροβιλοκινητήρας	48
Εικόνα 3-3 : Τμήματα του συστήματος "Στροβιλοκινητήρας"	49
Εικόνα 3-4 : CFM International CFM56-5B.....	50
Εικόνα 3-5 : Διαστάσεις κινητήρα CFM56-5B (Πηγή : 3D Horse, RenderHub)	51
Εικόνα 3-6 : Διαστάσεις περιβλήματος ακροφύσιου (Πηγή : Airbus-A320 Engine General Description)	52
Εικόνα 3-7 : Εσωτερικά χαρακτηριστικά κινητήρα και ακροφύσιου (Πηγή : How does a CFM56-7B work?)	52
Εικόνα 3-8 : Διαστάσεις πτερυγίου ανεμιστήρα (Πηγή : General Electric)	55
Εικόνα 3-9 : Διαστάσεις ενός συμπιεστή	56
Εικόνα 4-1 : Διαδικασία απόσυρσης αεροσκάφους ή στροβιλοκινητήρα	76



Εικόνα 5-1 : Ώση σε σχέση με την ειδική κατανάλωση (Πηγή: "Review of advanced low-emission technologies for sustainable aviation")	83
Εικόνα 5-2 : Σχέση ισχύος με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (Πηγή : "Comparative Assessment of Two Thermodynamic Cycles of an aero-derivative Marine Gas Turbine")..	84
Εικόνα 5-3 : Χειροτέρευση αεριοστρόβιλου μηχανικής ισχύος (Πηγή : Λειτουργία Αεριοστρόβιλων και Ατμοστρόβιλων)	85
Εικόνα 5-4 : Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών χειροτέρευσης (Πηγή: "Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft")	86
Εικόνα 5-5 : Κατώτατη θερμογόνος ικανότητα (L.H.V.) βιοκαυσίμων (Πηγή : Λειτουργία Κινητήρων Turbofan Πολιτικών Αεροσκαφών με Καύσιμα από Ανανεώσιμες Πηγές: Υδρογόνο, Βιοκαύσιμα	90
Εικόνα 6-1 : Μοντελοποίηση λειτουργίας κινητήρα CFM56.....	101
Εικόνα 6-2 : Σύγκριση ποσοστιαίας κατανάλωσης καυσίμου	103
Εικόνα 6-3 : Παράδειγμα μείωσης της ώσης με το ύψος, του κινητήρα JT8D-17 (Πηγή : NASA).....	104
Εικόνα 6-4 : Δεύτερη σύγκριση ποσοστιαίας κατανάλωσης καυσίμου	106
Εικόνα 6-5 : Κύκλοι L.T.O. και C.C.D. της αποστολής αεροσκάφους.....	108
Εικόνα 6-6 : Εργαλείο υπολογισμού εκπομπών αεροσκαφών από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος	113
Εικόνα 7-1 : Ποσοστό κάθε υλικού στον CFM56-5A.....	121
Εικόνα 7-2 : Ποσοστό ανθρακικών εκπομπών λόγω εξόρυξης ή σύνθεσης υλικού	122
Εικόνα 7-3 : Σύγκριση χρήσης νέων υλικών σε σχέση με ανακυκλωμένα	123
Εικόνα 7-4 : Υπόθεση κατασκευής στροβιλοκινητήρα μόνο στη Γαλλία	127
Εικόνα 7-5 : Σύγκριση εκπομπών κατασκευής στις Η.Π.Α. και στην Κίνα	128
Εικόνα 7-6 : Σχέση λόγου r με τις ανθρακικές εκπομπές.....	133
Εικόνα 7-7 : Επαλήθευση ανθρακικού αποτυπώματος αυξανόμενης εμβέλειας.....	133
Εικόνα 7-8 : Χειροτέρευση και διαστήματα επισκευής.....	134
Εικόνα 7-9 : Χειροτέρευση και ανώτατο όριο υποβάθμισης	135
Εικόνα 7-10 : Χειροτέρευση και λόγος ωρών προς κύκλους πτήσης	136
Εικόνα 7-11 : Κατανάλωση καυσίμου και λόγος ωρών λειτουργίας προς κύκλους πτήσης	138
Εικόνα 7-12 : Σύγκριση ανακύκλωσης με χρήση χωματερής	140
Εικόνα 7-13 : Ανθρακικό αποτύπωμα λειτουργίας τυπικού στροβιλοκινητήρα πολιτικής αεροπορίας	142
Εικόνα 7-14 : Σύγκριση χρήσης βιοκαυσίμου αντί για κηροζίνη.....	142
Εικόνα 7-15 : Σύγκριση ποσοστιαίων εκπομπών βιοκαυσίμου και κηροζίνης	143
Εικόνα 7-16 : Σύγκριση εκπομπών για χρήση A.T.J.	145
Εικόνα 7-17 : Ποσοστιαία κατανομή εκπομπών για χρήση A.T.J.	146
Εικόνα 7-18 : Σύγκριση εκπομπών φάσεων των κύκλων ζωής της 2ης Περίπτωσης.....	146
Εικόνα 7-19 : Σύγκριση ποσοστών κάθε φάσης των κύκλων ζωής της 2ης ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ..	147
Εικόνα 7-20 : Ο στροβιλοκινητήρας V2500.....	149
Εικόνα 7-21 : Κατανομή υλικών στον στροβιλοκινητήρα V2500	154



Εικόνα 7-22 : Ανθρακικές εκπομπές λόγω δημιουργίας υλικών του V2500.....	154
Εικόνα 7-23 : Ο στροβιλοκινητήρας CFM LEAP-1A.....	155
Εικόνα 7-24 : Κατανομή υλικών του στροβιλοκινητήρα CFM LEAP.....	159
Εικόνα 7-25 : Ανθρακικό αποτύπωμα υλικών του CFM LEAP.....	159
Εικόνα 7-26 : Ποσοστιαία κατανομή ανθρακικών εκπομπών στροβιλοκινητήρων.....	162
Εικόνα 7-27 : Εκπομπές κάθε φάσης κύκλου ζωής των στροβιλοκινητήρων.....	162
Εικόνα 7-28 : Ανθρακικές εκπομπές παραγωγής υλικών στροβιλοκινητήρων.....	163
Εικόνα 7-29 : Ανθρακικές εκπομπές κατεργασιών εξαρτημάτων στροβιλοκινητήρων.....	163
Εικόνα 7-30 : Ποσοστιαία κατανομή εκπομπών για χρήση υδρογόνου ως καύσιμο.....	167
Εικόνα 7-31 : Ανθρακικό αποτύπωμα για χρήση υδρογόνου ως καύσιμο.....	167
Εικόνα 7-32 : Ανθρακικές εκπομπές φάσεων για διάφορα καύσιμα CFM LEAP-1A.....	169
Εικόνα 7-33 : Ποσοστιαία κατανομή ανθρακικών εκπομπών φάσεων για διάφορα καύσιμα CFM LEAP-1A.....	169
Εικόνα 12-1 : Απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου.....	203
Εικόνα 12-2 : Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας (Πηγή: NASA Goddard Space Flight Center/PO.DAAC).....	204
Εικόνα 12-3 : Μεταβολή της θερμοκρασίας (Πηγή: NASA Goddard Space Flight Centre/PO.DAAC).....	205
Εικόνα 12-4 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του διοξειδίου του άνθρακα.....	205
Εικόνα 12-5 : Κύκλος διοξειδίου του άνθρακα.....	206
Εικόνα 12-6 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του μεθανίου.....	206
Εικόνα 12-7 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του υποξειδίου του αζώτου.....	207
Εικόνα 12-8 : Κύκλος του Αζώτου.....	208
Εικόνα 12-9 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του νερού.....	208
Εικόνα 12-10 : Υδρολογικός κύκλος.....	208
Εικόνα 12-11 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του όζοντος.....	209
Εικόνα 12-12 : Εκπομπές ανά τομέα στην Κίνα το 2016 (Πηγή : OurWorldinData).....	214
Εικόνα 12-13 : Άμεση Σύλληψη Αέρα.....	216
Εικόνα 12-14 : Σύλληψη και Αποθήκευση Άνθρακα (Πηγή : Toshiba Energy Systems and Solutions).....	217
Εικόνα 12-15 : Συντακτικός τύπος αιθανολαμίνης.....	217
Εικόνα 12-16 : Συνδυασμένος κύκλος με Σύλληψη και Αποθήκευση Άνθρακα (Σ.Α.Α)	218
Εικόνα 12-17 : Διάγραμμα φάσης του διοξειδίου του άνθρακα (Πηγή : Wikipedia).....	219
Εικόνα 12-18 : Εκπομπές μετακινήσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2016 (Πηγή: Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο).....	222
Εικόνα 12-19 : Σχέση εκπομπών και αύξησης τους στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τη περίοδο 2016-2017 (Πηγή: Eurostat).....	224
Εικόνα 13-2 : Μοντέλο του Υβριδικού Πτερού (Πηγή : NASA Research Center).....	229
Εικόνα 13-3 : Αποκόλληση της ροής σε δύο τύπους αεροσκαφών (Πηγή : «Μελέτη Συστημάτων Ηλεκτρικά Καταναεμημένης Πρόωσης», Τζιβάνα Χριστίνα, Ε.Μ.Π.).....	230
Εικόνα 13-4 : Αεροσκάφος Alice σε παρουσίαση (Πηγή : Eco Aviation).....	231



Εικόνα 13-5 : Σύγκριση απαιτούμενου όγκου υδρογόνου με μέγεθος αεροσκάφους και εμβέλεια πτήσης	232
Εικόνα 13-6 : Αρχή λειτουργίας κυψελών καυσίμου υδρογόνου	233
Εικόνα 13-7 : Ο στροβιλοκινητήρας TechTP	234
Εικόνα 13-8 : Ο στροβιλοκινητήρας UltraFan	235
Εικόνα 13-9 : Αεροσκάφος με τετραγωνικά πτερά (Πηγή: "Is the 'box-wing' aircraft the plane of the future?").....	235
Εικόνα 13-10 : Επίπεδα εκπομπών στις μετακινήσεις - μεταφορές στην Ευρώπη (Πηγή : Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος)	237
Εικόνα 13-11 : Εκπομπές αεροπορίας αναπτυσσόμενων χωρών το 2020 (Πηγή : Διεθνώς Οργάνωση Ενέργειας)	238
Εικόνα 13-12 : Boeing 777-X με στροβιλοκινητήρες διπλού ρεύματος (Πηγή : Boeing) ...	240
Εικόνα 14-1 : Περιβάλλον εργασίας του Microsoft Excel	243
Εικόνα 14-2 : Αρχείο Excel γρήγορου υπολογισμού όγκου υγρού δεξαμενής	244
Εικόνα 14-3 : Αρχείο Excel μελέτης δυναμικότητας συστήματος πυρόσβεσης (Πηγή: Process Control Simulator Using MS Excel VBA).....	244
Εικόνα 14-4 : Παράδειγμα συγγραφής κώδικα Visual Basic στο Excel.....	245
Εικόνα 14-5 : Το λογότυπο του υπολογιστικού εργαλείου	246
Εικόνα 14-6 : Φύλλο εργασίας "Engine Weight Estimation"	247
Εικόνα 14-7 : Κελιά που συμπληρώνονται από τον χρήστη	247
Εικόνα 14-8 : Μήνυμα σφάλματος στο "Engine Weight Estimation"	248
Εικόνα 14-9 : Πίνακας αποτελεσμάτων εκτίμησης μάζας στροβιλοκινητήρα	248
Εικόνα 14-10 : Κουμπί αντιγραφής κατανομής μάζας.....	249
Εικόνα 14-11 : Το φύλλο εργασίας "Engine Library "	249
Εικόνα 14-12 : Επιλογή στροβιλοκινητήρα από λίστα.....	250
Εικόνα 14-13 : Τα κουμπιά προβολής εικόνας και αντιγραφής	250
Εικόνα 14-14 : Το φύλλο εργασίας "Alloy Creator"	250
Εικόνα 14-15 : Πλαίσιο αποτελεσμάτων του δημιουργού κραμάτων	251
Εικόνα 14-16 : Μήνυμα σφάλματος του δημιουργού κραμάτων	251
Εικόνα 14-17 : Φύλλο εργασίας "Materials-Weight"	251
Εικόνα 14-18 : Μήνυμα σφάλματος	252
Εικόνα 14-19 : Εισαγωγή ποσοστού μάζας και επιλογή υλικών	252
Εικόνα 14-20 : Εκπομπές λόγω εξόρυξης / δημιουργίας υλικών	253
Εικόνα 14-21 : Φύλλο εργασίας "Processing-Machining"	253
Εικόνα 14-22 : Κατεργασία τμημάτων στροβιλοκινητήρα	254
Εικόνα 14-23 : Κατανάλωση ενέργειας.....	254
Εικόνα 14-24 : Πλαίσιο συναρμολόγησης στροβιλοκινητήρα.....	255
Εικόνα 14-25 : Στοιχεία συναρμολόγησης.....	255
Εικόνα 14-26 : Συνολικά στοιχεία κατεργασιών-συναρμολόγησης	256
Εικόνα 14-27 : Μεταφορές και διανομή εξαρτημάτων	256
Εικόνα 14-28 : Επιλογή μεταφορικού μέσου.....	257
Εικόνα 14-29 : Υπολογιστής αεροπορικών πτήσεων	257



Εικόνα 14-30 : Ηλεκτρονικός χάρτης	258
Εικόνα 14-31 : Λειτουργία στροβιλοαντιδραστήρα	258
Εικόνα 14-32 : Πίνακας βασικών στοιχείων στροβιλοαντιδραστήρων	259
Εικόνα 14-33 : Υπολογιστής αποστολής αεροσκάφους	259
Εικόνα 14-34 : Προσαρμογή κύκλου απογείωσης-προσγείωσης.....	260
Εικόνα 14-35 : Στοιχεία κύκλου ανάβασης - πτήσης – κατάβασης.....	260
Εικόνα 14-36 : Πίνακας αποτελεσμάτων αποστολών	261
Εικόνα 14-37 : Πίνακας τελικών αποτελεσμάτων λειτουργίας	261
Εικόνα 14-38 : Υπολογιστής υποβάθμισης στροβιλοαντιδραστήρα	262
Εικόνα 14-39 : Συντήρηση και παραγωγή καυσίμων και λιπαντικών	262
Εικόνα 14-40 : Υπολογισμός εκπομπών συντήρησης	263
Εικόνα 14-41 : Υπολογιστικό εργαλείο παραγωγής καυσίμων	263
Εικόνα 14-42 : Ανθρακικό αποτύπωμα συντήρησης	264
Εικόνα 14-43 : Ανακύκλωση, αποτέφρωση και χρήση χωματερής	264
Εικόνα 14-44 : Επιλογές απόσυρσης εξαρτημάτων.....	264
Εικόνα 14-45 : Πλαίσιο αποσυναρμολόγησης στροβιλοκινητήρα	265
Εικόνα 14-46 : Ενεργειακές απαιτήσεις απόσυρσης εξαρτήματος	265
Εικόνα 14-47 : Ανθρακικές εκπομπές λόγω απόσυρσης τμήματος στροβιλοκινητήρα	266
Εικόνα 14-48 : Ανθρακικό αποτύπωμα απόσυρσης και αποσυναρμολόγησης	266



11. Κατάλογος Αναφορών

- [1] Ηνωμένα Έθνη, «UN Climate Change Conference UK,» Νοέμβριος 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ukcop26.org/cop26-goals/>. [Πρόσβαση 23 Νοεμβρίου 2021].
- [2] Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, «Συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>. [Πρόσβαση 23 Νοεμβρίου 2021].
- [3] Κ. Μαθιουδάκης, Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων, Αθήνα: Ε.Μ.Π., 2016.
- [4] Glenn Baxter - International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, «Decarbonizing International Air Cargo Transportation's Carbon Footprint: A Review of the World Air Cargo Carrying Airlines Current and Potential Environment Related Measures and Strategies,» Νοέμβριος 2021. [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 31 Μαρτίου 2022].
- [5] Chilongola F.D., Ahyudanari E., «Aviation and Aircraft Engine Emissions at Juanda,» IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 645, Ινδονησία, 2019.
- [6] Jinglei Y., Chaofeng S., Chenyang X., Huaqing H., «China's aircraft-related CO2 emissions: Decomposition analysis, decoupling,» Energy Policy - Elsevier, 2020.
- [7] N. B. S. M. B. P. A. Filippone, «Using the OpenSky ADS-B Data to Estimate Aircraft Emissions,» MDPI, Ελβετία, 2021.
- [8] «OpenSky Network,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://opensky-network.org/>. [Πρόσβαση 28 Απριλίου 2022].
- [9] Przysowa, R., Gawron, B., Białecki, T., Łęgowik, A., Merkisz, J, Jasinski R., «Performance and Emissions of a Microturbine and Turbofan Powered by Alternative Fuels,» MDPI, Βασιλεία, Ελβετία, 2021.
- [10] Minijets, «Price Induction DGEN 380/390,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://minijets.org/fr/300-500/dgen380>. [Πρόσβαση 28 Απριλίου 2022].
- [11] Balaji V., Kaliappan S, Madhuvanesan D.M., Ezhumalai D.S., Boopathi S., Patil Pravin P. και Saiprakash M, «Combustion analysis of biodiesel-powered propeller engine for least environmental concerns in aviation industry,» Emerald Publishing, Τσενάι, Ινδία, 2021.
- [12] Tuzcu H., Sohret Y. και Caliskan H. , «Energy, environment and enviroeconomic analyses



and assessments of the turbofan engine used in aviation industry,» *Environmental Progress and Sustainable Energy*, Τουρκία , 2020.

- [13] Ευρωπαϊκή Ένωση, «Πώς μπορώ να μειώσω το δικό μου αποτύπωμα άνθρακα;»,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://europa.eu/youth/get-involved/sustainable-development/how-reduce-my-carbon-footprint_el. [Πρόσβαση 26 Απριλίου 2022].
- [14] Subramanian Senthilkannan Muthu, *The Carbon Footprint Handbook*, CRC Press, 2016.
- [15] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, «European Platform on Life Cycle Assessment (LCA),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm>. [Πρόσβαση 4 Μαΐου 2022].
- [16] Ομοσπονδιακές Πρακτικές Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, «Federal Life Cycle Assessment,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.lcacommons.gov/>. [Πρόσβαση 28 Απριλίου 2022].
- [17] GreenDelta, «Towards more interoperable databases : openLCA, SimaPro, summary of tools,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/1501_Towards-more-interoperable-databases-oLCA-SimaPro_AC.pdf. [Πρόσβαση 28 Απριλίου 2022].
- [18] SimaPro, «PRé: enabling fact-based sustainability,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://simapro.com/about/about-pre/>. [Πρόσβαση 2022 Απριλίου 28].
- [19] Dyott I.S., Ladiwala S. - NEUBERGER/BERMAN, «CARBON FOOTPRINT ANALYSIS,» NEUBERGER - BERMAN, 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.nb.com/documents/public/en-us/q0322_sri_carbon_footprint.pdf. [Πρόσβαση 7 Μαΐου 2022].
- [20] Weidema B.P., Thrane M., Christensen P., Schmidt J., Løkke S., «Carbon Footprint : A Catalyst for Life Cycle Assessment?,» 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/Carbon%20footprint.pdf>. [Πρόσβαση 7 Μαΐου 2022].
- [21] ISO, «ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iso.org/standard/37456.html>. [Πρόσβαση 1 Μαΐου 2022].
- [22] Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής, «Life Cycle Assessment (LCA),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/lifecycleassessment.html>. [Πρόσβαση 28 Απριλίου 2022].
- [23] Franchetti M.J. , Apul D., *Carbon Footprint Analysis : Concepts, Methods, Implementation*



and Case Studies, CRC Press, 2013.

- [24] Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για το Περιβάλλον, «ILCD International Life Cycle Data system,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://epca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>. [Πρόσβαση 1 Μαΐου 2022].
- [25] Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής, «Welcome to the Life Cycle Data Network,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://epca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/index.xhtml>. [Πρόσβαση 1 Μαΐου 2022].
- [26] Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος, «Emission Factor Database,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>. [Πρόσβαση 8 Μαΐου 2022].
- [27] Πρωτόκολλο των Αερίων του Θερμοκηπίου, «QUANTIFYING THE GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF PRODUCTS PAS 2050 & the GHG Protocol Product Standard - A short guide to their purpose, similarities and differences,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/GHG%20Protocol%20PAS%202050%20Factsheet.pdf. [Πρόσβαση 7 Μαΐου 2022].
- [28] Πρωτόκολλο των Αερίων του Θερμοκηπίου, «Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard,» World Resources Institute.
- [29] Ινστιτούτο Βρετανικών Προτύπων, «Guide to PAS 2050 : How to assess the carbon footprint of goods and services,» Crown & Carbon Trust, Λονδίνο, 2008.
- [30] Ivan Jakovljevic, Radomir Mijailovic, Petar Mirosavljevic, «Carbon dioxide emission during the life cycle of turbofan aircraft,» Elsevier, Energy, Βελιγράδι, 2018.
- [31] Howe S., Kolios A.J. και Brennan F.P., «Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners,» Elsevier, Transportation Research, 2013.
- [32] NASA Technology Transfer Program, «Design And Integration Tools,» NASA, 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://software.nasa.gov/software/LEW-19687-1>. [Πρόσβαση 26 Νοεμβρίου 2022].
- [33] Lolis P. , Crawnfield University - School of Engineering, «Development of a Preliminary Weight Estimation Method for Advanced Turbofan Engines,» Ιούλιος 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://files.core.ac.uk/pdf/23/29409793.pdf>. [Πρόσβαση 26 Νοεμβρίου 2022].
- [34] M.J. Eckelman, L. Ciacci, G. Kavlak, P. Nuss, B.K. Reck, T.E. Gradel , «Life cycle carbon benefits of aerospace alloy recycling,» 27 Ιουνίου 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005071>. [Πρόσβαση 18



Δεκεμβρίου 2022].

- [35] Safran, «TARMAC Aerosave: how does aircraft recycling work?,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.safran-group.com/news/tarmac-aerosave-how-does-aircraft-recycling-work-2022-05-17>. [Πρόσβαση 29 Νοεμβρίου 2022].
- [36] Ansell Martin, «Natural fibre composites & their role in engineerin,» 23 Σεπτεμβρίου 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://people.bath.ac.uk/mssmpa/index/PAPERS%20&%20PRESENTATIONS/Ansell%20n atural%20fibres%20BRE%20Sept%2011.pdf>. [Πρόσβαση 6 Φεβρουαρίου 2022].
- [37] T. Kiriara, T. Kawashima, J. Takahashi, T. Matsuo, K. Uzawa, «DEMAND AND DISPOSAL FORECAST FOR CARBON FIBRE BY BOTTOM-UP APPROACH,» 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/>. [Πρόσβαση 6 Φεβρουαρίου 2023].
- [38] Sankar Karuppanan Gopalraj, Ivan Deviatkin, Mika Horttanainen, Timo Kärki, «Life Cycle Assessment of a Thermal Recycling Process as an Alternative to Existing CFRP and GFRP Composite Wastes Management Options,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/24/4430>. [Πρόσβαση 21 Μαρτίου 2023].
- [39] Ali Al-Lami, Philipp Hilmer, Michael Sinapius, «Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry,» 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963818300774>. [Πρόσβαση 6 Φεβρουαρίου 2023].
- [40] T.Schneider, L. Wietschel, D. Schüppel, J. Riesner, K. Konrad, A. Thorenz, A. Tuma, D. Koch, «Multicriteria optimization as enabler for Sustainable Ceramic Matrix Composites,» Αύγουστος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ijac.14174>. [Πρόσβαση 10 Φεβρουαρίου 2023].
- [41] Saravanamuttoo H.H., Cohen H., Rogers G.F.C., Gas Turbine Theory, Fifth Edition, Pearson.
- [42] W.R.Morrow, H.Qi, I.Kim, J.Mazumder, S.J. Skerlos, «Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing,» Journal of Cleaner Production, 2007. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652605002799>. [Πρόσβαση 4 Δεκεμβρίου 2022].
- [43] H.H. Yoon, J.Y. Lee, H.S. Kim, M.S. Kim, E. S. Kim, Y.J. Shin, W.S. Chu, S.H. Ahn, «A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study,» 26 Μαΐου 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available:



<https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-014-0033-0>. [Πρόσβαση 18 Δεκεμβρίου 2022].

- [44] J.L. Sullivan, A. Burnham, M. Wang, «Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing,» Σεπτέμβριος 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/993394>. [Πρόσβαση 18 Δεκεμβρίου 2022].
- [45] H. B. Smartt, D. W. Hood, W. P. Jensen, «Welding Industry : Potential for Energy Conservation,» Απρίλιος 1980. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5486560>. [Πρόσβαση 18 Δεκεμβρίου 2022].
- [46] Bachmann J. , Hidalgo C. , Bricout S, «Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review.,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9094-y>. [Πρόσβαση 6 Φεβρουαρίου 2023].
- [47] United States Environmental Protection Agency, «GHG Emission Factors Hub,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>. [Πρόσβαση 4 Ιουνίου 2023].
- [48] Nada Zamel, Xianguo Li, «Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada,» 2005. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775305007019>. [Πρόσβαση 29 Ιανουαρίου 2023].
- [49] A. Gialos, V. Zeimpekis, M. Madas, K. Papageorgiou, «Calculation and Assessment of CO₂e Emissions in Road Freight Transportation: A Greek Case Study,» 29 Αυγούστου 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/10724>. [Πρόσβαση 17 Δεκεμβρίου 2022].
- [50] M. Hopkin , «Ships' greenhouse emissions revealed,» Nature, 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nature.com/articles/news.2008.574>. [Πρόσβαση 17 Δεκεμβρίου 2022].
- [51] Office of Rail and Road, «Rail Emissions,» 25 Αυγούστου 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://dataportal.orr.gov.uk/statistics/infrastructure-and-emissions/rail-emissions/>. [Πρόσβαση 17 Δεκεμβρίου 2022].
- [52] Wikipedia, «Google Maps,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Maps. [Πρόσβαση 15 Μαΐου 2023].
- [53] I.Thushari, J. Vicheanteab, D.Janjaroen, «Material flow analysis and life cycle assessment of solid waste management in urban green areas, Thailand,» 25 Σεπτεμβρίου 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available:



- <https://sustainenvironres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42834-020-00057-5>.
[Πρόσβαση 17 Δεκεμβρίου 2022].
- [54] B. Johnke, «IPCC - Emissions from Waste Incineration,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_3_Waste_Incineration.pdf.
[Πρόσβαση 17 Δεκεμβρίου 2022].
- [55] Cumpsty N.A., «PREPARING FOR THE FUTURE: REDUCING GAS TURBINE ENVIRONMENTAL IMPACT,» Ιούνιος 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://asmedigitalcollection.asme.org/turbomachinery/article-abstract/132/4/041017/433748/Preparing-for-the-Future-Reducing-Gas-Turbine?redirectedFrom=fulltext>. [Πρόσβαση 30 Ιουνίου 2023].
- [56] Τσαγγαράκης Ε. Σ., «Encapsulating measurement uncertainty UPROP: A Python library for Uncertainty Propagation,» Μάρτιος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/55456>. [Πρόσβαση 16 Φεβρουαρίου 2022].
- [57] K. Oehmichen, S. Majer, F. Müller-Langer, D. Thrän, «Comprehensive LCA of Biobased Sustainable Aviation Fuels and JET A-1 Multiblend,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3372>.
- [58] K. Lokesh, V. Sethi, T. Nikolaidis, E. Goodger, D. Nalianda, «Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance,» 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953415000859>. [Πρόσβαση 10 Φεβρουαρίου 2023].
- [59] ICAO Enviroment, «CORSIA Eligible Fuels,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx>. [Πρόσβαση 8 Ιουνίου 2023].
- [60] C. Koroneos, A.Dompros, G.Roumbas, N. Moussiopoulos, «Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes,» Νοέμβριος 2004. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319904000655>. [Πρόσβαση 18 Δεκεμβρίου 2022].
- [61] Liang Jing, Hassan M. El-Houjeiri, Jean-Christophe Monfort, James Littlefield, Amjaad Al-Qahtani, Yash Dixit, Raymond L. Speth, Adam R. Brandt, Mohammad S. Masnadi, Heather L. MacLean, William Peltier, Deborah Gordon & Joule A. Bergerson, «Understanding variability in petroleum jet fuel life cycle greenhouse gas emissions to inform aviation decarbonization. Nat Commun 13, 7853 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35392-1>,» 21 Δεκεμβρίου 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available:



<https://doi.org/10.1038/s41467-022-35392-1>. [Πρόσβαση 6 Φεβρουαρίου 2023].

- [62] NASA (E.M. Greitzer, P.A. Bonnefoy, E. de la Rosa Blanco, C.S. Dorbian, M. Drela et al.), «N+3 Aircraft Concept Designs and Trade Studies, Final Report : Volume 2: Appendices— Design Methodologies for Aerodynamics, Structures, Weight, and Thermodynamic Cycles,» 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20100042398/downloads/20100042398.pdf>. [Πρόσβαση 9 Φεβρουαρίου 2023].
- [63] Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (I.C.A.O.), «An Overview of CORSIA Eligible Fuels (CEF),» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg228-231.pdf. [Πρόσβαση 11 Ιουνίου 2023].
- [64] Raimondi, A., Girotti, G., Blengini G.A. , «LCA of petroleum-based lubricants: state of art and inclusion of additives,» 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-012-0437-4>. [Πρόσβαση 9 Φεβρουαρίου 2023].
- [65] Jamal udin Permana, «COMPARATIVE ANALYSIS OF THE USE OF LUBRICATING OIL IN AIRCRAFT ENGINE TYPES CFM56-7 AND ENGINE CFM LEAP-1B,» Αύγουστος 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://garuda.kemdikbud.go.id/documents/detail/2430210>. [Πρόσβαση 9 Φεβρουαρίου 2022].
- [66] M. Shehadi, B. Jones, M. H. Hosni, «Characterization of the Frequency and Nature of Bleed Air Contamination Events in Commercial Aircraft,» Απρίλιος 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/274782362_Characterization_of_the_Frequency_and_Nature_of_Bleed_Air_Contamination_Events_in_Commercial_Aircraft. [Πρόσβαση 9 Φεβρουαρίου 2023].
- [67] ExxonMobil, «Mobil Jet Oil II,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.exxonmobil.com/en-us/aviation/pds/gl-xx-mobil-jet-oil-ii>. [Πρόσβαση 9 Φεβρουαρίου 2023].
- [68] Tong T. M. , Halliwell I., Ghosn J. L., «A Computer Code for Gas Turbine Engine Weight and Disk Life Estimation,» 2002. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/245353515_A_Computer_Code_for_Gas_Turbine_Engine_Weight_and_Disk_Life_Estimation. [Πρόσβαση 8 Φεβρουαρίου 2023].
- [69] AIRCRAFT COMMERCE, «AIRCRAFT OWNER’S & OPERATOR’S GUIDE : CFM56-5A/-5B modification programmes,» Μάρτιος 2007. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aircraft-commerce.com/wp-content/uploads/aircraft-commerce->



docs/Aircraft%20guides/CFM56-5A-5B/ISSUE%2050-CFM56-5A-5B%20MODS.pdf.

[Πρόσβαση 16 Μαΐου 2023].

- [70] Κοράκης Χ., «Λειτουργία Κινητήρων Turbofan Πολιτικών Αεροσκαφών με Καύσιμα από Ανανεώσιμες Πηγές : Υδρογόνο, Βιοκαύσιμα,» Ιούλιος 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/55042>. [Πρόσβαση 11 Ιουνίου 2023].
- [71] Iulia Dolganova, Vanessa Bach, Anne Rödl, Martin Kaltschmitt, Matthias Finkbeiner, «Assessment of Critical Resource Use in Aircraft Manufacturing,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/358945492_Assessment_of_Critical_Resource_Use_in_Aircraft_Manufacturing. [Πρόσβαση 6 Απριλίου 2023].
- [72] João Vasco de Oliveira Fernandes Lopes, «Life cycle assessment of the airbus A330-200 aircraft,» 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eds.s.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=0&sid=b2eda928-c84f-4914-9edf-783e440cf90e%40redis&bdata=JkF1dGhUeXBIPWlwLHN0aWlzdWlkJnNpdGU9ZWRzLWxpdmUmc2NvcGU9c2l0ZQ%3d%3d#AN=ccul.KOHA.U LISBOA.532520&db=cat08786a>. [Πρόσβαση 20 Μαρτίου 2023].
- [73] Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών Ε.Μ.Π., «CAMACM : Commercial Aircraft's Mission Analysis Computational Model,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ltt.ntua.gr/index.php/en/softwaremn/camacmmn>. [Πρόσβαση 17 Μαΐου 2023].
- [74] L. Jenkinson, P. Simpkin, D. Rhodes, «Civil Jet Aircraft Design,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://booksite.elsevier.com/9780340741528/appendices/data-b/table-3/default.htm>.
- [75] Purdue School of Aeronautics and Astronautics, «CFM56 Family,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/jets/tfans/cfm56.html>. [Πρόσβαση 15 Ιουνίου 2023].
- [76] Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας, «Carbon Emissions Calculator,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://applications.icao.int/icec>. [Πρόσβαση 17 Μαΐου 2023].
- [77] NASA -Glenn Research Center, «Earth Atmosphere Model - Metric Units,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html>. [Πρόσβαση 17 Μαΐου 2023].
- [78] Μ. Κωνσταντίνος, Λειτουργικά Αεροπορικών Κινητήρων, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
- [79] Michael Schmidt, Kay O. Plötner, Clément Pernet, Askin T. Isikveren, Mirko Hornung, «CONTRIBUTIONS OF CABIN RELATED AND GROUND OPERATION,» Deutscher Luft- und



Raumfahrtkongress, Μόναχο, 2013.

- [80] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, «1.A.3.a Aviation 1 Master emissions calculator 2019,» Οκτώβριος 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1/view>. [Πρόσβαση 26 Μαΐου 2023].
- [81] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, «1.A.3.a Aviation 2019,» Οκτώβριος 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation/view>. [Πρόσβαση 5 Μαΐου 2023].
- [82] Μηλιώνης Γέωργιος, «Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας. Ανάλυση Κύκλου Ζωής υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης, συνολικής ισχύος 216 MW,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://dspace.uowm.gr/xmlui/handle/123456789/2993>. [Πρόσβαση 21 Ιουνίου 2023].
- [83] G. Venkatesh, J. Hammervold, H. Brattebø, «Combined MFA-LCA for Analysis of Wastewater Pipeline Networks,» 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1530-9290.2009.00143.x>. [Πρόσβαση 21 Ιουνίου 2023].
- [84] C. Hill, A. Norton- JCH Industrial Ecology Ltd, «LCA database of environmental impacts to inform material selection process,» 2018.
- [85] Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος Η.Π.Α., «Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-06/documents/warm_v15_electronics.pdf. [Πρόσβαση 21 Ιουνίου 2023].
- [86] Stanford Magazine, «The Link Between Plastic Use and Climate Change: Nitty-gritty,» 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://stanfordmag.org/contents/the-link-between-plastic-use-and-climate-change-nitty-gritty>. [Πρόσβαση 21 Ιουνίου 2023].
- [87] Cefic, «Calculating GHG transport and logistics emissions for the European Chemical Industry,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://cefic.org/app/uploads/2021/09/Calculating-GHG-transport-and-logistics-emissions-for-the-European-Chemical-Industry-Guidance.pdf>. [Πρόσβαση 22 Ιουνίου 2023].
- [88] CFM International, «The CFM56 Engine Family,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cfmaeroengines.com/engines/cfm56/>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].



- [89] AIRCRAFT COMMERCE, «CFM56-3 Maintenance analysis and budget,» 2006. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.aircraft-commerce.com/sample_article_folder/maintenance_engineering_1_sample.pdf. [Πρόσβαση 7 Ιουνίου 2023].
- [90] Mathews J.A., «Carbon Negative Biofuels,» 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421507005253>. [Πρόσβαση 30 Ιουνίου 2023].
- [91] ENCON, «Calculation of CO2 offsetting by trees,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.encon.eu/en/calculation-co2-offsetting-trees>. [Πρόσβαση 8 Ιουνίου 2023].
- [92] Delft University of Technology, «The concept, structure, and midpoint tables of the eco-costs for LCA,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ecocostsvalue.com/eco-costs/>. [Πρόσβαση 8 Ιουνίου 2023].
- [93] CFM - Power of Flight, «JAPAN AIRLINES CFM56-7B ENGINE ORDER VALUED AT \$360 MILLION,» Φεβρουάριος 2005. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cfmaeroengines.com/press-articles/japan-airlines-cfm56-7b-engine-order-valued-at-360-million/>. [Πρόσβαση 16 Ιουνίου 2023].
- [94] CFM - The power of flight, «AZAL CFM56-5B ORDER VALUED AT \$45 MILLION,» Σεπτέμβριος 2004. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cfmaeroengines.com/press-articles/azal-cfm56-5b-order-valued-at-45-million/>. [Πρόσβαση 16 Ιουνίου 2023].
- [95] CFM - The power of flight, «CFM, SRIWIJAYA AIR ANNOUNCE CFM56-7B ENGINE ORDER,» Ιούνιος 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cfmaeroengines.com/press-articles/cfm-sriwijaya-air-announce-cfm56-7b-engine-order/>. [Πρόσβαση 16 Ιουνίου 2023].
- [96] MTU Aero Engines, «MTU Maintenance Hannover GmbH,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mtu.de/about-us/mtu-worldwide/mtu-maintenance-hannover/>. [Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2023].
- [97] Avio, «About Avio,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.avio.com/who-we-are>. [Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2023].
- [98] IHI Corporation, «Aero Engines,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ihico.jp/en/products/aeroengine_space_defense/aircraft_engines/index.html. [Πρόσβαση 13 Ιουνίου 2023].
- [99] MTU Maintenance Hannover, «V2500 A1 & A5/D5 Familiarization».



- [100] IHI Corporation, «Works,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ihiaem.com/company/works.html>. [Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2023].
- [101] Kawasaki, «Gifu Works,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://global.kawasaki.com/en/corp/profile/network/gifu.html>. [Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2023].
- [102] Mitsubishi Heavy Industries, «V2500,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.mhi.com/products/air/v2500_turbofan_engine.html. [Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2023].
- [103] Charles Chandler - Aviation Pros, «A Salute to the V2500,» 10 Απριλίου 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aviationpros.com/engines-components/aircraft-engines/turbine-engines-parts/article/10918189/a-salute-to-the-v2500-aircraft-engine>. [Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2023].
- [104] Ebel P., Schnell R., Schönweitz D., Kirmse T., «Structural Modelling and Validation of a V2500 Honeycomb Core Fan Blade,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2016-0387>. [Πρόσβαση 11 Ιουνίου 2023].
- [105] I. Inagaki, T. Takechi, Y. Shirai, N. Ariyasu, «Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry,» 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Application-and-Features-of-Titanium-for-the-Inagaki-Takechi/b11f23e76fddadde37732e1affbf7e1a9bef2a4>. [Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2023].
- [106] Bet Shemesh Engines, «Casting,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://bsel.co.il/casting/>. [Πρόσβαση 15 Ιουνίου 2023].
- [107] A. Burghardt, D. Szybicki, K. Kurc, M. Muszyńska & J. Mucha, «Experimental Study of Inconel 718 Surface Treatment by Edge Robotic Deburring with Force Control,» Νοέμβριος 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-017-9903-3>. [Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2023].
- [108] Aircraft Commerce, «V2500 Family Specifications,» Μάρτιος 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aircraft-commerce.com/wp-content/uploads/aircraft-commerce-docs/Aircraft%20guides/V2500/ISSUE%2056-V2500%20SPECS.pdf>. [Πρόσβαση 11 Ιουνίου 2023].
- [109] MTU - Aero Report, «Engine maintenance résumé for the V2500,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://aeroreport.de/en/video/engine-maintenance-resum-for-the-v2500>. [Πρόσβαση 15 Ιουνίου 2023].



- [110] CFM INTERNATIONAL, «Sustainability - A clear ambition,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cfmaeroengines.com/sustainability/>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].
- [111] CFM International, «LEAP Engines,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cfmaeroengines.com/engines/leap/>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].
- [112] Οργανισμός της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Αεροπορική Ασφάλεια (E.A.S.A.), «Type Certificate Data Sheets for LEAP 1-A, LEAP 1-C,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://web.archive.org/web/20181013014334/https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20E110%20TCDS%20Issue%207%20LEAP-1A-1C.pdf>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].
- [113] Οργανισμός της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Αεροπορική Ασφάλεια (E.A.S.A.), «TYPE-CERTIFICATE FOR LEAP 1-B».
- [114] CFM International, «FIRST LEAP CORE BEGINS TESTING AS RTM FAN COMPLETES CROSS-WIND, ACOUSTICS TESTING,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.cfmaeroengines.com/press-articles/first-leap-core-begins-testing-as-rtm-fan-completes-cross-wind-acoustics-testing/>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].
- [115] AIRBUS, A319/A320/A321 Technical Training Manual.
- [116] Jim Steibel - American Ceramic Society Bulletin, «Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://bulletin-archive.ceramics.org/browse>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].
- [117] Denis Dilba - MTU Aero Engines, «Blisk development - How blade and disk became one,» Μάιος 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://aeroreport.de/en/aviation/blisk-development-how-blade-and-disk-became-one>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].
- [118] Tomas Kellner - General Electric, «Airbus Gets 1st Production Jet Engines With 3D-Printed Parts From CFM,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ge.com/news/reports/airbus-gets-1st-production-jet-engines-with-3d-printed-parts-from-cfm>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].
- [119] Airbus Aircraft, «End-of-life Reusing, recycling, rethinking,» Νοέμβριος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/news/2022-11-end-of-life-reusing-recycling-rethinking>. [Πρόσβαση 9 Ιουνίου 2023].
- [120] M. Gauss, I. S. A. Isaksen, S. Wong, W.C. Wang, «Impact of H₂O emissions from cryoplanes and kerosene aircraft on the atmosphere,» 2003. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002623>. [Πρόσβαση 23 Ιουνίου 2023].



- [121] Johannes Buberger, Anton Kersten, Manuel Kuder, Richard Eckerle, Thomas Weyh, Torbjörn Thiringer , «Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars,» Μάιος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000867>. [Πρόσβαση 8 Ιουνίου 2023].
- [122] Eurostat, «Electricity and heat statistics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_and_heat_statistics. [Πρόσβαση 27 Ιουνίου 2023].
- [123] Μ. Γεώργιος, Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, Αθήνα: Ε.Μ.Π., 2018.
- [124] Αλέξανδρος Παπαγιάννης - Ε.Μ.Π., «Περιβάλλον και Ανάπτυξη,» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://perseus.thermo.mech.ntua.gr/environ-develop/>. [Πρόσβαση 23 Νοεμβρίου 2021].
- [125] G. Ebbing, Σύγχρονη Γενική Χημεία - 10η Διεθνής Έκδοση, ΤΡΑΥΛΟΣ.
- [126] Κ. Σ. Κακκαράς Ε., Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών, Εκδόσεις Τσότρας, 2013.
- [127] L. D. D. Harvey, Global Warming : The hard science, Routledge, 2000.
- [128] I. P. ο. C. C. (IPCC), «IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007,» 2007. [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 23 Νοεμβρίου 2021].
- [129] T. Debates, «Radiative Efficiency,» [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 23 Νοεμβρίου 2021].
- [130] Emma Newburger, CNBC, «What the COP26 climate conference really accomplished,» 16 Νοεμβρίου 2021. [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 23 Νοεμβρίου 2021].
- [131] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, «Το σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών της ΕΕ και η μεταρρύθμισή του,» 9 Μαρτίου 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/el/headlines/society/20170213STO62208/to-sustima-emporias-dikaiomaton-ekprompon-tis-ee-kai-i-metarruthmisi-tou>. [Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2021].
- [132] Παγκόσμια Τράπεζα, «State and Trends of Carbon Pricing 2019,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31755>. [Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2021].
- [133] Νίκος Αυλώνας, «Η σημασία της επιβολής παγκόσμιου «φόρου του άνθρακα,» Καθημερινή, 20 Ιουνίου 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available:



<https://www.kathimerini.gr/economy/561403894/i-simasia-tis-epivolis-pagkosmioy-foroy-toy-anthraka/>. [Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2021].

- [134] CNBC, «Money Is Pouring Into Carbon Capture Tech, But Challenges Remain,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=cxVForLpIQY>. [Πρόσβαση 28 Νοεμβρίου 2021].
- [135] Διεθνής Οργάνωση Ενέργειας, «Direct Air Capture,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>. [Πρόσβαση 28 Νοεμβρίου 2021].
- [136] ABB Measurement Analytics, «How carbon capture plant works,» 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N4m9t9GhEjc>. [Πρόσβαση 27 Νοεμβρίου 2021].
- [137] D. Ibrahim, Συστήματα Ψύξης και Εφαρμογές 3η Έκδοση, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2020.
- [138] Φούντη Μ. , Κολαΐτης Δ., «Αρχές Πυρομηχανικής : Προϋποθέσεις καύσης και Αρχές Πυρόσβεσης,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://helios.ntua.gr/>. [Πρόσβαση 28 Νοεμβρίου 2021].
- [139] sCO₂-Flex, «<https://www.sco2-flex.eu/about/sco2-flex-alliance/>,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. [Πρόσβαση 29 Νοεμβρίου 2021].
- [140] BIOCON-CO₂, «Targeting Industry,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://biocon-co2.eu/targeting-industry/>. [Πρόσβαση 28 Νοεμβρίου 2021].
- [141] GreenDEALCO₂, «Green Deployment of E-fuels and Liquids based on CO₂ for closed and end-of-life coal-related assets,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.greendealco2.com/project>. [Πρόσβαση 30 Νοεμβρίου 2021].
- [142] Οργάνωση Iter, «What is ITER?,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iter.org/proj/inafewlines>. [Πρόσβαση 28 11 2021].
- [143] Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας, «Cutting shipping's GHG emissions - IMO's role,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=hOexcriuPxl&t=1s>. [Πρόσβαση 29 Νοεμβρίου 2021].
- [144] Wärtsilä , «Electric Propulsion Systems,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.wartsila.com/marine/build/electrical-and-power-systems/electric-propulsion/electric-propulsion-systems#Content_C113. [Πρόσβαση 29 Νοεμβρίου 2021].
- [145] Deloitte Insights, «Decarbonizing aerospace : A road map for the industry's lower-emissions future,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available:



<https://www2.deloitte.com/gr/en.html>. [Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2021].

- [146] Δ. Έ. Αερομεταφορών, «Fact Sheet 2 - Sustainable Aviation Fuel : Technical Certification,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>. [Πρόσβαση 31 Ιανουαρίου 2022].
- [147] Μ. Κωνσταντίνος, Εισαγωγή στους αεροπορικούς κινητήρες : Στροβιλοαντιδραστήρες, Αθήνα: Ε.Μ.Π., 1997.
- [148] Nensa Anwar, «CNBC International - Youtube,» 15 Φεβρουαρίου 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=gJ1t993-vw0&list=LL&index=68>. [Πρόσβαση 4 Ιανουαρίου 2022].
- [149] Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών (IATA), «Our Commitment to Fly Net Zero by 2050,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>. [Πρόσβαση 6 Φεβρουαρίου 2022].
- [150] Τζινάβα Χριστίνα, «Μελέτη Συστημάτων Ηλεκτρικά Κατανεμημένης Πρόωσης,» Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2018.
- [151] Airbus, «Hydrogen Fuel Cells, explained,» 15 Οκτωβρίου 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2020-10-hydrogen-fuel-cells-explained>. [Πρόσβαση 12 Ιανουαρίου 2022].
- [152] Airbus, «How to store liquid hydrogen for zero-emission flight,» 10 Δεκεμβρίου 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight>. [Πρόσβαση 12 Ιανουαρίου 2022].
- [153] C. Aviation, «TechTP - Clean Sky 2's first demonstrator!,» 27 Ιανουαρίου 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=kUIpHRzJNX4>. [Πρόσβαση 22 Φεβρουαρίου 2022].
- [154] H. 2. -. C. S. 2, «UltraFan© progressing at full throttle,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.clean-aviation.eu/sites/default/files/2021-10/CLEAN_SKY_Article_UltraFan.pdf. [Πρόσβαση 22 Φεβρουαρίου 2022].
- [155] Υπηρεσία Έρευνας Προηγμένων Αμυντικών Προγραμμάτων, «Arpa-Energy,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/compact-propulsion-engine-optimized-waste-heat-recovery-co-power>. [Πρόσβαση 15 Μαρτίου 2022].



- [156] Stephen A.Andrews, Ruben E.Perez, «Comparison of box-wing and conventional aircraft mission performance using multidisciplinary analysis and optimization,» Elsevier, Αύγουστος 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1270963818304516?via%3Dihub>. [Πρόσβαση 22 Φεβρουαρίου 2022].
- [157] Euronews, «Is the 'box-wing' aircraft the plane of the future?,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=_Xl5DeUCpD4. [Πρόσβαση 22 Φεβρουαρίου 2022].
- [158] Hannah Ritchie, «Short-haul vs. long-haul; rich vs. poor countries: where do global CO2 emissions from aviation come from?,» Our World in Data, 23 Οκτωβρίου 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ourworldindata.org/breakdown-co2-aviation>. [Πρόσβαση 14 Δεκεμβρίου 2021].
- [159] Air Transport Action Group, «FACTS & FIGURES,» Σεπτέμβριος 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.atag.org/facts-figures.html>. [Πρόσβαση 14 Δεκεμβρίου 2021].
- [160] Pierre Friedlingstein, Corinne Le Quéré, Pep Canadell, Rob Jackson, Glen Peters, «Impact of COVID-19 on CO2,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/1.GCP_.pdf. [Πρόσβαση 14 Δεκεμβρίου 2021].
- [161] Graver B. , Rutherford D., Zheng S., «CO2 emissions from commercial aviation: 2013, 2018, and 2019,» 8 Οκτωβρίου 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://theicct.org/publications/co2-emissions-commercial-aviation-2020>. [Πρόσβαση 14 Δεκεμβρίου 2021].
- [162] Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών, «Working Towards Ambitious Targets,» Ιούνιος 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.iata.org/en/programs/environment/climate-change/>. [Πρόσβαση 14 Δεκεμβρίου 2021].
- [163] Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας, «ICAO Council adopts new CO2 emissions standard for aircraft,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.icao.int/newsroom/pages/icao-council-adopts-new-co2-emissions-standard-for-aircraft.aspx>. [Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2021].
- [164] Διεθνής Οργάνωση Πολιτικής Αεροπορίας, «ICAO FACT SHEET - AIRCRAFT CO2 EMISSIONS STANDARD,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/CO2%20Metric%20System%20-%20Information%20Sheet.pdf>. [Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2021].
- [165] Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών, «Carbon offsetting for international aviation,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available:



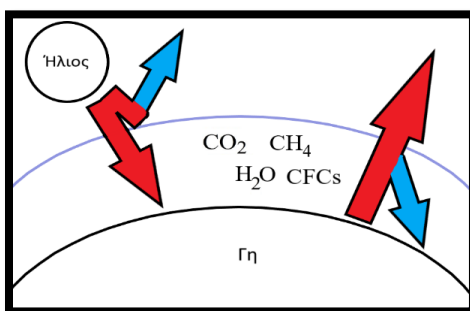
<https://www.iata.org/contentassets/fb745460050c48089597a3ef1b9fe7a8/paper-offsetting-for-aviation.pdf>. [Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2021].

- [166] UK Airlines, «Responding to the Carbon Challenge,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://airlinesuk.org/wp-content/uploads/2017/01/Airlines-UK-Responding-to-the-Carbon-Challenge.pdf>. [Πρόσβαση 15 Δεκεμβρίου 2021].

12. Παράρτημα I : Εισαγωγή στην Κλιματική Αλλαγή

12.1 Φαινόμενο και αέρια του θερμοκηπίου

Η κλιματική αλλαγή συνδέεται με τη παγκόσμια βιομηχανική δραστηριότητα μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ο χημικός Αρρένιους Σβάντε (Arrhenius Svante, 1859-1927) αποκάλυψε έτσι την ιδιότητα του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας να δρα όπως το υάλινο περίβλημα ενός θερμοκηπίου. Η έρευνα του έδειξε ότι η συγκέντρωση του αερίου αυτού είναι ανάλογη της θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης.



Εικόνα 12-1 : Απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου

Η μεταδιδόμενη από τον Ήλιο ακτινοβολία ανακλάται εν μέρει κατά την πρόσπτωση της στην ατμοσφαιρική ασπίδα της Γης. Περίπου το μισό μέρος της φτάνει έως την επιφάνεια του πλανήτη, υπό τη μορφή σκεδαζόμενης και άμεσης υπεριώδους ακτινοβολίας. Με τη θέρμανση της, η επιφάνεια ακτινοβολεί και εκείνη, αλλά αυτή τη φορά με μικρότερη ισχύ και σε μεγαλύτερο μήκος κύματος. Η εξασθενημένη, υπέρυθρη, ακτινοβολία αντιδρά με τα μόρια του αέρα και τα διεγείρει. Η συσσωρευμένη κινητική ενέργεια των μορίων μετασχηματίζεται ξανά σε θερμότητα, με την εκπομπή, εκ νέου, φωτονίων χαμηλής ισχύος. Άρα, ένα σημαντικό κομμάτι της θερμότητας αυτής δεν επιστρέφει στο διάστημα και διαχέεται στο περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται καθώς νέα φωτόνια διεγείρουν ξανά τα μόρια των αερίων του θερμοκηπίου.

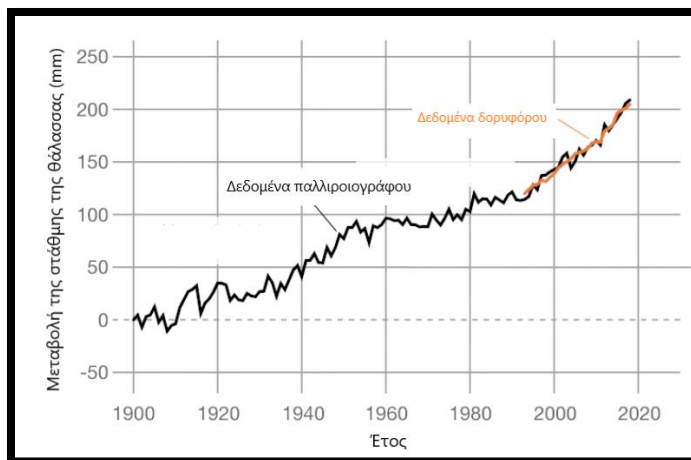
Η ιδιότητα τους να κατακρατούν την υπέρυθη ακτινοβολία δημιουργεί τις ιδανικές συνθήκες για ζωή στη Γη. Χωρίς το φαινόμενο του θερμοκηπίου η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης θα ήταν δεκάδες φορές μικρότερη. Στον αντίποδα βέβαια μεγαλύτερη ποσότητα τέτοιων μορίων στον αέρα προκαλεί την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Δεν έχουν όλα τα αέρια του θερμοκηπίου την ίδια ικανότητα απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η συμβολή κάθε αερίου εξαρτάται τόσο από τη συγκέντρωση του όσο και από τον συντελεστή απορροφητικότητας του, όπως φαίνεται από τη σχέση (11.1) :

$$I(x, \lambda) = e^{-\sum_i a_i c_i \cdot x} \quad (11.1)$$

Η σχέση (1) συνδέει την ένταση μιας ακτινοβολίας μήκους κύματος λ , η οποία διέρχεται από στρώμα αερίων πάχους x , με την ενεργό απορροφητικότητα a_i και τη συγκέντρωση C_i κάθε αερίου του στρώματος [123].

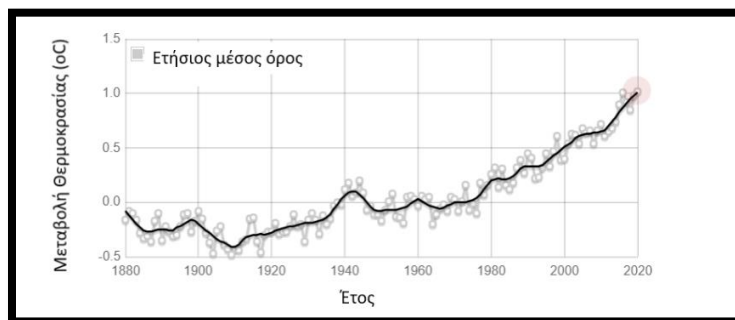
Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι η βασική αιτία του κινήματος για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής. Επιστημονικά δεδομένα μαρτυρούν ότι η θερμοκρασία αυξάνεται σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες. Αποτέλεσμα της αύξησης αυτής είναι η τήξη των πολικών πάγων, γεγονός που είναι ήδη ευρέως γνωστό και ανησυχητικό. Στην [Εικόνα 12-2](#) διακρίνεται η αύξουσα στάθμη των υδάτων ανά εικοσαετία, ενώ στην παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με τον μέσο όρο της περιόδου 1951 έως 1980.



Εικόνα 12-2 : Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας (Πηγή: NASA Goddard Space Flight Center/PO.DAAC⁶⁶)

Το 2020 η μέση επιφανειακή θερμοκρασία έφτασε την υψηλότερη διακύμανση της από τότε που ξεκίνησε η καταγραφή των μετρήσεων.

⁶⁶ <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> (Τελευταία πρόσβαση : 14/11/2021)



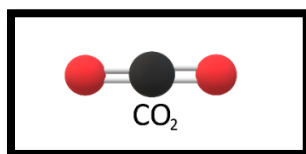
Εικόνα 12-3 : Μεταβολή της θερμοκρασίας (Πηγή: NASA Goddard Space Flight Centre/PO.DAAC)

Επιπλέον, η υπερθέρμανση του πλανήτη συνδέεται με την εξαφάνιση ειδών της ζωικής βιοποικιλότητας, την εμφάνιση και επιδείνωση διαφόρων ασθενειών, κυρίως του αναπνευστικού συστήματος, και προβλήματα στον πρωτογενή τομέα όπως ξηρασίες, πλημμύρες και αφανισμό φυτικών ειδών [124]. Συνέπεια όλων αυτών των κρίσεων θα είναι η ρήξη στις διεθνείς σχέσεις και στη συνεργασία των χωρών. Γίνεται, τότε, αντιληπτό ότι η κλιματική αλλαγή δεν πρόκειται για μία απλή περιβαλλοντική ανησυχία, αλλά αποτελεί ένα παγκόσμιο κοινωνικό πρόβλημα και η αντιμετώπιση της θα καθορίσει τη πορεία της ανθρωπότητας τα επόμενα χρόνια.

Στη συνέχεια αναλύεται κάθε αέριο του θερμοκηπίου ξεχωριστά⁶⁷.

12.1.1 Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι μόριο που αποτελείται από ένα άτομο άνθρακα και δύο άτομα οξυγόνου συνδεδεμένα μεταξύ τους με διπλό ομοιοπολικό δεσμό.



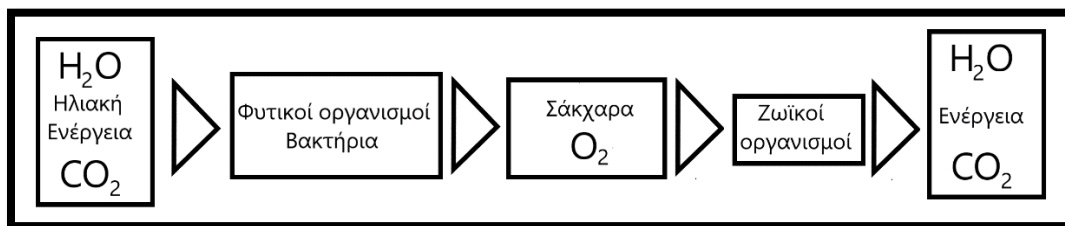
Εικόνα 12-4 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του διοξειδίου του άνθρακα

Είναι ένα άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό αέριο⁶⁸. Έχει άμεση σχέση με τη ζωή του πλανήτη, καθώς αποτελεί βασικό προϊόν της οξείδωσης ή της καύσης.

Ως οξείδωση θα μπορούσε να ονομαστεί κάθε στάδιο σταδιακής απόσπασης σακχάρων ή άλλων οργανικών μορίων κατά την κυτταρική αναπνοή. Η διεργασία αυτή παράγει μόρια νερού και διοξειδίου του άνθρακα.

⁶⁷ Στον αέρα υπάρχουν αναρίθμητα μόρια οξυγόνου (O₂), αζώτου (N₂) και άτομα αργού (Ar), αλλά δεν συμμετέχουν στο φαινόμενο διότι δεν απορροφούν τη διερχόμενη ή ανακλώμενη ακτινοβολία.

⁶⁸ Σε υψηλή συγκέντρωση και μεγάλο χρόνο έκθεσης μπορεί να προκαλέσει συμπτώματα ασφυξίας.



Εικόνα 12-5 : Κύκλος διοξειδίου του άνθρακα

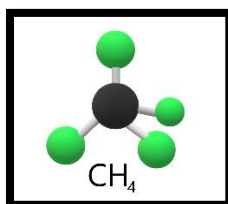
Όπως είναι γνωστό, τα περισσότερα ζώα και ο άνθρωπος απελευθερώνουν στη συνέχεια, μέσω της εκπνοής, τα μόρια αυτά σε αέρια μορφή στο περιβάλλον. Η κυτταρική αναπνοή είναι συμπληρωματική της φωτοσύνθεσης, με την οποία τα φυτά και κάποια βακτήρια παράγουν χρήσιμα σάκχαρα και οξυγόνο, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια και το διαθέσιμο διοξείδιο του άνθρακα του οικοσυστήματος. Οπότε, η ανακύκλωση αυτής της ενέργειας είναι και ο λόγος που δεν είναι εφικτή η πλήρης εξαφάνιση του διοξειδίου του άνθρακα από τον πλανήτη. Τα δάση λειτουργούν ως «αντλίες» διοξειδίου του άνθρακα και συνεισφέρουν στην τήρηση του κατάλληλου ισοζυγίου στην ατμόσφαιρα. Η αποτροπή της υπερθέρμανσης του πλανήτη απαιτεί τη φροντίδα και την προστασία των δασικών εκτάσεων.

Η καύση είναι εξ ορισμού ίδια με την οξείδωση, αλλά συνήθως ο όρος αφορά την οξείδωση ορυκτών και οργανικών καυσίμων (όπως ξύλο). Σε μια καύση εκλύονται καυσαέρια, θερμότητα και φως. Η τέλεια καύση μιας καύσιμης ύλης δίνει ως προϊόντα διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς (H₂O) και άζωτο (N₂). Στην πραγματικότητα όμως η καύση είναι ατελής και εκτός αυτών παράγονται και διάφορα τοξικά παραπροϊόντα όπως η αιθάλη, το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και του άνθρακα (CO)⁶⁹.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι παραπροϊόν και άλλων αντιδράσεων βιομηχανικής σημασίας (π.χ. παραγωγή υδρογόνου ή αμμωνίας) ενώ χρησιμοποιείται επιπλέον ως ψυκτικό και πυροσβεστικό μέσο.

12.1.2 Μεθάνιο (CH₄)

Το μεθάνιο είναι το πιο απλό αλκάνιο και ένας από τους πιο ευρέως γνωστούς υδρογονάνθρακες. Αποτελείται από ένα άτομο άνθρακα συνδεδεμένο με τέσσερα άτομα υδρογόνου, μέσω απλών ομοιοπολικών δεσμών.



Εικόνα 12-6 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του μεθανίου

⁶⁹ Το μονοξείδιο του άνθρακα δεν αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου.



Είναι ένα άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό αέριο⁷⁰. Γενικά, μίγματα υδρογονανθράκων συναντώνται στα ορυκτά καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας. Ειδικά το φυσικό αέριο, αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από μεθάνιο. Ως πλεονέκτημα έχει ότι μεταφέρεται πολύ εύκολα και δεν αφήνει τέφρα κατά την καύση του. Ωστόσο, εκτιμάται ότι τα αποθέματα του μπορεί να έχουν εξαντληθεί νωρίτερα από το 2030 [125].

Το μεθάνιο είναι εξαιρετικά εύφλεκτο⁷¹ και έτσι είναι επιθυμητό αέρια που μπορεί να προέρχονται, για παράδειγμα, από βιομάζα να εμπλουτίζονται σε περιεκτικότητα με μεθάνιο. Η κυκλική οικονομία αυτή βοηθά στην εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας και διενεργείται μέσω της μεθανοποίησης. Ένα παράδειγμα αντίδρασης μεθανοποίησης φαίνεται στην εξίσωση (11.2) :

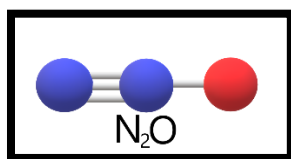


Πρόκειται για την αντίδραση μεθανοποίησης ενός αερίου με αναλογία H_2/CO ίση με 3, με χρήση καταλυτών νικελίου, την οποία κατόρθωσε να πραγματοποιήσει πρώτος ο χημικός Πολ Σαμπασιέ (Paul Sabatier, 1854 – 1941) [126].

Άλλοι τρόποι παραγωγής μεθανίου και εκπομπής του στην ατμόσφαιρα είναι από πετρελαιοπηγές, από τα ορυχεία, από την κτηνοτροφία και από τις χωματερές. Επίσης παράγεται, φυσικά, στα έλη από τη σήψη οργανικής (ζωικής και φυτικής) ύλης.

12.1.3 Υποξείδιο του αζώτου (N_2O)

Το υποξείδιο του αζώτου είναι ένα μόριο αποτελούμενο από δύο άτομα αζώτου και ένα άτομο οξυγόνου.



Εικόνα 12-7 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του υποξειδίου του αζώτου

Το αέριο αυτό είναι άχρωμο, άφλεκτο ενώ έχει ήπια οσμή. Είναι γνωστό για τη λειτουργία του ως ελαφρύ αναισθητικό, αλλά η μακροχρόνια χρήση του μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία.

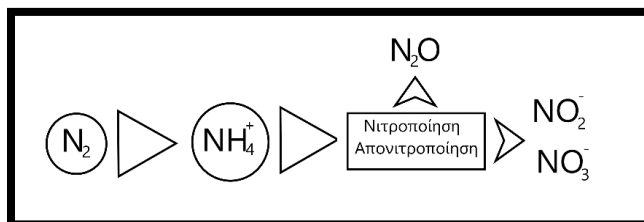
Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται φυσικά κατά τη διάρκεια του κύκλου του αζώτου. Το αζώτο, ως άτομο, υπάρχει σε διάφορες μορφές στην ατμόσφαιρα, όπως το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και η αμμωνία (NH_3). Οι φυτικοί οργανισμοί και οι μικροοργανισμοί αξιοποιούν το άζωτο (N_2) της ατμόσφαιρας, μέσω βακτηρίων που το μετατρέπουν, σε πρώτο στάδιο, σε αμμώνιο (NH_4^+) και σε δεύτερο στάδιο σε νιτρώδες (NO_2^-) και νιτρικό

⁷⁰ Σε υψηλή συγκέντρωση και μεγάλο χρόνο έκθεσης μπορεί να προκαλέσει δυσφορία.

⁷¹ Έχει θερμοκρασία ανάφλεξης $T_{ig} = -170^\circ C$. Δηλαδή ανάφλεξη πραγματοποιείται με την ύπαρξη οποιασδήποτε πηγής θερμότητας.



ανιόν (NO_3^-), που είναι θρεπτικά. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης μετατροπής, που αποτελείται από τις διαδικασίες της νιτροποίησης (nitrification) και της απονιτροποίησης (denitrification), απελευθερώνονται ποσότητες υποξειδίου του αζώτου. Με όμοιους μηχανισμούς γίνεται και η παραγωγή του από τους ωκεανούς [127].

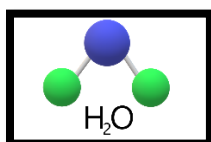


Εικόνα 12-8 : Κύκλος του Αζώτου

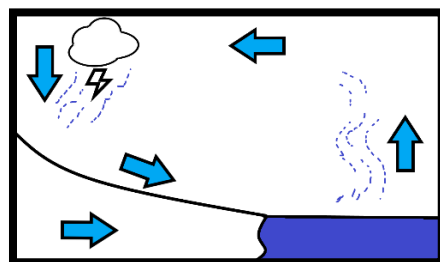
Η ισορροπία του κύκλου του αζώτου διαταράσσεται από ανθρωπογενείς παράγοντες όπως η γεωργία και η κτηνοτροφία. Ειδικά στη πρώτη, υποξείδιο του αζώτου παράγεται από τη χρήση και διάσπαση αζωτούχων και αμμωνιακών λιπασμάτων. Σημαντική επίσης είναι η εκπομπή του κατά την κατεργασία των σύνθετων πολυμερών τύπου νάιλον (nylon).

12.1.4 Υδρατμοί (H_2O)

Ένα μόριο νερού αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου. Στους δεσμούς υδρογόνου οφείλει και όλες τις ιδιαίτερες ιδιότητες του, όπως την ικανότητα του να διαλύει ουσίες και να έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα. Στην πλειονότητα τους οι οργανισμοί δεν επιβιώνουν χωρίς την ύπαρξη και κατανάλωση νερού.



Εικόνα 12-9 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του νερού



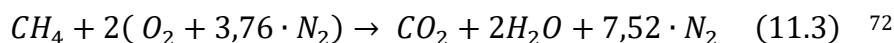
Εικόνα 12-10 : Υδρολογικός κύκλος

Το νερό διαρκώς ανακυκλώνεται, μεταβαίνοντας από την υγρή φάση σε αέρια φάση και αντίστροφα, μέσω του υδρολογικού κύκλου. Οι υδρατμοί, νερό σε αέρια φάση, μένουν για ένα σχετικά περιορισμένο χρονικό διάστημα στην ατμόσφαιρα, ώσπου τη στιγμή που



σχηματίζουν νέφη και επιστρέφουν στη γνωστή υδάτινη μορφή στην επιφάνεια της Γης. Το νερό, επί εδάφους και κάτω από τη Γη, φτάνει στις θάλασσες και εξατμίζεται, με τον κύκλο να επαναλαμβάνεται.

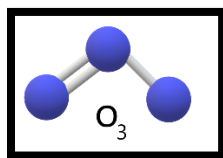
Ένας τρόπος παραγωγής υδρατμών είναι η καύση. Η καύση του μεθανίου περιγράφεται από την εξίσωση (11.3) :



Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, η πλήρης καύση ενός γραμμομορίου μεθανίου παράγει δύο γραμμομόρια υδρατμών.

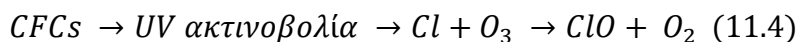
12.1.5 Όζον (O₃) και Φθοροχλωράνθρακες (CFCs)

Το όζον είναι ένα μόριο που αποτελείται από τρία άτομα οξυγόνου. Ως αέριο γίνεται αντιληπτό από το ελαφρύ κυανό του χρώμα και την οσμή του σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Συμβάλλει στην άμυνα της Γης ενάντια στην υπεριώδη (UV : Ultra Violet) ακτινοβολία του Ήλιου σχηματίζοντας ένα προστατευτικό στρώμα που την απορροφά. Το στρώμα του όζοντος απλώνεται στο ύψος της στρατόσφαιρας⁷³.



Εικόνα 12-11 : Μοριακό μοντέλο και τύπος του όζοντος

Οι φθοροχλωράνθρακες είναι αμιγώς ανθρωπογενή αέρια, που χρησιμοποιούνταν ως ψυκτικά μέσα και προωθητικά σε σπρέι. Όμως, λόγω της αδράνειας τους, έφταναν στη στρατόσφαιρα, όπου αντιδρούσαν με την υπεριώδη ακτινοβολία του Ήλιου. Η φωτοχημική αντίδραση διασπά τα μόρια τους σε άτομα χλωρίου (Cl) και αυτά με τη σειρά τους διασπούν το όζον προς μονοξείδιο του χλωρίου και οξυγόνο. Οι αντιδράσεις φαίνονται στην εξίσωση (11.4) :



Οι αντιδράσεις συνεχίζονται καθώς το μονοξείδιο του αζώτου (ClO) αντιδρά με άτομα οξυγόνου (O) και δημιουργεί νέα άτομα χλωρίου. Αποτέλεσμα των αντιδράσεων αυτών σε συνδυασμό με την εκτεταμένη χρήση των φθοροχλωρανθράκων οδήγησε στη δημιουργία της καταστροφικής τρύπας του όζοντος. Ευτυχώς η παγκόσμια κοινότητα ανταποκρίθηκε εγκαίρως στις περιστάσεις και έχει δεσμευτεί να σταματήσει οριστικά τη χρήση τους.

⁷² Το περιβάλλον περιλαμβάνει ατμοσφαιρικό αέρα με αναλογία γραμμομορίων N₂/O₂ 79%/21% = 3,76/1.

⁷³ Το φαινόμενο του θερμοκηπίου συμβαίνει στη τροπόσφαιρα (ύψος μέχρι 15 χιλιομέτρων). Η στρατόσφαιρα βρίσκεται σε ύψος 20 με 50 χιλιομέτρων.



Πλέον χρησιμοποιούνται υποκατάστατα που δεν διαμελίζουν το προστατευτικό στρώμα του όζοντος.

Άμεσες εκπομπές όζοντος από τον άνθρωπο δεν υπάρχουν. Η δημιουργία τους όμως είναι δυνατή μέσω των οξειδίων του αζώτου (NO_x) που παράγονται από της μηχανές εσωτερικής καύσης. Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) διασπάται λόγω ακτινοβολίας προς άτομα οξυγόνου. Τα άτομα αυτά συνδέονται με τα αντίστοιχα μόρια οξυγόνου, δημιουργώντας όζον. Όμως οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου είναι, ούτως ή άλλως, περιορισμένες από τη νομοθεσία, εξαιτίας της τοξικότητάς τους.

12.2 Ιδιότητες και εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου

Κάθε αέριο του θερμοκηπίου παράγεται σε διαφορετικές ποσότητες και παραμένει για συγκεκριμένο χρόνο στην ατμόσφαιρα πριν καταστραφεί ή το απορροφήσει κάποιος παράγοντας του περιβάλλοντος. Διαπιστώνεται ότι, με εξαίρεση τους φθοροχλωράνθρακες, τα αέρια αυτά υπάρχουν φυσιολογικά στη φύση και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ευρυθμίας του πλανήτη. Οπότε είναι αναγκαία όχι η πλήρης εξάλειψη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά ο περιορισμός και η μείωση εκείνων που οφείλονται σε ανθρώπινη δραστηριότητα.

Σημαντικό μέτρο σύγκρισης της επιρροής κάθε αερίου αποτελεί ο Δείκτης Δυνατότητας Υπερθέρμανσης (GWP : Global Warming Potential). Ο Δείκτης Δυνατότητας Υπερθέρμανσης αξιολογεί την ικανότητα μιας ορισμένης μάζας αερίου να συμβάλλει στην θέρμανση του πλανήτη, σε σχέση πάντα με το αέριο αναφοράς που δεν είναι άλλο από το διοξείδιο του άνθρακα. Εξ ορισμού, τότε, ισχύει ότι $GWP_{CO_2} = 1$, και γενικά για τα αέρια του θερμοκηπίου ισχύει η σχέση (11.5) :

$$GWP = \frac{\int_0^{t_f} \alpha_A \cdot A(t) dt}{\int_0^{t_f} \alpha_R \cdot R(t) dt} \quad (11.5)$$

Όπου : t_f : Χρονικό διάστημα υπολογισμών [s].

α_A : Επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο λόγω αύξησης κατά ενός kg του υπό μελέτη αερίου [$\text{W/m}^2\text{kg}$]

$A(t)$: Ποσότητα του αερίου σε έναν όγκο ελέγχου, συναρτήσεως του χρόνου [s].

Ο δείκτης R αναφέρεται στο αέριο αναφοράς (το διοξείδιο του άνθρακα), ενώ ο δείκτης A αφορά το αέριο του θερμοκηπίου της επιλογής του μελετητή [128]. Το γινόμενο $\alpha \cdot A(t)$ δίνει την Απόδοση Απορρόφησης Ακτινοβολίας (RF : Radiative Forcing) [129] σύμφωνα με τη σχέση (11.6) :

$$RF(t) = \alpha_A \cdot A(t) \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad (11.6)$$

Ο Δείκτης Δυνατότητας Υπερθέρμανσης μπορεί να υπολογιστεί για είκοσι, εκατό ή πεντακόσια χρόνια και να συμβολίζεται αντίστοιχα ως $GWP-20$, $GWP-100$ και $GWP-500$.



Ένα ακόμη μέγεθος, ο Δείκτης Δυνατότητας Μεταβολής της Θερμοκρασίας (Global Temperature Potential) εκτιμά την αναμενόμενη μεταβολή της επιφανειακής μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη στο βάθος του χρόνου t_f , εξαιτίας ενός αερίου A του θερμοκηπίου, με αέριο αναφοράς R , πάλι, το διοξείδιο του άνθρακα [128]. Η σχέση του δείκτη είναι η (11.7) :

$$GTP = \frac{\Delta T_A^{tf}}{\Delta T_R^{tf}} \quad (11.7)$$

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 12-1) συνοψίζονται τα γνωστά πειραματικά στοιχεία για τα αέρια του θερμοκηπίου :

Πίνακας 12-1 : Ιδιότητες των αερίων του θερμοκηπίου

ΑΕΡΙΟ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ (ΕΤΗ)	RF (ΕΤΟΥΣ) (W/M ²)	GWP-20	GWP-100	GWP-500	GTP-50	GTP-100
CO ₂	[300 , 1.000]	1,33 ±0,16 10 ⁻⁵	1	1	1	1	1
CH ₄	11,8 ± 1,8	5,7 ± 1,4 10 ⁻⁴	82,5 ± 25,98	29,8 ± 11	10 ± 3,8	13,2 ± 6,1	7,5 ± 2,9
N ₂ O	109 ± 10	2,8 ± 1,1 10 ⁻³	273 ± 198	273 ± 130	130 ± 64	290 ± 140	233 ± 110
H ₂ O	0,0388	[-0,1, 0,05]	[-0,004, +0,002]	[-0,001, +0,0005]	-	-	-
O ₃	0,027 (επιφάνεια Γης) [0,27, 0,54] (ανώτερη τροπόσφαιρα)	-	[62,69]	-	-	-	-
CFC-11	52 ± 10,4	2,91 ± 0,65 10 ⁻¹	8.321 ± 2.419	6.226 ± 2.297	2.093 ± 865	6.351 ± 2.341	3.536 ± 1.511

Πηγές : IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) : Sixth Assessment 2021⁷⁴, Environmental Research Letters: The global warming potential of near-surface emitted water vapour (Steven C. Sherwood 2008)⁷⁵, Greenhouse Gas: Energy Education (University of Calgary 2021)⁷⁶, The Atmosphere: Getting a handle on Carbon Dioxide (NASA, 2019)⁷⁷, Global Warming: The Hard Science (L.D. Danny Harvey), 2000

⁷⁴ <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2021)

⁷⁵ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aae018> (Τελευταία πρόσβαση: 17/11/2021)

⁷⁶ https://energyeducation.ca/encyclopedia/Greenhouse_gas (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2021)

⁷⁷ <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/> (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2021)



Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 12-2) παρουσιάζονται οι εκπομπές ανά χώρα ή ήπειρο. Οι εκπομπές εκφράζονται ως κιλοτόνοι (kilo tonnes) διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή λαμβάνεται υπόψη ο Δείκτης Δυνατότητας Υπερθέρμανσης. Επιπλέον συμπεριλαμβάνονται όλοι οι δυνατοί τρόποι εκπομπής (μετακινήσεις, βιομηχανία, γεωργία), εκτός των ασχολιών εκείνων που αφορούν τις διαδικασίες ανάπτυξης της γης και των δασικών εκτάσεων (Land use, land-use change, and forestry (LULUCF)).

Πίνακας 12-2 : Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

ΑΕΡΙΟ	ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ (2019)	ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ ΑΜΕΡΙΚΗΣ (2019)	ΚΙΝΑ (2019)	ΙΝΔΙΑ (2016)	ΡΩΣΙΑ (2019)	ΙΑΠΩΝΙΑ (2019)
CO ₂ [ΚΤ]	3.054.706,50	5.225.816,2	11.535.000	2.231.068	1.679.449,43	1.105.881,14
CH ₄ [ΚΤ]	378.641,24	659.712,70	>1.000.000	312.277,8	249.902,07	28.416,47
N ₂ O [ΚΤ]	217.216,84	457.141,52	-	112.555,56	66.674,14	19.795,14

Πηγές : GHG Emissions – Time series – Annex I (United Nations, 2019)⁷⁸, Greenhouse gas emissions by source sector (Eurostat, 2021)⁷⁹, India. Biennial update report BUR3 (United Nations, 2021)⁸⁰, COP26: China and US agree to boost climate co-operation (BBC, 2021)⁸¹

Από τους δύο προηγούμενους πίνακες προκύπτει ότι οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα είναι οι πιο κρίσιμες να ελεγχθούν, καθώς παραμένει στην ατμόσφαιρα για εκατοντάδες χρόνια και εκπέμπεται σε τεράστιες ποσότητες. Αμέσως επόμενο σημαντικό αέριο είναι το μεθάνιο, με την Κίνα να έχει τις μεγαλύτερες εκπομπές, λόγω των ορυχείων γαιάνθρακα της και της καλλιέργειας ρυζιού. Μια ενθαρρυντική κίνηση είναι η συμφωνία που σύναψε μαζί με τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στα πλαίσια του Συνεδρίου για την Κλιματική Αλλαγή των Ηνωμένων Εθνών. Σκοπός της είναι η προώθηση της καθαρής ενέργειας, η αποτροπή της αποψίλωσης και ο περιορισμός της εκπομπής του μεθανίου. Οι λεπτομέρειες βέβαια της συμφωνίας παραμένουν, ως τώρα, άγνωστες [130]. Αν και η Κίνα για πολλά χρόνια αρνείτο να συμμορφωθεί με τους όρους που έθεταν τα Ηνωμένα Έθνη για την προστασία του περιβάλλοντος, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Ένα τεράστιο ποσοστό των προϊόντων που χρησιμοποιούνται καθημερινά παγκοσμίως κατασκευάζονται στην Κίνα, καταναλώνοντας ενέργεια και εκπέμποντας μεγάλα ποσά αερίων του θερμοκηπίου.

⁷⁸ https://di.unfccc.int/time_series (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2021)

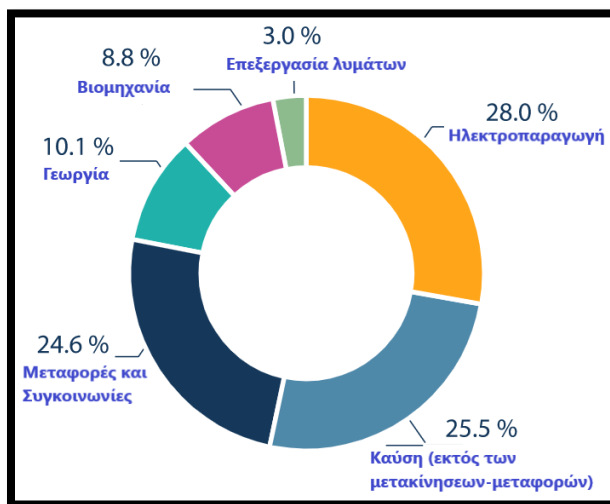
⁷⁹ <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2021)

⁸⁰ <https://unfccc.int/documents/268470> (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2021)

⁸¹ <https://www.bbc.com/news/science-environment-59238869> (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2021)

12.3 Μέτρα αντιρρύπανσης και αειφόρος ανάπτυξη

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να ελεγχθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και πιο συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).



Σχήμα 1 : Εκπομπές ανά τομέα στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2018 (Πηγή : Eurostat)⁸²



Σχήμα 2 : Εκπομπές ανά τομέα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής το 2019 (Πηγή : U.S. Environmental Protection Agency)⁸³

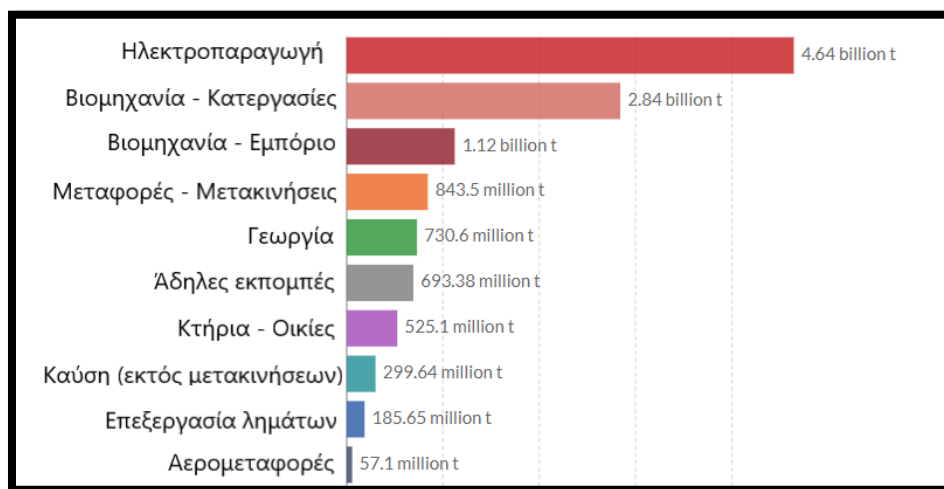
Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, οι πηγές αερίων του θερμοκηπίου είναι οι ακόλουθες:

⁸² <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-4a.html> (Τελευταία πρόσβαση : 27/11/2021)

⁸³ <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions> (Τελευταία πρόσβαση : 17/11/2021)



- Μεταφορές και Συγκοινωνίες, οι οποίες περιλαμβάνουν τα επίγεια και εναέρια μέσα που λειτουργούν με μηχανές εσωτερικής καύσεως.
- Ηλεκτροπαραγωγή, η οποία περιλαμβάνει κάθε είδους εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Βιομηχανία, η οποία περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες όπως τη δημιουργία προϊόντων και την παραγωγή χάλυβα, χημικών, πολυμερών υλικών, γυαλιού και σκυροδέματος.
- Εμπόριο, εργασία, οικιακά, η οποία περιλαμβάνει καύσεις για την θέρμανση κτηρίων ή για την προετοιμασία φαγητού.
- Γεωργία, η οποία περιλαμβάνει τα αγροτικά μηχανήματα και τη χρήση διαφόρων φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων
- Επεξεργασία λυμάτων, που περιλαμβάνει τις χωματερές και την απορροή των όμβριων.

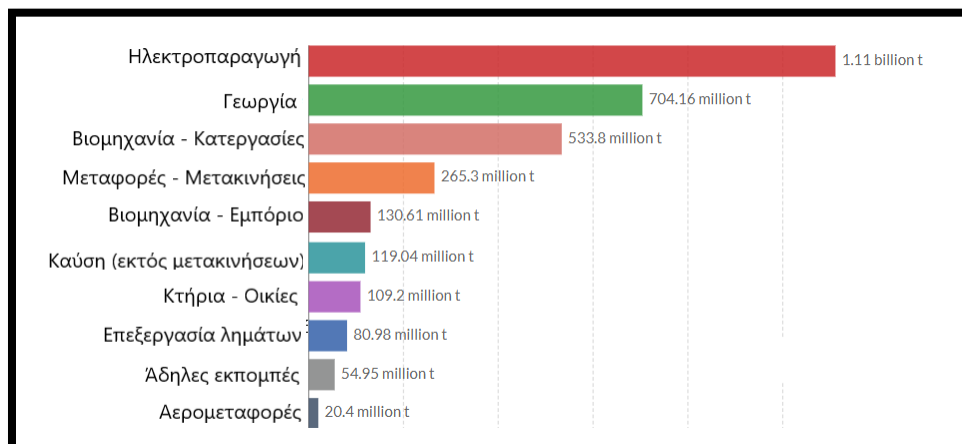


Εικόνα 12-12 : Εκπομπές ανά τομέα στην Κίνα το 2016 (Πηγή : OurWorldinData⁸⁴⁾⁸⁵

Ως παράδειγμα παρουσιάζεται η κατάσταση στην Κίνα (Εικόνα 12-12). Παρατηρείται ότι η παραγωγή ενέργειας συνεχίζει να κατέχει την πρωτιά, ενώ όχι πολύ πίσω φτάνει ο τομέας της βιομηχανίας, αναμενόμενα άλλωστε λόγω του ρυθμού ζωής στην Κίνα. Αναμενόμενες είναι επιπλέον οι εκπομπές λόγω της αυτοκίνησης, εξαιτίας του τεράστιου πληθυσμού της Κίνας. Οι αερομεταφορές βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, διότι λαμβάνονται υπόψη μόνο οι εγχώριες πτήσεις, οι οποίες προφανώς προσδιορίζονται για μικρή μερίδα του κινεζικού πληθυσμού. Όμοιες παρατηρήσεις προκύπτουν και για την Ινδία, όπου βέβαια τη δεύτερη θέση σε εκπομπές κατέχουν οι γεωργικές εργασίες.

⁸⁴ <https://ourworldindata.org/co2/country/china> (Τελευταία πρόσβαση: 28/11/2021)

⁸⁵ Οι μετρήσεις γίνονται με αναγωγή σε εκατομμύρια τόνους CO₂ (GWP)



Σχήμα 3 : Εκπομπές ανά τομέα στην Ινδία το 2016 (Πηγή: OurWorldinData⁸⁶⁾⁸⁷

Το συμπέρασμα είναι ότι κάθε πτυχή της καθημερινότητας αναπόφευκτα συνεισφέρει στην επιδείνωση της κλιματικής κρίσης. Οι τομείς με τα πιο σημαντικά ποσά εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου είναι η ηλεκτροπαραγωγή (θερμικοί σταθμοί ενέργειας), η βιομηχανία (παραγωγή πολυμερών, κατεργασία μεταλλικών υλικών, προϊόντα) και τα μέσα μεταφοράς (αυτοκίνητα, αεροπλάνα, πλοία). Έμφαση επομένως θα δοθεί σε αυτούς τους τρεις τομείς και στις μεθόδους με τις οποίες είναι δυνατόν οι δραστηριότητες τους να γίνουν ανεξάρτητες του άνθρακα (carbon free).

12.3.1 Τιμολόγηση του άνθρακα

Για διασφάλιση της εφαρμογής των μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος και την προώθηση εναλλακτικών, καθαρών πρακτικών, έχει εισαχθεί η λεγόμενη τιμολόγηση του άνθρακα. Αυτή περιλαμβάνει δύο μέτρα, το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (E.T.S. : Emissions Trading System) και τον Φόρο του Άνθρακα (Carbon Tax).

Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών υποχρεώνει την έκδοση άδειας για κάθε εκπομπή ενός τόνου διοξειδίου του άνθρακα από μονάδες παραγωγής ενέργειας ή εργοστάσια. Οι άδειες αγοράζονται μέσω δημοπρασίας και η τιμή επηρεάζεται από τη ζήτηση και την προσφορά. Το πρόβλημα αυτής της τακτικής όμως είναι ότι σε περιόδους οικονομικής κρίσης οι τιμές είναι χαμηλές και, έτσι, οι περισσότερες βιομηχανίες αγοράζουν την άδεια και δεν επενδύουν στην πράσινη τεχνολογία. Ένας άλλος τρόπος αναπλήρωσης του ενός τόνου άνθρακα είναι η αναδάσωση και γενικώς η ανάπτυξη των δασικών εκτάσεων [131] [132].

Ο Φόρος του Άνθρακα λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όντας ένα τέλος το οποίο επιβάλλεται από μια κυβέρνηση σε οποιαδήποτε εταιρεία που καίει ορυκτά καύσιμα. Υπάρχουν σκέψεις για καθολική επιβολή του φόρου σε όλους τους ρυπαντές, ακόμη δηλαδή και οδηγούς αυτοκινήτων. Φυσικά αυτό θα επιφέρει προβλήματα στα άτομα

⁸⁶ <https://ourworldindata.org/co2/country/india> (Τελευταία πρόσβαση: 28/11/2021)

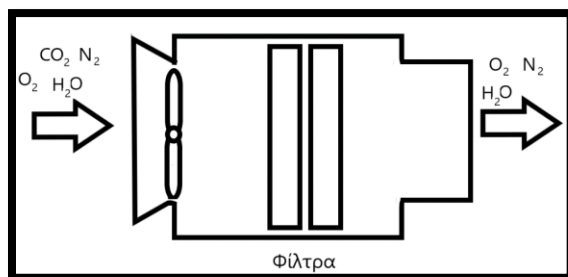
⁸⁷ Οι μετρήσεις γίνονται με αναγωγή σε εκατομμύρια τόνους CO₂ (GWP)

χαμηλού ή μεσαίου εισοδήματος οπότε και εξετάζεται η σταδιακή εφαρμογή του φόρου, πρώτα στις μεγαλύτερες εταιρείες και ρυπαντές με μεγαλύτερη επιρροή [133].

12.3.2 Τεχνολογία απαγωγής διοξειδίου του άνθρακα

Το Κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών ενέκρινε επένδυση ύψους 450 εκατομμυρίων δολαρίων το 2020 για την ανάπτυξη τεχνολογίας απαγωγής του διοξειδίου του άνθρακα, δεδομένου ότι μείωση των εκπομπών δεν είναι αρκετή ώστε να αποφευχθούν οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Πρόκειται για εγκαταστάσεις Άμεσης Σύλληψης Αέρα (Direct Air Capture) οι οποίες απορροφούν απευθείας το επιπλέον διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα. Η τεχνολογία αυτή είναι δαπανηρή, με το κόστος της να κυμαίνεται μεταξύ τριακοσίων και οκτακοσίων εκατομμυρίων δολαρίων ανά τόνο άνθρακα [134].

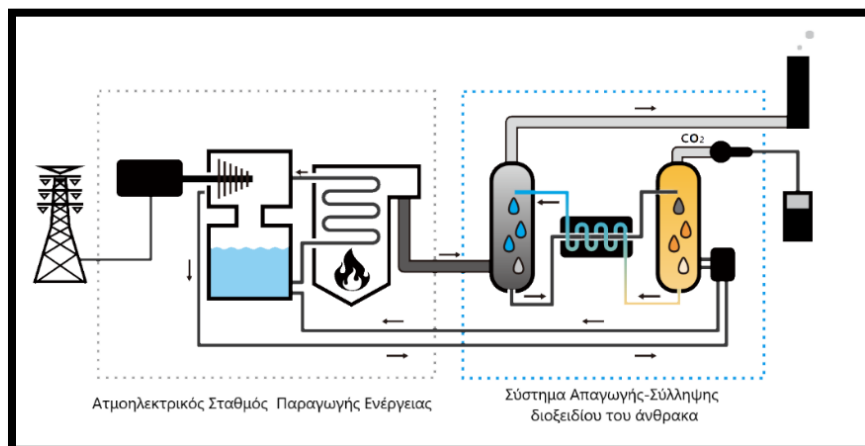
Για το υψηλό τους κόστος ευθύνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις λειτουργίας τους. Οι εγκαταστάσεις Άμεσης Σύλληψης Αέρα αποτελούνται από πολλές μονάδες οι οποίες αποθηκεύουν αέρα, μέσα στον οποίο βρίσκεται χαμηλής συγκέντρωσης διοξείδιο του άνθρακα. Τα μόρια κάθε απορροφημένης ποσότητας διέρχονται από έναν συγκλίνοντα αγωγό λόγω της περιστροφής ενός ισχυρού ανεμιστήρα. Μέσα σε κάθε μονάδα απαγωγής είναι τοποθετημένα φίλτρα τα οποία μπορούν να συγκρατούν τα μόρια του διοξειδίου του άνθρακα με χημικό τρόπο, λόγω των απορροφητικών ιδιοτήτων τους. Ο υπόλοιπος «καθαρός» αέρα διοχετεύεται πάλι στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 12-13).



Εικόνα 12-13 : Άμεση Σύλληψη Αέρα

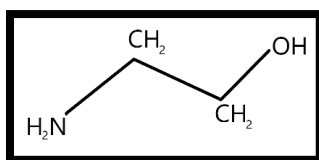
Αυτή τη στιγμή δεκαεννέα τέτοιες εγκαταστάσεις είναι σε λειτουργία στην Ευρώπη, στις Ηνωμένες Πολιτείες και στον Καναδά. Δεν είναι μεγάλης έκτασης και το αποθηκευμένο διοξείδιο χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ανθρακούχων ποτών. Η εξέλιξη τέτοιων μονάδων είναι απαραίτητη για τομείς όπως η αεροπλοΐα όπου η από-ανθρακοποίηση (decarbonisation) είναι δύσκολη [135].

Άλλη μέθοδος απαγωγής διοξειδίου του άνθρακα είναι η σύλληψη του απευθείας από την πηγή. Μια εφαρμογή της τεχνολογίας Σύλληψης και Αποθήκευσης Άνθρακα (Carbon Capture and Storage) σε θερμικό σταθμό παραγωγής ενέργειας παρουσιάζεται στην Εικόνα 12-14.



Εικόνα 12-14 : Σύλληψη και Αποθήκευση Άνθρακα (Πηγή : Toshiba Energy Systems and Solutions⁸⁸)

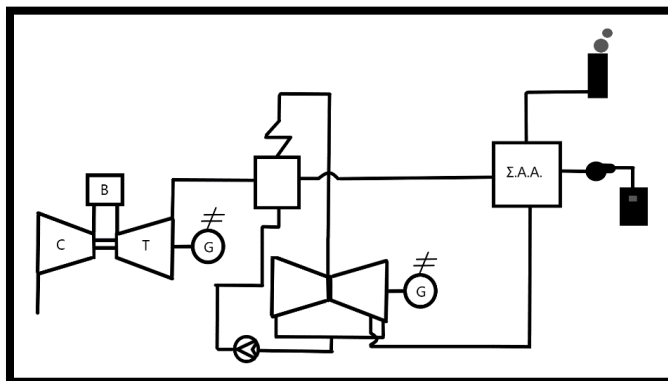
Αριστερά, εκτελείται ο κλασικός κύκλος νερού-ατμού (Rankine). Το νερό αλλάζει φάση καθώς θερμαίνεται, λαμβάνοντας τη μορφή ατμού. Ο ατμός κινεί τον ατμοστρόβιλο ο οποίος δίνει μηχανική ισχύ στη γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ο ατμός συμπυκνώνεται και ο κύκλος αρχίζει ξανά. Όμως, ταυτόχρονα, γίνεται απομάστευση ατμού από τον ατμοστρόβιλο για χρήση στο σύστημα σύλληψης άνθρακα, δεξιά. Το σύστημα σύλληψης αποτελείται από δύο πύργους· ο κίτρινος είναι ο πύργος αποστράγγισης (stripper column) και ο σκούρος είναι ο πύργος του διαλυτικού (solvent column). Η διεργασία στηρίζεται στην ικανότητα της ένωσης αιθανολαμίνη να αντιδρά με μίγματα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και αζώτου (N_2) και να δεσμεύει το πρώτο.



Εικόνα 12-15 : Συντακτικός τύπος αιθανολαμίνης

Τα καυσαέρια εισέρχονται στον πύργο του διαλυτικού, όπου κατά την άνοδο τους έρχονται σε επαφή με καθοδικά σταγονίδια αιθανολαμίνης. Δημιουργείται ένα νέο μίγμα, αιθανολαμίνης και διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο μεταφέρεται μέσω εναλλάκτη στην κορυφή του πύργου αποστράγγισης. Ο ατμός της απομάστευσης θερμαίνει το μίγμα και μέσω χημικών αντιδράσεων απελευθερώνεται σε αέρια μορφή το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο συλλέγεται στην κορυφή του πύργου αποστράγγισης. Η αιθανολαμίνη επιστρέφει πίσω στον πύργο του διαλυτικού και ο κύκλος επαναλαμβάνεται [136].

⁸⁸ <https://www.toshiba-energy.com/en/thermal/product/zero-emissions.htm> (Τελευταία πρόσβαση : 27/11/2021)

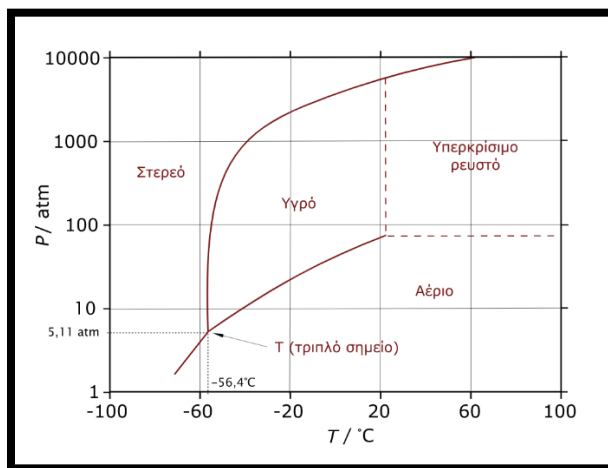


Εικόνα 12-16 : Συνδυασμένος κύκλος με Σύλληψη και Αποθήκευση Άνθρακα (Σ.Α.Α)

Άλλη εκδοχή της ίδιας ιδέας είναι η χρήση τέτοιων συστημάτων σε εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου (Εικόνα 12-16). Σε αυτές γίνεται ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού, από έναν αεριοστρόβιλο και από ένα σύστημα κύκλου ατμού. Οι δύο κύκλοι αυτοί συνδέονται από την παραγωγή ατμού, που γίνεται μέσω της θερμότητας των καυσαερίων της θερμικής μηχανής, που θερμαίνουν τον ατμοπαραγωγό. Αποτέλεσμα είναι η εξοικονόμηση ορυκτών πόρων, ενέργειας, χρήματος και η αποφυγή των αρνητικών επιπτώσεων των αερίων του θερμοκηπίου.

Οι ωφέλιμες χρήσεις του αποθηκευμένου διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να είναι οι ακόλουθες :

- Ψύξη : Το διοξείδιο του άνθρακα είναι γνωστό ψυκτικό μέσο με εμπορική ονομασία R-744. Με την εισαγωγή του σε ψυκτικούς κύκλους εμποδίζεται η ανεξέλεγκτη διαρροή του και αξιοποιείται εποικοδομητικά. Σε σχέση όμως με άλλα μέσα, δεν παρουσιάζει την ίδια θεμιτή θερμοδυναμική συμπεριφορά. Από το διοξείδιο του άνθρακα παρασκευάζεται επίσης ο ξηρός πάγος [137].
- Πυρόσβεση : Οι πυρκαγιές είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον. Άνω του 60% των θανάτων σε πυρκαγιές εντός κτηρίων οφείλονται στα τοξικά αέρια της φωτιάς και όχι σε τραυματισμούς ή εγκαύματα. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα από τα πιο αποτελεσματικά πυροσβεστικά μέσα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις καθώς έχει το μεγάλο πλεονέκτημα της κακής αγωγιμότητας του ηλεκτρισμού. Λόγω της αέριας, πεπιεσμένης μορφής του, απλώνεται εύκολα και καταπολεμά άμεσα και βίαια τις φλόγες [138].
- Ηλεκτροπαραγωγή : Το διοξείδιο του άνθρακα παρουσιάζει ιδιότητες διφασικού ρευστού όταν βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση.



Εικόνα 12-17 : Διάγραμμα φάσης του διοξειδίου του άνθρακα (Πηγή : Wikipedia)

Είναι εφικτό οι υφιστάμενοι κύκλοι νερού-ατμού να αντικατασταθούν με κύκλους υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα προς εξοικονόμηση ενέργειας, κόστους λειτουργίας, καυσίμων και νερού, καθώς έτσι ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται κατά περίπου 10 με 15 %. Οι κύκλοι υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα μπορούν επίσης να συνδυαστούν με εγκαταστάσεις ηλιακής ή πυρηνικής ενέργειας. Έρευνα διεξάγεται από την ευρωπαϊκή οργάνωση sCO₂-Flex ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η τεχνολογία αυτή και να προταθούν μέθοδοι για την ευρεία και ταχεία εφαρμογή της [139].

- Χημικά σκευάσματα, πολυμερή και τρόφιμα : Το ερευνητικό πρόγραμμα BIOCON-CO₂ της Ευρωπαϊκής Ένωσης στοχεύει στην αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων στις χημικές διεργασίες της βιομηχανίας με το διοξείδιο του άνθρακα. Συγκεκριμένα, το BIOCON-CO₂ στοχεύει στην ανάπτυξη τεσσάρων εργοστασίων με βιοαντιδραστήρες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπου θα αξιοποιείται το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ από τη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα ως πρώτη ύλη [140].

12.3.3 Ανανεώσιμες και Εναλλακτικές Πηγές Ενέργειας

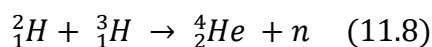
Όπως έχει αναφερθεί, ο απώτερος σκοπός της παγκόσμιας κοινότητας είναι η αντικατάσταση των υπαρχόντων συμβατικών σταθμών ενέργειας (γαιάνθρακα, λιγνίτη) με οικολογικά φιλικότερους. Στους ίδιους τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας βασικός στόχος είναι η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: με χρήση καυσίμων μηδενικής περιεκτικότητας σε άνθρακα ή με την, όσο το δυνατόν, αύξηση του βαθμού της καύσης τους. Η επικείμενη εγκατάλειψη των θερμικών σταθμών γαιάνθρακα και λιγνίτη έχει γίνει αφορμή για έρευνα πάνω στις δυνατότητες μετατροπής τους σε πιο οικολογικές εγκαταστάσεις. Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα GreenDEALCO₂ έχει ακριβώς αυτό τον σκοπό και επιπλέον στοχεύει στην



εξοικονόμηση πόρων που θα απαιτούνταν για τον πλήρη διαμελισμό των συμβατικών θερμικών σταθμών [141].

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική) έχουν το πλεονέκτημα της μηδενικής εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα και μπορούν θεωρητικά να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες της κοινωνίας. Θεωρητικά, βέβαια, γιατί δεν είναι όλοι οι τόποι κατάλληλοι για τη δημιουργία τέτοιων σταθμών παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, δεν υπάρχει παντού ιδανικό αιολικό δυναμικό για ανεμογεννήτριες, ούτε μεγάλοι ποταμοί για υδροηλεκτρικούς σταθμούς, ενώ δεν υπάρχει πάντα επαρκής ηλιοφάνεια ή οργάνωση για το στήσιμο ενός φωτοβολταϊκού πάρκου. Άρα δεν είναι βέβαιο ότι οι πηγές αυτές θα επαρκούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Επιπλέον, δεν πρέπει να παραλειφθεί το γεγονός ότι η κατασκευή τέτοιων εργοστασίων απαιτεί ενέργεια και δομικά υλικά που προέρχονται, σε μεγάλη πλειοψηφία, από ορυκτούς πόρους. Συνεπώς ενώ μία πηγή είναι εν λειτουργία καθαρή, μπορεί κατά την κατασκευή της να έχει ήδη ξεπεράσει τα ανεκτικά όρια ρύπανσης. Το κλειδί λοιπόν, είναι μία κυκλική ροή ενέργειας, με παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από τις ήδη υπάρχουσες. Από τις προαναφερόμενες, στην Ευρώπη η πιο δημοφιλής είναι η αιολική ενέργεια, η εξέλιξη της οποίας ήταν ταχύτερη τα τελευταία είκοσι χρόνια, λόγω του φθηνού της κόστους και της δυνατότητας ενεργειακής ανεξάρτησης (για παράδειγμα, με εγκατάσταση τους σε νησιά).

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μία άλλη λύση, με μεγάλες δυνατότητες αλλά και ταυτόχρονα αρκετά εμπόδια. Λόγω των ατυχημάτων στο Τσερνόμπιλ (Chernobyl, 1986) και στη Φουκουσίμα (Fukushima, 2011) αποφεύγεται η χρηματοδότηση δημιουργίας νέων εργοστασίων. Υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις στην κατασκευή τους, με παράδειγμα τη δημιουργία μεγάλων τσιμεντένιων θόλων για προστασία από τη πιθανή διαρροή ραδιενεργών αερολυμάτων. Για τη διαμόρφωση τέτοιων έργων καταναλώνονται πάλι πόροι και εκπέμπονται αέρια του θερμοκηπίου. Εκτός αυτών των περιορισμών, σαφώς η πυρηνική ενέργεια έχει το μειονέκτημα των ραδιενεργών αποβλήτων και έτσι η επιστημονική κοινότητα ελπίζει στο επόμενο βήμα των σταθμών αυτών, που είναι η πυρηνική σύντηξη. Το τεράστιο πλεονέκτημα της είναι ότι δεν παράγει σημαντική ποσότητα ραδιενεργών αποβλήτων και αέρια του θερμοκηπίου. Αξιοσημείωτο είναι το ερευνητικό πρόγραμμα ITER στη νότια Γαλλία, στο οποίο συνεργάζονται τριανταπέντε χώρες για την κατασκευή ενός ενεργειακά αξιοποιήσιμου Τόκαμακ [142]. Το Τόκαμακ είναι μία μηχανή εντός της οποίας πραγματοποιείται η σύντηξη ισοτόπων του υδρογόνου (δευτέριο και τρίτιο) προς ήλιο (He) που είναι ισχυρή εξώθερμη αντίδραση. Το ήλιο είναι διάσημο ευγενές αέριο και είναι μη τοξικό. Η αντίδραση σύντηξης περιγράφεται από τη σχέση 11.8:

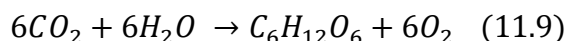


Όπου n το «περισσευούμενο» νετρόνιο λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας. Οι πρώτες δοκιμές της πειραματικής μηχανής θα ξεκινήσουν το 2025.

Στους τωρινούς συμβατικούς σταθμούς, επιδιώκεται η χρήση της βιομάζας ως καύσιμο. Η βιομάζα μπορεί να είναι ζωικής ή φυτικής προέλευσης. Με την καύση βιομάζας φυτικής



προέλευσης απελευθερώνεται η ίδια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που είχε ήδη αφομοιωθεί, λόγω της φωτοσύνθεσης. Η βιομάζα είναι μια ενδιάμεση λύση, όμως, γιατί η μακροχρόνια χρήση διαταράσσει το ανθρακικό ισοζύγιο. Ο ρυθμός καύσης της δηλαδή, δε θα συμβαδίζει με τη γέννηση νέων δέντρων και φυτών. Ένα παράδειγμα δημιουργίας οργανικής ένωσης, κατά τη φωτοσύνθεση, που αποτελεί στη συνέχεια τη βιομάζα, φαίνεται στην εξίσωση 11.9. Η γλυκόζη (C₆H₁₂O₆) είναι ο πιο σημαντικός μονοσακχαρίτης των φυτών:



Η βιομάζα και η δημιουργία δομών αποδοτικής αξιοποίησης της αποτελούν ευρύ ερευνητικό πεδίο και η Ευρωπαϊκή Ένωση χρηματοδοτεί αντίστοιχα προγράμματα, όπως το πρόγραμμα «Ορίζοντας 2020» (Horizon 2020) , για την περαιτέρω ανάπτυξη τους τα επόμενα χρόνια.

Παρουσιάζονται, ενδεικτικά, τα εν εξελίξει έργα στις αντί-ανθρακικές τεχνολογίες που αναφέρθηκαν (Πίνακας 12-3):

Πίνακας 12-3 : Χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων και επενδύσεις πράσινης τεχνολογίας στην Ευρώπη.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΙΔΟΣ	ΧΡΗΜΑΤΟ-ΔΟΤΗΣΗ	ΠΟΣΟ (ΔΙΣ. ΕΥΡΩ)	ΕΤΟΣ
ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	Έρευνα / ITER	Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας	5,61	2021-2025
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	Επένδυση	Χώρες της Ευρώπης	43	2020
ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	Έρευνα / Horizon 2020	Ευρωπαϊκή Ένωση	5,93	2021-2022
ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ CO ₂	Έρευνα / BIOCON-CO2 (Horizon 2020)	Ευρωπαϊκή Ένωση	0,028	2018-2021
ΚΥΚΛΟΙ ΥΠΕΚΡΙΣΙΜΟΥ CO ₂	Έρευνα / sCO ₂ -Flex (Horizon 2020)	Ευρωπαϊκή Ένωση	0,02	2018-2021
ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ	Έρευνα / GreenDEALCO2	Ευρωπαϊκή Ένωση	0,12	2021-2023

Πηγές : Horizon 2020 – BioCon-CO2 - ITER -sCO2 Flex, European Commission^{89 90 91 92}, Wind Europe⁹³,

⁸⁹ <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/secure-clean-and-efficient-energy> (Τελευταία πρόσβαση: 28/11/2021)

⁹⁰ <https://cordis.europa.eu/article/id/123685-bioconco2-major-new-project-aims-to-convert-co2-produced-by-industry-into-valuable-commoditie/es> (Τελευταία πρόσβαση: 28/11/2021)

⁹¹ <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2020/12/18/fusion-energy-political-agreement-in-the-council-on-iter-financing/> (Τελευταία πρόσβαση: 28/11/2021)

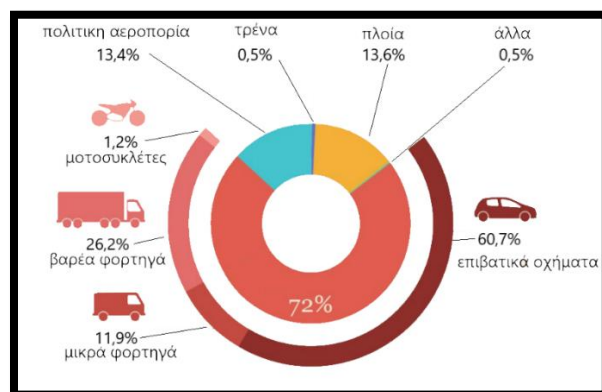
⁹² <https://cordis.europa.eu/project/id/764690> (Τελευταία πρόσβαση: 29/11/2021)

⁹³ <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/financing-and-investment-trends-2020/> (Τελευταία πρόσβαση: 28/11/2021)

12.3.4 Μεταφορές και Μέσα Μεταφοράς

Στον τομέα των μετακινήσεων κυριαρχούν οι μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Εξαίρεση αποτελούν ορισμένα πλοία και υποβρύχια τα οποία μετακινούνται μέσω μηχανών εξωτερικής καύσης τύπου Στέρλινγκ (Stirling) ή με πυρηνική ενέργεια. Οι μηχανές Στέρλινγκ χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε υποβρύχια ενώ γίνονται μελέτες για εφαρμογή τους και σε άλλες περιπτώσεις. Όσον αφορά τα πυρηνοκίνητα σκάφη, η πρόωση εκτελείται με την εκτόνωση ατμού σε αμοστρόβιλο ο οποίος με τη σειρά του παρέχει μηχανική ισχύ.

Στις μηχανές εσωτερικής καύσης ανήκουν οι εμβολοφόροι κινητήρες, οι αεριοστρόβιλοι, οι στροβιλοκινητήρες και οι κινητήρες πρόωσης πυραύλων. Η καύση πραγματοποιείται εντός εσωτερικού θαλάμου καύσης και τα καυσαέρια αξιοποιούνται για την παραγωγή μηχανικής ισχύος. Σχεδόν όλα τα μέσα μεταφοράς όπως εμπορικά πλοία, πλοία αναψυχής, αεροπλάνα και αυτοκίνητα κινούνται χάρη στις μηχανές αυτές.



Εικόνα 12-18 : Εκπομπές μετακινήσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2016 (Πηγή: Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο⁹⁴)

Στις επίγειες εφαρμογές χρησιμοποιούνται οι εμβολοφόροι κινητήρες για λόγους απόδοσης, ασφάλειας, βάρους και χώρου. Βασικό πλεονέκτημα τους είναι η δυνατότητα εύκολης μεταβολής του φορτίου (επιτάχυνση, επιβράδυνση) κάτι που δεν είναι δυνατόν στους αεριοστρόβιλους. Οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούν ως καύσιμο πετρέλαιο (Diesel) ή βενζίνη (Otto) και οπότε η απελευθέρωση των καυσαερίων σκορπά πολλές βλαβερές ουσίες στην ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένου του μη τοξικού, αλλά επιβαρυντικού, διοξειδίου του άνθρακα.

⁹⁴ <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics> (Τελευταία πρόσβαση : 22/11/2021)



Για αρκετές δεκαετίες αναπτυσσόταν συστήματα αντιρρύπανσης στα αυτοκίνητα ώστε να περιοριστούν ρύποι όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου και τα σωματίδια, που είναι όλα τοξικά για τον άνθρωπο.

Όμως, ειδικά τα τελευταία χρόνια η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε όρια στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τους νέους κινητήρες επίγειων οχημάτων. Από όλα τα μέσα μεταφοράς, τα αυτοκίνητα επιδρούν περισσότερο στην υπερθέρμανση του πλανήτη, αφού φέρουν μερίδιο περίπου 70% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στις μετακινήσεις. Επειδή οι κατασκευαστές δύσκολα συμμορφώνονται και επειδή οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης δεν ελέγχονται εύκολα, η λύση-μονόδρομος που έχει προταθεί είναι η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση. Ήδη η Ελλάδα έχει δεσμευτεί να καταργήσει πλήρως την πώληση νέων αυτοκινήτων βενζίνης και πετρελαίου μέχρι το 2030, ενώ ταυτόχρονα επιδοτεί την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα για την ώρα έχουν υψηλό κόστος αγοράς και δεν έχει κατασκευαστεί ακόμη το κατάλληλο δίκτυο ικανό να εξυπηρετεί τις ενεργειακές ανάγκες μιας πόλης γεμάτης ηλεκτρικά οχήματα. Επιπλέον, δεν πρέπει να παραληφθεί ότι για να επιτευχθεί κλιματική ουδετερότητα θα πρέπει οι μπαταρίες που τροφοδοτούν τα οχήματα αυτά να προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και επιπλέον να ανακυκλώνονται στο τέλος της ζωής τους. Η αναπλήρωση ολόκληρου του στόλου αυτοκινήτων έως το 2030 είναι μία μεγάλη πρόκληση, δεδομένου ότι ο αριθμός των νέων αυτοκινήτων εναλλακτικής τεχνολογίας που πωλούνται είναι μικρός (Πίνακας 12-4).

Πίνακας 12-4 : Αγορά και κατοχύρωση νέων αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2019.

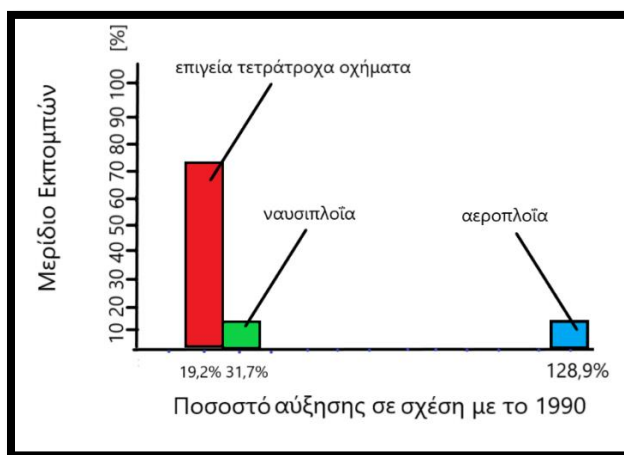
ΧΩΡΑ	ΝΕΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	ΟΤΤΟ	DIESEL	ΥΒΡΙΔΙΚΑ & ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ	ΣΥΝΟΛΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
ΓΕΡΜΑΝΙΑ	3.607.258	2.136.891	1.152.732	317.634 (8,8%)	47.715.977
ΓΑΛΛΙΑ	2.172.967	1.373.999	747.934	51.034 (2,35%)	32.416.180
ΙΤΑΛΙΑ	1.948.479	969.245	793.367	185.867 (9,5%)	39.545.232
ΠΟΛΩΝΙΑ	1.453.505	784.850	498.613	170.042 (11,7%)	24.360.166
ΙΣΠΑΝΙΑ	1.375.381	882.966	449.258	43.157 (3%)	24.558.126
ΕΛΛΑΔΑ	185.120	48.840	-	-	5.406.551

Πηγή : Eurostat⁹⁵

⁹⁵ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU (Τελευταία πρόσβαση: 29/11/2021)

Μια άλλη πρόταση είναι η χρήση υβριδικών οχημάτων, δηλαδή αυτοκινήτων με θερμικό και ηλεκτρικό κινητήρα. Ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να υποκαθιστά τη λειτουργία του θερμικού, εξοικονομώντας καύσιμο και μειώνοντας τις αέριες εκπομπές. Μέχρι τον τελικό στόχο της πλήρους ηλεκτροκίνησης και βελτιστοποίησης της, τα υβριδικά οχήματα είναι ένα απολύτως ρεαλιστικό ενδιάμεσο βήμα.

Στα μεγάλα εμπορικά πλοία ισχύουν κανονισμοί που αφορούν τον τακτικό έλεγχο και παρακολούθηση τους από τις ιδιοκτήτριες εταιρείες τους και αναφορά για το επίπεδο των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό γίνεται βάσει του φορτίου που μεταφέρουν και το βαθμό κατανάλωσης καυσίμου. Για τις εταιρείες που δε τηρούν τις προϋποθέσεις υπάρχουν κυρώσεις. Από αυτούς τους ελέγχους αποκλείονται τα αλιευτικά σκάφη. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organisation) λιγότερο από το 1% του εμπορικού στόλου το 2019 χρησιμοποιούσε εναλλακτικά καύσιμα για την πρόωση του. Για να προωθήσει τις νέες τεχνολογίες βιοκαυσίμων, οι οποίες είναι μια προσωρινή λύση πριν να είναι εφικτή η πλήρης απανθρακοποίηση, έχει οργανωθεί το διεθνές πρόγραμμα «Πράσινο Ταξίδι 2050» (Green Voyage 2050). Σκοπό έχει να βοηθήσει τις χώρες εκείνες που επιβιώνουν μέσω της ναυτιλίας (για παράδειγμα τα νησιά της Καραϊβικής) και να παρέχει τεχνογνωσία πάνω στις πράσινες τεχνολογίες [143]. Εξετάζεται επιπλέον, σε πειραματικό στάδιο, το ενδεχόμενο ανάπτυξης ηλεκτρικού συστήματος κίνησης και στα πλοία. Προς το παρόν, η ηλεκτρική πρόωση βρίσκει εφαρμογή σε μεσαίου μεγέθους σκάφη αναψυχής [144].



Εικόνα 12-19 : Σχέση εκπομπών και αύξησης τους στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τη περίοδο 2016-2017 (Πηγή: Eurostat⁹⁶)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον μελέτης αποτελούν οι εκπομπές των αέριων μετακινήσεων και μεταφορών. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 12-19, τα αεροσκάφη έχουν αυξήσει

⁹⁶ <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20191129STO67756/emissions-from-planes-and-ships-facts-and-figures-infographic> (Τελευταία πρόσβαση : 29/11/2021)



τουλάχιστον κατά μία φορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου τη τελευταία τριακονταετία. Εντούτοις, σε σχέση με τα αυτοκίνητα φαίνεται ότι οι εκπομπές τους είναι αρκετά λιγότερες σε ποσότητα. Διαπιστώνεται ότι η τεχνολογία των αεροσκαφών δεν εξελίσσεται με τρόπο τέτοιο ώστε να μεριμνά για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα περισσότερα αεροπλάνα κινούνται μέσω στροβιλοκινητήρων και γενικά δεν υπάρχουν άμεσα σχέδια για πλήρη απόσυρση τους, όπως συμβαίνει τα τελευταία χρόνια με τους εμβολοφόρους κινητήρες των επίγειων οχημάτων. Και αυτό συμβαίνει, διότι, ενώ αναπτύσσεται έρευνα για ηλεκτρική πρόωση αεροσκαφών, αυτή ακόμη είναι σε πρώιμο στάδιο. Το ερώτημα που προκύπτει είναι, κατά πόσο τελικά οικολογικοί είναι οι στροβιλοκινητήρες και σε τι βαθμό επιβαρύνουν το κλίμα με εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.



13. Παράρτημα II : Κλιματική αλλαγή και αεροπορία

Η μείωση των εκπομπών άνθρακα στους στροβιλοκινητήρες είναι σημαντική, επειδή :

- Οι στροβιλοκινητήρες είναι μηχανές εσωτερικής καύσης που μπορούν να λειτουργούν σε ικανοποιητική ισχύ χωρίς ανησυχίες για μεγάλες οικολογικές επιπτώσεις. Η ιδιότητα τους αυτή τους διαφοροποιεί από τους εμβολοφόρους κινητήρες, οι οποίοι απαιτούν την εγκατάσταση και παρεμβολή πολλών συστημάτων αντιρρύπανσης. Έτσι, η περαιτέρω βελτίωση ως προς την απόδοση τους συμβαδίζει με τον αγώνα για τη βελτίωση του ανθρακικού τους αποτυπώματος.
- Η αεροπορία διαρκώς αναπτύσσεται αλλά ακόμη δεν έχει φτάσει στο σημείο όπου θα μπορεί πραγματικά να επηρεάσει το κλίμα. Εκτιμάται, βέβαια, ότι χωρίς προσπάθειες για μείωση των εκπομπών, μπορεί να φτάσει να εκπέμπει τουλάχιστον 2.000 κιλτοτόνους διοξειδίου του άνθρακα το 2050 [145]. Στόχος είναι η πρόληψη και η ματαίωση ενός τέτοιου μέλλοντος, οπότε και δίνεται η ευκαιρία για διερεύνηση νέων προτάσεων και ανάδειξη νέων τεχνολογιών.
- Το κόστος κατασκευής και λειτουργίας τους εξαρτάται από τις εκπομπές των ρύπων λόγω των επιβεβλημένων φόρων άνθρακα. Μια εταιρεία θα προτιμήσει έναν πιο οικολογικό στροβιλοκινητήρα, ακόμη και αν άλλοι υπερτερούν σε άλλες κατηγορίες επίδοσης.

Τα επίπεδα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα τα επόμενα χρόνια θα εξαρτηθούν σε μεγάλο βαθμό από τη τεχνολογία των νέων αεροσκαφών και στροβιλοκινητήρων και από το πλήθος των ανθρώπων που επιλέγει να πετάξει. Οι προγνώσεις δείχνουν ότι τα επίπεδα θα ανέβουν ακόμη και αν η τρέχουσα τεχνολογία βελτιωθεί (Πίνακας 13-1).

**Πίνακας 13-1 : Πρόγνωση επιπέδων ρύπων μέσω της εφαρμογής μοντελοποίησης IMPACT.**

ΡΥΠΟΣ	2005	2017	2040 / ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	2040 / ΣΤΑΣΙΜΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
CO ₂ [ΚΤ]	141.000	163.000	198.000	224.000
CO [ΚΤ]	110	108	99	99
NO _x [ΚΤ]	669	839	972	1358
HC [ΚΤ]	55	57	58	58

Πηγή : Ευρωπαϊκή υπηρεσία ασφαλείας αεροπορίας⁹⁷

Στο ίδιο κλίμα, η Deloitte εκτιμά ότι ο κλάδος της αεροναυπηγικής θα πληγεί σημαντικά αν δεν εφαρμοστούν άμεσα μέτρα περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα μιλά για μείωση εσόδων κατά σαράντα δισεκατομμύρια δολάρια και την μείωση εκατό δέκα χιλιάδων θέσεων εργασίας [145].

Στη συνέχεια του εδαφίου θα εξεταστούν νέες τεχνολογίες και ιδέες που προτείνονται ή εξετάζονται για να αντικαταστήσουν ή να βελτιώσουν τις τρέχουσες μηχανές εσωτερικής καύσης. Επισημαίνεται ότι ειδικά για τις αερομεταφορές ερευνώνται οι δυνατότητες των τεχνολογιών απαγωγής του άνθρακα (12.3.2).

13.1.1 Βιομάζα και Βιοκαύσιμα

Βιομάζα χρησιμοποιείται σε θερμικούς σταθμούς και όμοια στα αεροσκάφη εξετάζεται η χρήση του λεγόμενου βιώσιμου καυσίμου αεροπορίας (sustainable aviation fuel). Αποτελείται από φύκια, έλαια και άλλα οργανικά υλικά και μπορεί να αντικαταστήσει επαρκώς τη κηροζίνη, μειώνοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η μείωση επιτυγχάνεται εφόσον το καύσιμο είναι, όπως μαρτυρά το όνομα του, βιώσιμο. Δηλαδή, αν κατασκευάζεται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι εφικτό ακόμη και να γίνουν αρνητικές οι ανθρακικές εκπομπές, λόγω της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα από τις φυτικές πρώτες ύλες.

Επιζητείται το βιώσιμο καύσιμο αεροπορίας να μπορεί να αντικαταστήσει τη κηροζίνη «ως έχει» (drop-in) ώστε να μη χρειαστεί επανασχεδιασμός του μηχανισμού τροφοδοσίας καυσίμου ή ολόκληρου του αεροσκάφους. Σχέδια για πλήρη αρχιτεκτονική μετατροπή των αεροσκαφών πραγματοποιείται, βέβαια, στα πλαίσια της πρόωσης μέσω υδρογόνου και ηλεκτρικών πηγών [146]. Το βιοκαύσιμο πρέπει να τηρεί τις παρακάτω προδιαγραφές:

⁹⁷ <https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/overview-aviation-sector/emissions> (Τελευταία πρόσβαση: 23/12/2021)



- Να έχει υψηλή θερμογόνο δύναμη, προς ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ποσότητας σε κάθε έγχυση.
- Να έχει χαμηλό σημείο τήξης, λόγω των κρύων θερμοκρασιών κατά τη πτήση.
- Να έχει χαμηλή πτητικότητα και υψηλό σημείο ανάφλεξης, προς αποφυγή πυρκαγιών.
- Να έχει χαμηλή τάση ατμών, ώστε να αποφεύγεται η ατμοποίηση σε μεγάλα υψόμετρα.
- Να μπορεί να αποθηκεύεται σχετικά εύκολα και σε επαρκείς ποσότητες.
- Να έχει χαμηλό ιξώδες ώστε να διασκορπίζεται εύκολα [147].

Το βιώσιμο καύσιμο αεροπορίας παράγεται βάσει του προτύπου ASTM D7566 (American Society for Testing Materials) και ο Πίνακας 13-2 συνοψίζει τις τεχνολογίες και τα υλικά παρασκευής του :

Πίνακας 13-2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά βιώσιμων καυσίμων αεροπορίας

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ - ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΑΜΙΞΗ (% V/V)	ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ
ΣΥΝΘΕΣΗ FISCHER - TROPSCH	50	Απορρίμματα, βενζίνη, πριονίδια
ΥΔΡΟΓΟΝΟΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΟΙ ΕΣΤΕΡΕΣ ΚΑΙ ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ (H.E.F.A.)	50	Φυτικά Έλαια
ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΟΙ ΜΕ ΥΔΡΟΓΟΝΟ (HH-S.P.K. Ή HH-H.E.F.A)	10	Έλαια φυκιών
ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΙΣΟΠΑΡΑΦΙΝΗ (S.I.P.)	10	Ζαχαροκάλαμο Ζαχαρότευτλο
ALCOHOL-TO-JET (A.T.J.) (ΙΣΟΒΟΥΤΑΝΟΛΗ ΚΑΙ ΑΙΘΑΝΟΛΗ)	50	Ζαχαροκάλαμο Ζαχαρότευτλο, Πριονίδια, Λιγνοκυτταρινικά υπολείμματα
ΚΑΥΣΙΜΟ ΑΠΟ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΥΔΡΟΘΕΡΜΟΛΥΣΗ (C.H. JET FUEL)	50	Λάδια-υπολείμματα βιομηχανίας

Πηγή : Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών⁹⁸

Οι λόγοι που ακόμη δεν έχουν επικρατήσει τα βιοκαύσιμα είναι οικονομικοί. Το κόστος, αρχικά, του βιοκαυσίμου παραμένει ακριβό σε σχέση με το πετρέλαιο (μπορεί να είναι δύο με τέσσερις φορές υψηλότερο). Οπότε και δεν υπάρχει ζήτηση για αυτού του είδους το καύσιμο. Μειωμένη ζήτηση συνεπάγεται και μειωμένη παραγόμενη ποσότητα. Η βιομηχανία που αναλαμβάνει τη δημιουργία του βιοκαυσίμου επιδιώκει και εκείνη να

⁹⁸ <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf> (Τελευταία πρόσβαση : 31/1/2022)

έχει κέρδος. Επομένως, είναι και πιο πρακτικό για μια εταιρεία να εξαγοράσει τον άνθρακα που παράγει, μέσω του συστήματος E.T.S. παρά να επενδύσει σε βιοκαύσιμα, που αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα των τακτικών τιμολόγησης του άνθρακα. Πέρα από αυτά τα προβλήματα όμως, το βιώσιμο καύσιμο αεροπορίας δεν παρουσιάζει κάποιο μειονέκτημα στη λειτουργία της μηχανής. Μέχρι το 2020 είχαν πραγματοποιηθεί 170.000 πτήσεις με χρήση μιγμάτων βιοκαυσίμου-κηροζίνης από μεγάλες αεροπορικές εταιρείες, όπως η United Airlines [148], που είναι πολύ μικρός αριθμός αν συγκριθεί με τις εκατομμύρια πτήσεις που γίνονται ετησίως. Η Boeing έχει δεσμευτεί να έχει έναν στόλο που να κινείται αποκλειστικά με βιώσιμο καύσιμο αεροπορίας μέχρι το 2030 [145].

Η δημιουργία βιοεξανθρακώματος (biochar) μπορεί να μειώσει το ανθρακικό αποτύπωμα της παρασκευής φυτικών βιοκαυσίμων και μάλιστα ακόμη να δώσει αρνητικό ανθρακικό αποτύπωμα.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αερομεταφορών (IATA) τα βιοκαύσιμα θα παίξουν το μεγαλύτερο ρόλο (επιρροή 65 % έναντι άλλων εναλλακτικών που αναφέρονται στο κεφάλαιο) στη μείωση των ανθρακικών εκπομπών, έως το 2050 [149].

13.1.2 Ηλεκτρική πρόωση και ηλεκτρικά αεροσκάφη

Έχουν προταθεί δύο νέα είδη αεροσκαφών: το πρώτο είναι ένα είδος υβριδικού αεροσκάφους, που συνδυάζει στροβιλοκινητήρα με ηλεκτροκινητήρα και το δεύτερο είναι αμιγώς ηλεκτρικά αεροσκάφη.

Το Σύστημα Ηλεκτρικά Κατανεμημένης Πρόωσης (Turboelectric Distributed Propulsion System) αξιοποιεί έναν αεριοστρόβιλο, ουσιαστικά μηχανικής ισχύος, ο οποίος παράγει ηλεκτρική ενέργεια ικανή να κινήσει ηλεκτρικούς ανεμιστήρες (προωστήρες) που τοποθετούνται πάνω στα φτερά του αεροσκάφους και δημιουργούν την απαραίτητη ώση. Τα αεροσκάφη αυτά έχουν διαφορετική δομή από εκείνη των κλασικών αεροπλάνων, η οποία εκμεταλλεύεται καλύτερα τις αεροδυναμικές τους δυνατότητες. Το «καλούπι» για την πλειονότητα των μελλοντικών αεροσκαφών είναι το Μοντέλου του Υβριδικού Πτερού (Blended ή Hybrid Wing Body).

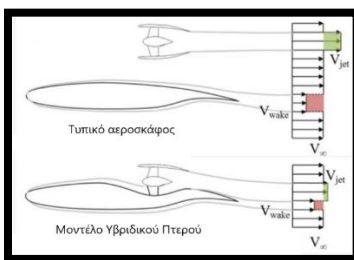


Εικόνα 13-1 : Μοντέλο του Υβριδικού Πτερού (Πηγή : NASA Research Center⁹⁹)

Πλεονεκτήματα αυτού του σχεδιασμού είναι η αύξηση του χώρου σε επιβάτες και φορτίο, η μείωση του θορύβου και, προφανώς, η μείωση των ρύπων των εκπομπών. Οι ηλεκτρικοί

⁹⁹ <https://www.nasa.gov/centers/langley/home/index.html> (Τελευταία πρόσβαση : 31/12/2021)

ανεμιστήρες αναρροφούν τον αέρα και δημιουργούν ώση, αξιοποιώντας επίσης και το δημιουργημένο οριακό στρώμα του αέρα. Αυτός είναι και ο λόγος που τοποθετούνται πάνω στο αεροσκάφος, οπότε και η οπισθέλκουσα δύναμη εξομαλύνεται. Ωστόσο, η τυρβώδης ροή μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνες ταλαντώσεις, οπότε και ο σχεδιασμός των προωστήρων πρέπει να είναι προσεγμένος [150]. Στην **Εικόνα 13-2** φαίνεται πως το Μοντέλο του Υβριδικού Πτερού εξομαλύνει την αποκόλληση της ροής (η οποία οδηγεί σε ενεργειακές απώλειες).



Εικόνα 13-2 : Αποκόλληση της ροής σε δύο τύπους αεροσκαφών¹⁰⁰ (Πηγή : «Μελέτη Συστημάτων Ηλεκτρικά Κατανεμημένης Πρόωσης», Τζιβάνια Χριστίνα, Ε.Μ.Π.)

Στον Πίνακα 13-3 (**Πίνακας 13-3**) παρουσιάζονται οι μελέτες που γίνονται από ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς φορείς πάνω σε αεροσκάφη υβριδικού τύπου.

Πίνακας 13-3 : Σχεδιασμός υβριδικών αεροσκαφών

ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΣΧΕΔΙΑΣΤΕΣ
E-THRUST	AirBus, Rolls-Royce, Πανεπιστήμιο του Cranfield
SAX-50	M.I.T, Πανεπιστήμιο του Cambridge
N2A/N2B	Boeing, M.I.T., NASA
N3-X	NASA

Πηγή : «Μελέτη Συστημάτων Ηλεκτρικά Κατανεμημένης Πρόωσης», Τζιβάνια Χριστίνα, Ε.Μ.Π. 2018

Απολύτως ηλεκτρικά αεροσκάφη είναι δύσκολο να κατασκευαστούν, διότι οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου που απαιτούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνουν πολύ το βάρος. Επιπλέον, στο ίδιο βάρος η συμβατική κηροζίνη προσφέρει περίπου δεκατέσσερις φορές περισσότερη αξιοποιήσιμη ενέργεια. Σε αντίθεση με τα επίγεια οχήματα, δεν έχει υπάρξει ένα πλήρως λειτουργικό επιβατικό αεροσκάφος, αλλά βέβαια πραγματοποιείται έρευνα ώστε κάτι τέτοιο μελλοντικά να είναι εφικτό. Ένα από τα αναμενόμενα ηλεκτρικά αεροσκάφη είναι το Alice της εταιρείας Envision. Το Alice όμως έχει χωρητικότητα μόνο εννέα επιβατών.

¹⁰⁰ Vwake η μείωση της ταχύτητας λόγω της αποκολλημένης ροής, Vjet η αύξηση της ταχύτητας λόγω της ώσης.

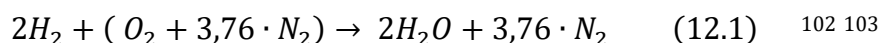


Εικόνα 13-3 : Αεροσκάφος Alice σε παρουσίαση (Πηγή : Eco Aviation¹⁰¹)

Εκτός των δυσκολιών που αναφέρθηκαν τίθεται και το ζήτημα της οικολογικής καταστροφής από τη παρασκευή και απόσυρση συσσωρευτών. Όπως και στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, έτσι και στα ηλεκτρικά αεροσκάφη είναι αναγκαίο οι μπαταρίες που τα κινούν να παράγονται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ώστε να έχει νόημα η αντικατάσταση των συμβατικών πετρελαιοκινητήρων και να μειώνεται ο περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος.

13.1.3 Υδρογόνο

Η καύση του υδρογόνου δίνεται από την εξίσωση (12.1) :



Το υδρογόνο έχει το μεγάλο πλεονέκτημα της μηδαμινής παραγωγής ρύπων κατά τη καύση του. Επίσης παράγει περισσότερη θερμότητα ανά γραμμάριο από κάθε άλλο καύσιμο, έχοντας μεγάλη θερμογόνο δύναμη (120 kJ/kg).

Άλλα πλεονεκτήματα του ως καύσιμο μεταφορικών μέσων είναι το μεγάλο εύρος στην απαιτούμενη αναλογία αέρα για καύση ($\lambda = 1 - 7$). Η ρύθμιση της ισχύος μπορεί να γίνεται, όπως και στους στροβιλοκινητήρες, ποσοτικά. Επομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε τροποποιημένους στροβιλοκινητήρες με αποτέλεσμα την ανθρακική ανεξαρτησία κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν :

- Το μόριο του υδρογόνου είναι πάρα πολύ μικρό και η διαρροή του από τους χώρους αποθήκευσης του είναι ένα συχνό φαινόμενο. Αυτή είναι και η αιτία που δεν χρησιμοποιείται και σε επίγειες εφαρμογές, για παράδειγμα για τη θέρμανση κτηρίων. Ένα αεροσκάφος μπορεί να φτάσει στον ολικό επανασχεδιασμό του προκειμένου να μπορεί να αποθηκεύει υδρογόνο.
- Έχει μικρή πυκνότητα (70 g/Lt) και άρα απαιτούνται μεγάλα ρεζερβουάρ για χρήση του ως καύσιμο μεταφορών.

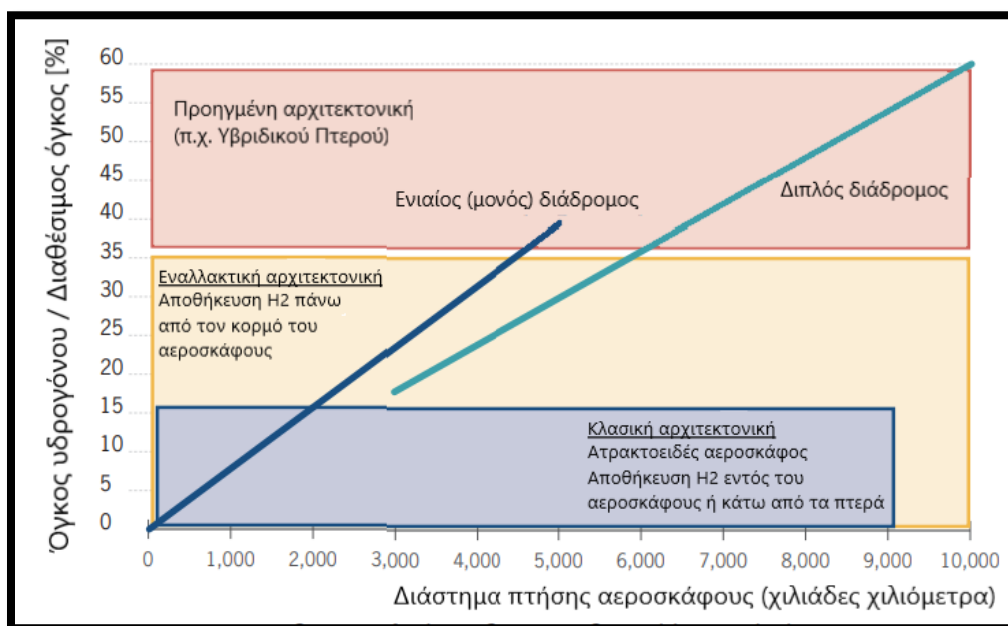
¹⁰¹ <https://www.eco-aviation.org/eviation-completes-prototype-of-alice-electric-aircraft/> (Τελευταία πρόσβαση : 6/1/2022)

¹⁰² Το περιβάλλον περιλαμβάνει ατμοσφαιρικό αέρα με αναλογία γραμμομορίων N_2/O_2 79%/21% = 3,76/1.

¹⁰³ Κατά τη καύση παράγονται και ποσότητες οξειδίων του αζώτου, οπότε δεν είναι μία αντίδραση 100% καθαρή.

- Είναι εξαιρετικά εύφλεκτο. Αυτανάφλεξη μπορεί να συμβεί ακόμη και κατά την εισαγωγή του στον θάλαμο καύσης. Δημιουργούνται προβλήματα όχι μόνο ασφάλειας των επιβατών (κίνδυνος πυρκαγιάς) αλλά και της αντοχής των μηχανικών υποσυστημάτων του αεροσκάφους (διάρκεια ζωής του θαλάμου καύσης ή των εγχυτήρων λόγω της θερμικής καταπόνησης).

Στην παρουσιάζεται η ποσότητα υδρογόνου (ως προς τον διαθέσιμο όγκο του αεροσκάφους) που μπορεί να αποθηκευτεί και να καταναλωθεί για μια ορισμένη διαδρομή. Γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση υδρογόνου ως καύσιμο στα σημερινά αεροπλάνα δεν έχει πρακτική αξία. Απαιτείται σχεδιασμός ενός νέου αεροσκάφους το οποίο να μπορεί να αξιοποιήσει βέλτιστα τα πλεονεκτήματα του υδρογόνου.



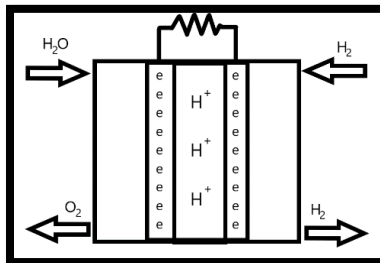
Εικόνα 13-4 : Σύγκριση απαιτούμενου όγκου υδρογόνου με μέγεθος αεροσκάφους και εμβέλεια πτήσης

Άλλη εφαρμογή είναι η χρήση του στις κυψέλες καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου λειτουργούν βάσει των ίδιων ηλεκτροχημικών αρχών των συσσωρευτών. Το υδρογόνο εισέρχεται στην κυψέλη καυσίμου μέσω της ανόδου και τα άτομα του αντιδρούν με έναν καταλύτη. Η αντίδραση κατάλυσης τα διαχωρίζει σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Το οξυγόνο από τον αέρα του περιβάλλοντος εισέρχεται μέσω της καθόδου.

Τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια περνούν μέσα από την πορώδη μεμβράνη του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο. Τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια ρέουν έξω από τη κυψέλη καυσίμου και δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα (Εικόνα 13-5)

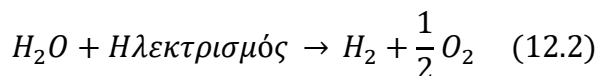
Η βασική διαφορά των συσσωρευτών από τις κυψέλες καυσίμου είναι ότι οι δεύτερες μπορούν να λειτουργούν για πολύ μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα εφόσον υπάρχει παροχή υδρογόνου. Συνεπώς και στην περίπτωση αυτή αντιμετωπίζονται προβλήματα

που αφορούν την αποθήκευση και διαχείριση του υδρογόνου στο αεροσκάφος. Μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι το μόνο παραπροϊόν των κυψελών είναι το νερό που παράγεται από την κάθοδο [151].



Εικόνα 13-5 : Αρχή λειτουργίας κυψελών καυσίμου υδρογόνου

Επιπρόσθετα, όπως συμβαίνει και με τις μπαταρίες, το υδρογόνο παρασκευάζεται βιομηχανικά διότι δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση. Η παραγωγή του θα πρέπει να γίνεται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλιώς δεν περιορίζεται το ανθρωπογενές διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Το λεγόμενο πράσινο υδρογόνο (green hydrogen) μπορεί να δημιουργηθεί μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, μιας ηλεκτροχημικής διαδικασίας που διαχωρίζει το μόριο του νερού σε μόρια υδρογόνου και οξυγόνου :



Το υδρογόνο αποτελεί μία πρόκληση αλλά και ελπίδα για σύγχρονα οικολογικά αεροσκάφη. Η Airbus πρωτοπορεί στο σχεδιασμό αεροσκαφών με καύσιμο το υδρογόνο, έχοντας ως στόχο να λανσάρει τα πρώτα υβριδικά αεροσκάφη (στροβιλοκινητήρας με υδρογόνο και κυψέλες καυσίμου υδρογόνου) το 2035. Τα υβριδικά αεροσκάφη ZEROe θα είναι τριών ειδών: υβριδικού πτερού, ελικοφόρων στροβιλοκινητήρων και στροβιλοκινητήρων διπλού ρεύματος. Γίνεται εκτενής μελέτη ώστε να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την αποθήκευση του, με τη δημιουργία ειδικών δοχείων αποθήκευσης υγρού υδρογόνου (liquid hydrogen tanks), τα οποία θα έχουν κατασκευαστεί έως το τέλος 2023. Η πρώτη τους δοκιμή αναμένεται για το 2025 [152].

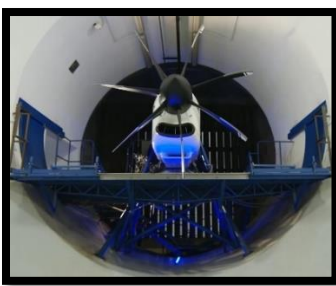
13.1.4 Καινοτόμος σχεδιασμός στροβιλοκινητήρων και αεροσκαφών

Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου ήταν πάντα σημαντική για τα αεροσκάφη και πλέον απαραίτητη για τη μείωση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα. Η επίτευξη της γίνεται με τρεις τρόπους (στους στροβιλοαντιδραστήρες διπλού ρεύματος) :

- Αύξηση του βαθμού παράκαμψης, του ποσοστού του εισαγόμενου αέρα δηλαδή που δεν περνά από την αεριογόνο του στροβιλοκινητήρα.
- Αύξηση του βαθμού συμπίεσης του συμπιεστή, την ικανότητα του να αυξάνει την πίεση του εισαγόμενου αέρα.
- Αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου, μετά τον θάλαμο καύσης.



Τα τρία αυτά μεγέθη είναι χαρακτηριστικά της λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου¹⁰⁴ και μεταβάλλονται ανάλογα με την ποιότητα της κατασκευής και της τεχνολογίας του κινητήρα. Η εξοικονόμηση καυσίμου συμφέρει φυσικά και από άποψη κόστους. Πρώτο παράδειγμα αποτελούν οι κινητήρες LEAP της CFM, οι οποίοι έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την χαμηλή κατανάλωση καυσίμου, μειωμένη κατά 15% σε σχέση με προηγούμενα μοντέλα της πρώτης δεκαετίας του 2000 (CFM56).



Εικόνα 13-6 : Ο στροβιλοκινητήρας TechTP

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω του προγράμματος Clean Sky 2, σχεδιάζει στροβιλοκινητήρες turboprop. Οι κινητήρες turboprop συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των ελικοφόρων στροβιλοαντιδραστήρων (propjet) και των στροβιλοαντιδραστήρων διπλού ρεύματος (turbofan). Συγκεκριμένα, ο στροβιλοκινητήρας TechTP βασίζεται στον στροβιλοκινητήρα Ardiden 3 (κινητήρας ελικοπτέρων, turboshaft) που είναι ελαφρύς και έχει μικρό κόστος λειτουργίας. Ο TechTP μπορεί να επιτύχει έως και 15% λιγότερη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και κατά 5 dB λιγότερο θόρυβο από έναν συμβατικό στροβιλοκινητήρα. Με τις τελευταίες εξελίξεις, ο κινητήρας σχεδιάζεται ώστε να έχει τη δυνατότητα να καίει βιομάζα και υδρογόνο. Η πρώτη εφαρμογή του σε αεροσκάφη αναμένεται για το 2025 [153].

Άλλος ένας καινοτόμος στροβιλοκινητήρας που αναπτύσσεται μέσω του προγράμματος Clean Sky 2 είναι ο UltraFan της Rolls Royce. Έχει το ρόλο του προτύπου για την ανάπτυξη διαφόρων τεχνολογιών (demonstrator).

¹⁰⁴ Ο βαθμός παράκαμψης αφορά αποκλειστικά στροβιλοαντιδραστήρες, στους οποίους έχει νόημα η δημιουργία ώσης.



Εικόνα 13-7 : Ο στροβιλοκινητήρας UltraFan

Πρόκειται για την εξέλιξη της σειράς στροβιλοκινητήρων Trent της ίδιας εταιρείας, με ιδιαίτερο χαρακτηριστικό το πλανητικό σύστημα που παρεμβάλλεται από την έλικα και τον συμπιεστή. Είναι ένα κιβώτιο ταχυτήτων που αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή ώστε αυτός απαιτεί λιγότερες βαθμίδες για να λειτουργήσει. Επομένως αυξάνεται η απόδοση και μειώνεται το βάρος του κινητήρα. Ταυτόχρονα, η αντίστοιχη χαμηλότερη γωνιακή ταχύτητα της έλικας αυξάνει τον βαθμό παράκαμψης και άρα μειώνει την κατανάλωση του καυσίμου [154]. Σημειώνεται ότι υπάρχουν ήδη λειτουργικοί στροβιλοκινητήρες με πλανητικά συστήματα (geared turbofans), όπως ο Pratt & Whitney PW1000G.



Εικόνα 13-8 : Αεροσκάφος με τετραγωνικά πτερά (Πηγή: "Is the 'box-wing' aircraft the plane of the future?"¹⁰⁵)

Άλλη μία μεγάλη καινοτομία είναι η χρήση των αεριοστροβίλων κλειστού κυκλώματος στα αεροσκάφη. Εξετάζεται η δημιουργία υβριδικών αεροσκαφών, που αξιοποιούν τον στροβιλοαντιδραστήρα κατά την εκκίνηση, ενώ ταυτόχρονα ένα κλειστό κύκλωμα υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα (sCO_2) φορτίζει τους συσσωρευτές και λειτουργεί ως ανακομιστής θερμότητας. Μια τέτοια μελέτη είναι η CO-POWER, η οποία χρηματοδοτείται από τις Ηνωμένες Πολιτείες με 2,8 εκατομμύρια δολάρια και αναμένεται να έχει τα πρώτα επίσημα αποτελέσματα το 2023 [155].

Επίσης αξιοσημείωτη είναι η έρευνα που γίνεται πάνω στα αεροσκάφη με πτερά τετραγωνικού πλαισίου (box-wing aircraft) που βασίζονται σε ιδέες του Λούντβιχ Πραντλ (Ludwig Prandtl) (Εικόνα 13-8). Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός ελαττώνει την επίδραση της

¹⁰⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=XI5DeUCpD4> (Τελευταία πρόσβαση : 22/2/2022)



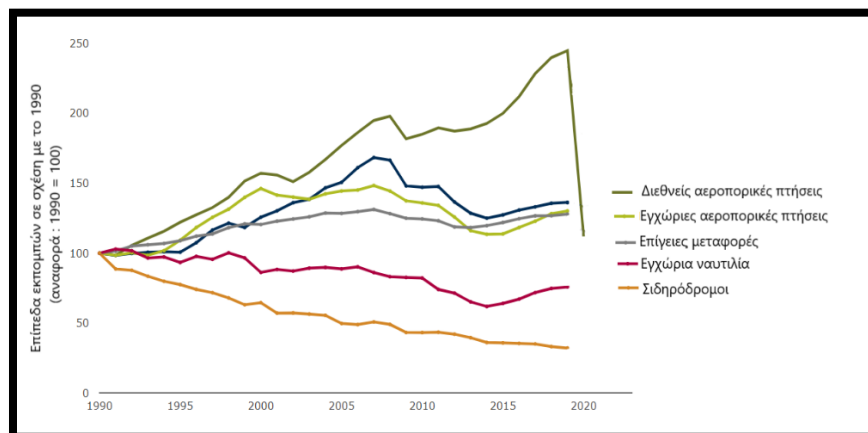
οπισθέλκουσας δύναμης και έτσι μειώνεται η κατανάλωση του καυσίμου. Επιπλέον, η δομή αυτή επιτρέπει περίπου εκατό περισσότερους επιβάτες σε σχέση με άλλα αντίστοιχου μεγέθους σκάφη πολιτικής αεροπορίας. Οι μελετητές του προγράμματος PARSIFAL (PrandtlPlane Architecture for the Sustainable Improvement of Future Airplanes) ευελπιστούν τα πρώτα αεροσκάφη με πτερά τετραγωνικού πλαισίου να είναι έτοιμα μέχρι το 2035 [156] [157].

13.2 Δεδομένα για την αεροπορία

Η αεροπορία έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία εξήντα χρόνια, έχοντας συνεισφέρει στην παγκοσμιοποίηση σε μεγάλο βαθμό. Το αεροπλάνο δεν προορίζεται πλέον για διακοπές και ξεγνοιασιά, αλλά αποτελεί ένα βασικό μέσο μεταφοράς, όπως το μετρό και το λεωφορείο. Και φυσικά είναι ο μόνος τρόπος για πολλούς ανθρώπους να προσέλθουν στην εργασία τους ή να συναντήσουν τις οικογένειες τους. Σημαντικό ρόλο έχει παίξει και η ανάπτυξη της αεροναυπηγικής τεχνολογίας, η οποία έχει γεννήσει νέες εταιρείες αεροπορίας και ο ανταγωνισμός έχει οδηγήσει σε χαμηλότερες τιμές εισιτηρίων και μεγαλύτερη πρόσβαση στο ευρύτερο κοινό. Την τελευταία εικοσαετία άνοδο έχει η εταιρεία Ryanair της οποίας η βασική τεχνική μάρκετινγκ είναι τα φθηνά αεροπορικά εισιτήρια.

Το βασικό αέριο του θερμοκηπίου που παράγεται από την αεροπορία είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Οι σχετικές έρευνες επικεντρώνονται στις εκπομπές από τα καυσαέρια εκάστης πτήσης, άρα στις εκπομπές των στροβιλοκινητήρων που κινούν τα αεροπλάνα. Ετησίως υπολογίζεται ότι οι αεροπορικές πτήσεις εκπέμπουν περίπου ένα δισεκατομμύριο τόνους διοξειδίου του άνθρακα (δηλαδή 1.000 κιλοτόνους (kT) CO₂) και με υψηλό ποσοστό αυτών να προέρχεται από την πολιτική αεροπορία (περίπου 80%, έναντι του 20% των αερομεταφορών) [158] [159]. Είναι φανερό ότι η αναλογία αυτή ισχύει λόγω της αυξημένης κινητικότητας των επιβατών και ότι η αύξηση των εκπομπών οφείλεται στις πολυάριθμες πτήσεις και στην αρχή λειτουργίας των στροβιλοκινητήρων, των οποίων η τεχνολογία δεν έχει αλλάξει στον ίδιο βαθμό με άλλα είδη κινητήρων. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι εμβολοφόροι κινητήρες των αυτοκινήτων, οι οποίοι έχουν γνωρίσει σημαντικές μορφολογικές αλλαγές. Μία από αυτές είναι ο εξαεριωτής (καρμπυρατέρ) ο οποίος παρόλο που ήταν διαδεδομένος σε αυτοκίνητα της δεκαετίας του 1990, σήμερα θεωρείται απαρχαιωμένη τεχνολογία (έχει αντικατασταθεί από τα συστήματα ηλεκτρονικής έγχυσης που είναι πιο αποδοτικά).

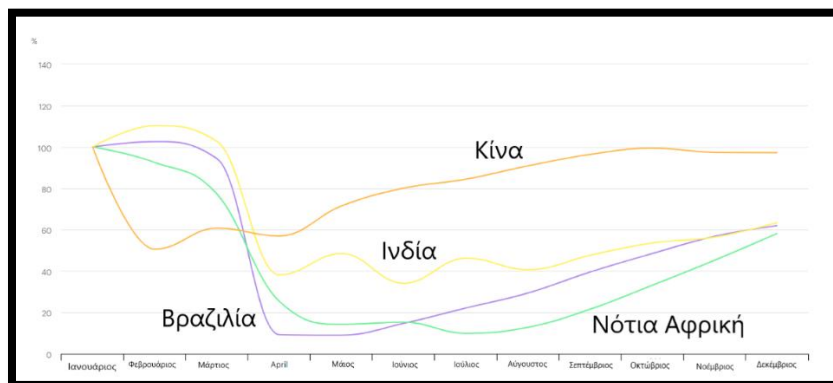
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των εκπομπών σε σχέση με την πανδημία του κορωνοϊού COVID-19. Η πανδημία ξεκίνησε τα τέλη του 2019 στη πόλη Γουχάν (Wuhan) της Κίνας. Από τότε, άρχισε να εξαπλώνεται στην Ευρώπη και στην Αμερική εξαιτίας των αεροπορικών πτήσεων επαγγελματικού και ψυχαγωγικού σκοπού. Ο τομέας της αεροπορίας γνώρισε σημαντική μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, όπως φαίνεται στο παρα.



Εικόνα 13-9 : Επίπεδα εκπομπών στις μετακινήσεις - μεταφορές στην Ευρώπη (Πηγή : Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος¹⁰⁶)

Η πτώση αυτή είναι χαρακτηριστική των απαγορεύσεων κυκλοφορίας (lockdowns) προκειμένου να σταματήσει η διασπορά του κορωνοϊού. Οι προσπάθειες αυτές επίδρασαν και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με τον τομέα των μεταφορών να «ρίχνει» τις εκπομπές κατά 65% (12% της μείωσης αυτής αντιπροσωπεύει την αεροπορία). Δεν είναι όμως αρκετή η μείωση αυτή ώστε να επηρεαστεί η πορεία της κλιματικής αλλαγής ή τα ποσά αερίων που υπάρχουν ήδη στην ατμόσφαιρα, δεδομένης και της μεγάλης διάρκειας ζωής των μορίων διοξειδίου του άνθρακα ([160]. Επομένως, η πλήρης «κατάργηση» των αεροπλάνων και των άλλων μέσων μεταφοράς δεν είναι μία σοβαρή λύση, γνωρίζοντας ήδη το οικονομικό πλήγμα που έχουν οι πρακτικές απαγόρευσης κυκλοφορίας. Στην [Εικόνα 13-10](#), άλλωστε, φαίνεται ότι η χαλάρωση των μέτρων στην Κίνα, η οποία πρώτη επηρεάστηκε από τα μέτρα και είναι μεγαλύτερος παραγωγός αερίων του θερμοκηπίου επέστρεψε στα ίδια επίπεδα εκπομπών.

¹⁰⁶ https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/greenhouse-gas-emissions-from-transport-3#tab-chart_1 (Τελευταία πρόσβαση : 14/12/2021)



Εικόνα 13-10 : Εκπομπές αεροπορίας αναπτυσσόμενων χωρών το 2020 (Πηγή : Διεθνώς Οργάνωση Ενέργειας¹⁰⁷)

Μελέτη για το Διεθνές Συμβούλιο Καθαρών Μεταφορών (International Council on Clean Transportation) των Graver, Rutherford και Zheng [161] δείχνει κατατοπιστικά τη σημερινή κατάσταση των αερομεταφορών και για αυτό το λόγο μέρος των αποτελεσμάτων της παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13-4 : Εκπομπές αερομεταφορών

ΧΩΡΕΣ [ΚΤ CO ₂]	2013 ΕΓΧΩΡΙΕΣ	2013 ΔΙΕΘΝΕΙΣ	2018 ΕΓΧΩΡΙΕΣ	2018 ΔΙΕΘΝΕΙΣ	2019 ΕΓΧΩΡΙΕΣ	2019 (ΔΙΕΘΝΕΙΣ)
ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ ΤΗΣ ΑΜΕΡΙΚΗΣ	101.000	49.200	112.000	61.100	117.000	61.900
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ	52.300	64.200	68.200	79.900	70.200	81.600
ΚΙΝΑ	40.100	22.000	64.400	22.600	68.400	34.500
ΡΩΣΙΑ	6.950	6.170	9.440	7.310	10.300	8.330
ΙΝΔΙΑ	6.070	6.800	11.300	9.260	12.100	9.080
ΙΑΠΩΝΙΑ	9.140	13.200	9.700	15.300	9.920	16.000

Πηγή : «CO₂ emissions from commercial aviation: 2013, 2018, and 2019», ICCT¹⁰⁸

¹⁰⁷ <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020> (Τελευταία πρόσβαση: 14/12/2021)

¹⁰⁸ <https://theicct.org/publications/co2-emissions-commercial-aviation-2020> (Τελευταία πρόσβαση : 14/12/2021)

Πίνακας 13-5 : Συνολικές εκπομπές αερομεταφορών

ΧΩΡΕΣ	2013 ΣΥΝΟΛΙΚΑ	2018 ΣΥΝΟΛΙΚΑ	2019 ΣΥΝΟΛΙΚΑ
ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ ΤΗΣ ΑΜΕΡΙΚΗΣ [CO ₂ ΚΤ]	150.200	173.100	178.900
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ [CO ₂ ΚΤ]	116.500	148.100	151.800
ΚΙΝΑ [CO ₂ ΚΤ]	62.100	87.000	102.900
ΡΩΣΙΑ [CO ₂ ΚΤ]	13.120	16.750	18.630
ΙΝΔΙΑ [CO ₂ ΚΤ]	12.870	20.560	21.180
ΙΑΠΩΝΙΑ [CO ₂ ΚΤ]	22.340	25.000	25.920

Διαπιστώνεται ότι οι εκπομπές των αερομεταφορών αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό των συνολικών εκπομπών (μικρότερο του 4%). Ειδικά για την Κίνα αποτελεί μόλις το 0,9% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Παρατηρείται επίσης ότι ο τουρισμός παίζει ρόλο στην αύξηση των εκπομπών, με την Ευρωπαϊκή Ένωση να έχει περισσότερες εκπομπές λόγω των διεθνών πτήσεων, σε σχέση με τις εγχώριες.

13.3 Περιορισμός των ανθρακικών εκπομπών των αεροσκαφών

Το μικρό ποσοστό ενδέχεται να γίνει πολύ μεγαλύτερο τα επόμενα χρόνια εφόσον δε ληφθούν εγκαίρως μέτρα. Η Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών (International Air Transport Association) έθεσε τους παρακάτω κανονισμούς το 2017, τους οποίους οι κατασκευαστές και οι εταιρείες αεροπορίας οφείλουν να τηρήσουν :

- Μέση βελτίωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (specific fuel consumption) κατά 1,5% ετησίως την περίοδο 2009 έως 2020 (δηλαδή του βαθμού αποδοτικότητας του καυσίμου, άρα της ποιότητας της καύσης και του απαιτούμενου καυσίμου ανά έγχυση).
- Επιδίωξη σταθεροποίησης των εκπομπών έως το 2020 (να μην ξεπερνούν συνολικά το όριο των 1000 κΤ CO₂), με βελτιστοποίηση των διαδικασιών των αεροδρομίων, των λειτουργιών των αεροσκαφών (προσγείωση-απογείωση) και τη χρήση βιοκαυσίμων και εναλλακτικών καυσίμων.
- Μείωση των εκπομπών κατά 50% έως το 2050, σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 [162].

Την ίδια περίοδο, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization) δημιούργησε το πρώτο πρότυπο σχεδιασμού αεροσκαφών και συστημάτων καύσης με στόχο τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Το πρότυπο CO₂ για τα αεροσκάφη (CO₂ Standard for Aircraft) βρίσκει εφαρμογή από το 2020 (αγνοώντας βέβαια την πανδημία που έπληξε κάθε επαγγελματικό κλάδο), αφορά όλα τα

αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας (υπερηχητικά, υποχηχητικά και ελικοφόρα) και υποχρεώνει τα επερχόμενα και υπό κατασκευή αεροσκάφη να έχουν τηρήσει τα μέτρα μέχρι το 2028. Εξαιρέση αποτελούν τα μικρά αεροσκάφη (μάζας μικρότερης των 5,7 τόνων) λόγω των χαμηλών εκπομπών τους (σε αντιστοιχία με τις μοτοσυκλέτες στα επίγεια οχήματα) [163].

Αναλυτικότερα, το πρότυπο CO₂ για τα αεροσκάφη εφαρμόζεται με βάση τρία κριτήρια: τη τρίπτυχη επίδοση καύσης πορείας (cruise point fuel burn performance), το βάρος και το μέγεθος του αεροσκάφους (aircraft weight and size).

Η επίδοση καύσης είναι τρίπτυχη, διότι αξιοποιεί τρία σημεία ανάλογα με το μέγιστο δυνατό βάρος που μπορεί να ανυψώσει ο στροβιλοκινητήρας και έτσι τα δεδομένα προσαρμόζονται ανάλογα τον κινητήρα ή την αποστολή.

Το βάρος του αεροσκάφους προφανώς σχετίζεται με το ικανό βάρος ανύψωσης του κινητήρα και εξαρτάται από τους επιβάτες και τις αποσκευές.

Το μέγεθος του αεροσκάφους βελτιώνει τους υπολογισμούς, καθώς έτσι εκτιμάται η δυνατότητα προσαρμογής ενός στροβιλοκινητήρα σε άλλα σκάφη, ή η διαφορά στην αναλογία μεγέθους αεροσκάφους-στροβιλοκινητήρα [165]. Ως παράδειγμα παρουσιάζεται το αεροσκάφος Boeing 777-X, το οποίο κινούν δύο σύγχρονοι στροβιλοκινητήρες διπλού ρεύματος (General Electric 9X) στην [Εικόνα 13-11](#). Οι σύγχρονοι στροβιλοκινητήρες τείνουν να γίνουν μικρότεροι σε μέγεθος, ενώ τα αεροσκάφη μεγαλώνουν σε μήκος και πλάτος.



Εικόνα 13-11 : Boeing 777-X με στροβιλοκινητήρες διπλού ρεύματος (Πηγή : Boeing¹⁰⁹)

Όπως παρατηρείται δίνεται προσοχή στις εκπομπές κατά τη διάρκεια της πτήσης. Το γεγονός αυτό δεν είναι τυχαίο, αφού ο στροβιλοκινητήρας λειτουργεί για τη μεγαλύτερη διάρκεια σε αυτή την κατάσταση. Η μελέτη των Schmidt, Plötner, Pornet, Isikveren και Hornung για την αεροπορική εταιρεία Bauhaus Luftfahrt [79] αποκαλύπτει την κατανομή του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται ανά στάδιο της αποστολής και παρουσιάζεται στον Πίνακα 13-6 ([Πίνακας 13-6](#)). Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα αναφέρονται σε ένα μεσαίου μεγέθους αεροσκάφος αναφοράς, με μία αποστολή 500 μιλίων (περίπου 926 χιλιόμετρων).

¹⁰⁹ <https://www.boeing.com/commercial/777x/> (Τελευταία πρόσβαση: 15/12/2021)



Πίνακας 13-6 : Ποσοστό παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα σε μία αποστολή ενός αεροσκάφους

ΣΤΑΔΙΟ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ CO ₂ [%]
ΕΠΙΓΕΙΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗ (ΕΚΚΙΝΗΣΗ)	6
ΑΠΟΓΕΙΩΣΗ	6
ΑΝΟΔΟΣ	31
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΠΤΗΣΗ	47
ΚΑΘΟΔΟΣ	6
ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗ	2
ΕΠΙΓΕΙΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗ (ΤΕΛΟΣ)	2

Πηγή : CONTRIBUTIONS OF CABIN RELATED AND GROUND OPERATION TECHNOLOGIES TOWARDS FLIGHTPATH 2050 [79]

Στην αεροπορία εφαρμόζεται το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (E.T.S.) και προτιμάται σε σχέση με τη Φορολόγηση του Άνθρακα, η οποία απλά «σκεπάζει» το ανθρακικό πρόβλημα με πληρωμές. Υπάρχει επίσης ο φόβος ότι η φορολόγηση θα αποθαρρύνει τους κατασκευαστές από το να επενδύσουν στις ήδη ακριβές καθαρότερες τεχνολογίες (όπως είναι τα βιοκαύσιμα). Η Αντιστάθμιση Άνθρακα και το Σχέδιο Μείωσης για τη διεθνή αεροπορία (CORSIA : Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), όπως ονομάζεται, έχει σκοπό να εφαρμοστεί από την Ευρωπαϊκή και την Αμερικάνικη αεροπορία αρχικά σε πιλοτικό στάδιο. Για τη περίοδο 2021 έως 2026 τα μέτρα εφαρμόζονται στα μέλη της Διεθνούς Ένωσης Αερομεταφορών που επιθυμούν εθελοντικά να συμμετάσχουν στο πρόγραμμα. Από το 2027 και έπειτα, το μέτρο θα ισχύει καθολικά για όλα τα μέλη [166].

Η διαδικασία του προγράμματος CORSIA έχει ως εξής: οι τόνοι άνθρακα που εξοικονομούνται μέσω αειφόρων τεχνολογιών (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τεχνολογία απαγωγής άνθρακα) θα λαμβάνουν μία τιμή αντιστάθμισης. Την ίδια στιγμή, οι αεροπορικές εταιρείες θα ενημερώνουν τις αρμόδιες υπηρεσίες για τα ποσά διοξειδίου του άνθρακα που παρήγαγαν τα αεροσκάφη τους και θα εξαργυρώνουν τα ποσά αυτά με κάποια τιμή αντιστάθμισης. Οπότε και έτσι θα επιτευχθεί, αν το πρόγραμμα αποδειχθεί υλοποιήσιμο, ουδετερότητα και ανθρακικό ισοζύγιο [167].

Επιπρόσθετα, επιχειρείται η ευαισθητοποίηση του κόσμου που κινείται με αεροσκάφη σχετικά με τον συνεπή προγραμματισμό των ταξιδιών του, ώστε κάθε δρομολόγιο να μεταφέρει όσο το δυνατόν περισσότερο κόσμο και έτσι να απαιτούνται λιγότερες πτήσεις. Σημαντικό μέγεθος στις μελέτες ανθρακικών εκπομπών της αεροπορίας είναι τα Χιλιόμετρα Εισοδηματικών Επιβατών (RPK: Revenue Passenger Kilometres) και τα Χιλιόμετρα Εισοδηματικών Τόνων (RTK: Revenue Tonnes Kilometres). Πρόκειται για



γινόμενα που εκφράζουν το πόσο συμφέρουσα είναι μια πτήση από άποψη κόστους προετοιμασίας (καυσίμων, συντήρηση αεροσκάφους) και εκπομπών ρύπων.

$$RPK = P \cdot X \quad [km] \quad (12.3)$$

$$RTK = T \cdot X \quad [tkm] \quad (12.4)$$

Πίνακας 13-7 : Παραγωγή CO₂ σε συνάρτηση με τον αριθμό των επιβατών (2019)

ΟΧΗΜΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ)	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ CO ₂ (gCO ₂ /RPK)
ΜΟΤΟΣΥΚΛΕΤΑ	1,2	72
ΤΡΑΜ	156	14
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ	4	55
ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	88	285

Πηγή : Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος¹¹⁰

¹¹⁰ <https://www.eea.europa.eu/media/infographics/co2-emissions-from-passenger-transport/view> (Τελευταία πρόσβαση : 28/4/2022)



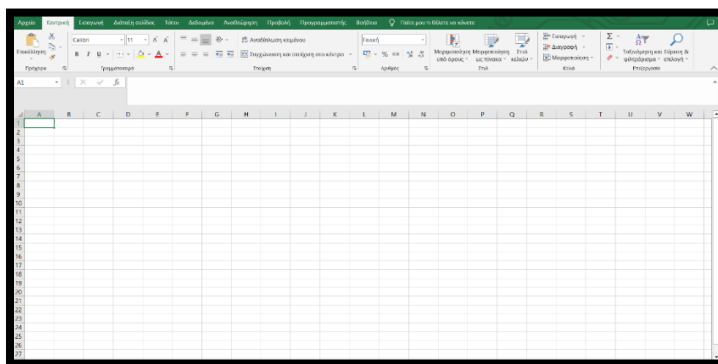
14. Παράρτημα III : Παρουσίαση υπολογιστικού εργαλείου

Στα προηγούμενα κεφάλαια, ορίστηκαν οι κανόνες και οι παραδοχές που ακολουθούνται στην εργασία για τον υπολογισμό του ανθρακικού αποτυπώματος ενός στροβιλοκινητήρα CFM56. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα υπολογιστικό εργαλείο ώστε να είναι εφικτός ο ταχύτερος υπολογισμός των ανθρακικών εκπομπών και για να γενικευθεί για περισσότερους στροβιλοαντιδραστήρες, ή και ακόμη για αεριοστρόβιλους μηχανικής ισχύος.

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται μία παρουσίαση του υπολογιστικού εργαλείου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, και των δυνατοτήτων του.

14.1 Microsoft Excel και Visual Basic for Applications (V.B.A.)

Το Microsoft Excel είναι εφαρμογή του πακέτου Microsoft Office, με κύριο στόχο την ανάλυση, παρουσίαση και επεξεργασία δεδομένων, ειδικά όταν όγκος τους είναι μεγάλος. Η επιφάνεια εργασίας του Excel αποτελείται από φύλλα εργασίας (spreadsheets) με κελιά (cells) τα οποία μπορούν να περιέχουν τα δεδομένα, να εκτελούν απλές μαθηματικές πράξεις ή ακόμη και εξεζητημένες εντολές.

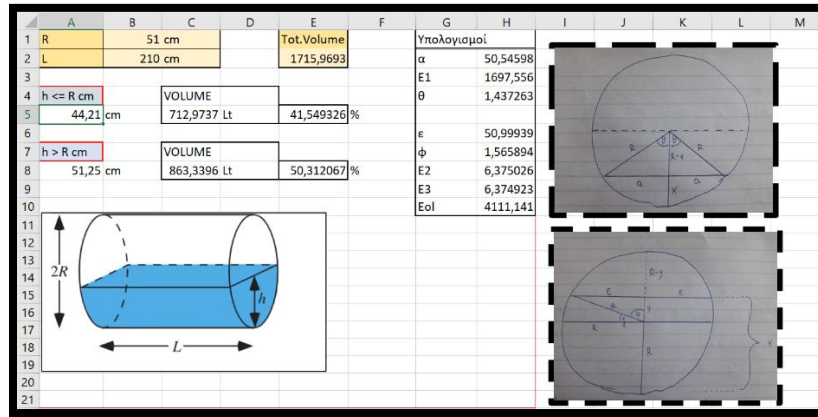


Εικόνα 14-1 : Περιβάλλον εργασίας του Microsoft Excel

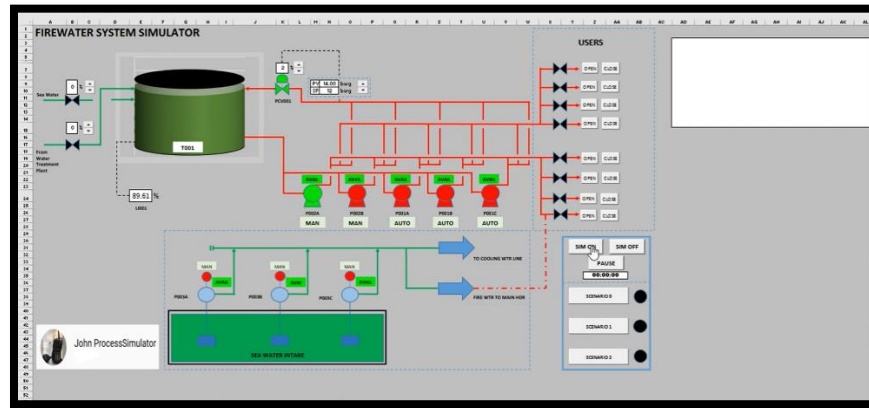
Παραδείγματα αρχείων Excel μπορεί να είναι μία απλή λίστα δεδομένων, ένας υπολογιστής του όγκου μίας δεξαμενής ή ακόμη και η μελέτη ενός δυναμικού



συστήματος. Ενδεικτικά παρουσιάζονται δύο διαφορετικά αρχεία Excel. Το Excel έχει επίσης τη δυνατότητα συνεργασίας με άλλα εργαλεία ανάλυσης, όπως το PROOSIS.



Εικόνα 14-2 : Αρχείο Excel γρήγορου υπολογισμού όγκου υγρού δεξαμενής

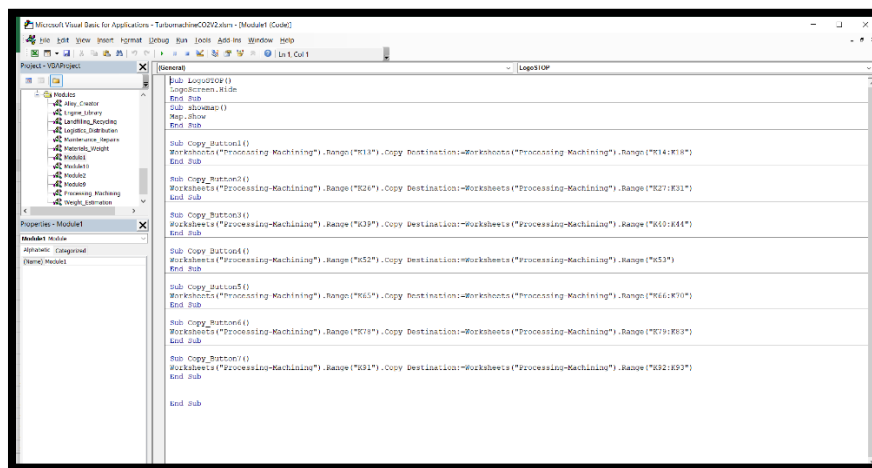


Εικόνα 14-3 : Αρχείο Excel μελέτης δυναμικότητας συστήματος πυρόσβεσης (Πηγή: Process Control Simulator Using MS Excel VBA¹¹¹)

Για τη δημιουργία πολύπλοκων εφαρμογών και την ευκολότερη διαχείριση των πόρων, είναι δυνατός ο προγραμματισμός με τη χρήση της γλώσσας Visual Basic for Applications (V.B.A.). Η V.B.A. στηρίζεται στη συγγραφή μακροεντολών (macros), υπό τη μορφή υποπρογραμμάτων (subroutines) Visual Basic και εκτέλεση τους από το χρήστη ή και αυτόματα, όταν πληρείται κάποια προδιαγραφή. Η V.B.A. δεν περιορίζεται μόνο στο Excel και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις υπόλοιπες εφαρμογές του Office, αλλά και σε άλλες, όπως για παράδειγμα το Solidworks .

¹¹¹ https://www.youtube.com/watch?v=OoITdAdIGAY&ab_channel=JMTheTarentado (Τελευταία πρόσβαση : 13/2/2023)

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το περιβάλλον συγγραφής του κώδικα Visual Basic, στο οποίο εισέρχεται ο χρήστης για να προγραμματίσει τις μακροεντολές.



Εικόνα 14-4 : Παράδειγμα συγγραφής κώδικα Visual Basic στο Excel

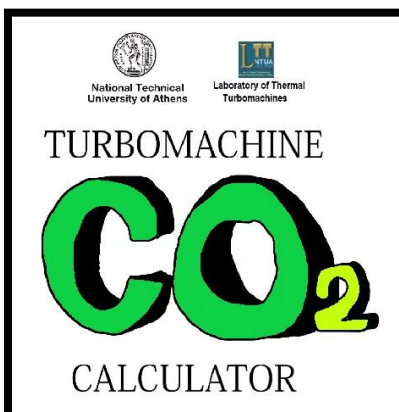
14.2 Παρουσίαση υπολογιστικού εργαλείου

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια, μπορεί να γίνει μία προσέγγιση των ανθρακικών εκπομπών που παράγονται κατά της διάρκεια του κύκλου ζωής ενός στροβιλοκινητήρα. Αν και οι σχέσεις είναι απλές στη χρήση τους, απαιτώντας μονάχα αθροίσματα γινομένων, οι μεταβλητές είναι δεκάδες και ο υπολογισμός «με το χέρι» επίπονος. Επίσης, ο υπολογισμός του ανθρακικού αποτυπώματος δεν έχει νόημα αν δεν μπορεί να γίνει σύγκριση διαφορετικών περιπτώσεων και σεναρίων. Ο ακριβής υπολογισμός των ανθρακικών εκπομπών, άλλωστε, είναι αδύνατος διότι η πλειονότητα των μεταβλητών βασίζεται σε υποθέσεις του συγγραφέα και σε άλλες μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής (L.C.A.).

Άρα οι στόχοι του υπολογιστικού εργαλείου είναι:

- Ο περιορισμός των απαιτούμενων μεταβλητών, άρα και πληροφοριών, που πρέπει να εισαγάγει ο χρήστης του εργαλείου.
- Το όσο το δυνατόν φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον (interface) για εύκολους και γρήγορους υπολογισμούς.
- Η δημιουργία μεγάλης συλλογής υλικών, κατεργασιών και καυσίμων, για την εφαρμογή σε διάφορες μελέτες περίπτωσης (case studies).
- Η δυνατότητα μελέτης διαφορετικών περιπτώσεων και ευκολία στη σύγκριση τους.

Παρακάτω φαίνεται το λογότυπο του υπολογιστικού εργαλείου που δημιουργήθηκε. Στα επόμενα εδάφια περιγράφεται η λειτουργία του και συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί.



Εικόνα 14-5 : Το λογότυπο του υπολογιστικού εργαλείου

Συνοπτικά, τα φύλλα εργασίας του υπολογιστικού εργαλείου είναι τα ακόλουθα:

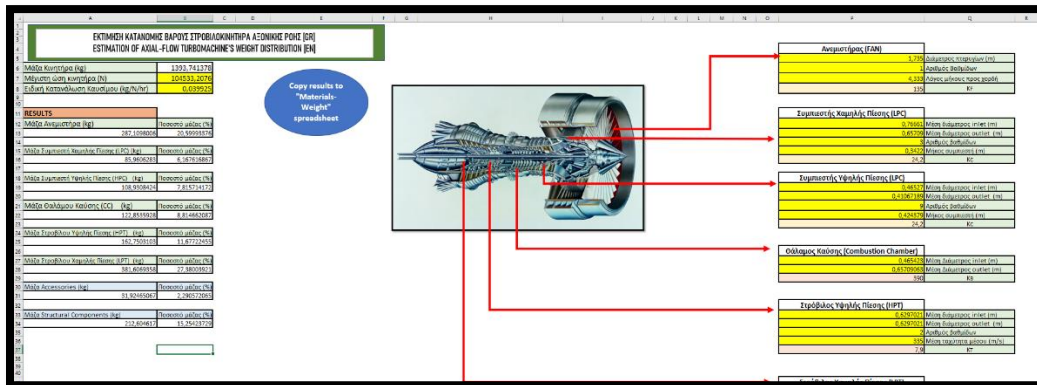
Πίνακας 14-1 : Περιγραφή φύλλων εργασίας υπολογιστικού εργαλείου

Φύλλο εργασίας	Σύντομη περιγραφή
Engine Weight Estimation	Αυτόνομο υπολογιστικό εργαλείο μίας κατανομής μάζας στροβιλοκινητήρα διπλού ρεύματος
Engine Library	Βιβλιοθήκη κατανομής μαζών στροβιλοκινητήρων
Alloy Creator	Υπολογιστής ανθρακικού αποτυπώματος εξόρυξης-δημιουργίας κραμάτων
Materials-Weight	Υπολογιστής ανθρακικού αποτυπώματος εξόρυξης-δημιουργίας υλικών στροβιλοκινητήρα/προϊόντος
Processing-Machining	Υπολογιστής ανθρακικού αποτυπώματος κατεργασίας υλικών στροβιλοκινητήρα/προϊόντος
Logistics-Distribution	Υπολογιστής ανθρακικού αποτυπώματος μεταφοράς υλικών στροβιλοκινητήρα/προϊόντος
Operation	Υπολογιστής ανθρακικού αποτυπώματος λειτουργίας και χειροτέρευσης στροβιλοκινητήρα
Maintenance	Υπολογιστής ανθρακικού αποτυπώματος παραγωγής καυσίμων και λαδιών στροβιλοκινητήρα, καθώς και της συντήρησης του
Recycling-Landfilling	Υπολογιστής ανθρακικού αποτυπώματος απόσυρσης στροβιλοκινητήρα
Calculations	Πρόχειρο φύλλο, βοήθημα για τους υπολογισμούς του προγράμματος
Calculations 1	Βοήθημα για τους υπολογισμούς των εκπομπών της λειτουργίας και της χειροτέρευσης
Appendix	Βάση δεδομένων. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τα κατάλληλα κελιά ώστε να τροποποιήσει όπως επιθυμεί τα τελικά αποτελέσματα



14.2.1 Εκτίμηση μάζας κινητήρα (Engine Weight Estimation)

Στο φύλλο εργασίας (Worksheet) "Engine Weight Estimation" μπορεί να γίνει εφαρμογή της μεθόδου των Sagerser, Lieblein και Krebs, όπως αναλύεται στο εδάφιο 3.2.2.



Εικόνα 14-6 : Φύλλο εργασίας "Engine Weight Estimation"

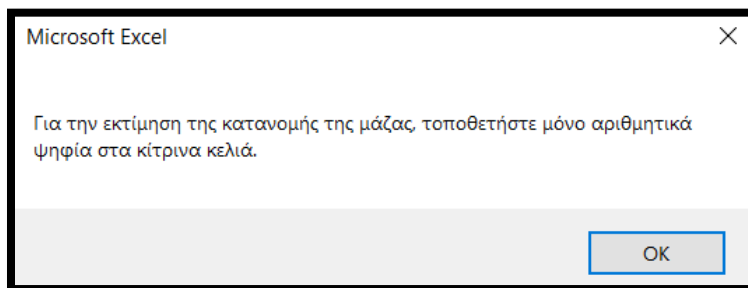
Αυτό το φύλλο εργασίας είναι απαραίτητο στην περίπτωση που δεν είναι γνωστή η κατανομή της μάζας στα διάφορα εξαρτήματα του στροβιλοκινητήρα. Προορίζεται για τον υπολογισμό των συνιστωσών ενός στροβιλοαντιδραστήρα διπλού ρεύματος.

Ο χρήστης συμπληρώνει τις μεταβλητές των κελιών που έχουν **κίτρινο** χρώμα και βρίσκονται στο δεξί τμήμα του φύλλου εργασίας. Υπάρχουν επίσης δύο άλλες μεταβλητές σχετικές με τη λειτουργία του κινητήρα στο αριστερό τμήμα. Οι σταθερές K_F , K_C , K_B , K_T μπορούν να μεταβληθούν αν είναι επιθυμητό, αλλά δεν είναι απαραίτητο.

Μάζα κινητήρα (kg)	1393,741378		
Μέγιστη ώση κινητήρα (N)	104533,2076		
Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (kg/N/hr)	0,039925		
Συμπιεστής Χαμηλής Πίεσης (LPC)			
	0,76661	Μέση διάμετρος inlet (m)	
	0,65709	Μέση διάμετρος outlet (m)	
	3	Αριθμός βαθμίδων	
	0,3422	Μήκος συμπιεστή (m)	
	24,2	K_C	

Εικόνα 14-7 : Κελιά που συμπληρώνονται από τον χρήστη

Στην περίπτωση που ένα κελί συμπληρωθεί με έναν χαρακτήρα που δεν αντιστοιχεί σε φυσικό αριθμό, εμφανίζεται το ακόλουθο προειδοποιητικό μήνυμα.



Εικόνα 14-8 : Μήνυμα σφάλματος στο "Engine Weight Estimation"

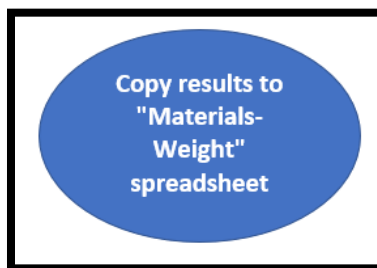
Αν μεταβληθούν οι τιμές σε οποιοδήποτε από τα κίτρινα κελιά, ο πίνακας αποτελεσμάτων στο αριστερό τμήμα ανανεώνεται αυτόματα. Παρουσιάζει τη μάζα κάθε τμήματος και το ποσοστό που αποτελεί το καθένα σε σχέση με την ολική καθαρή μάζα (dry weight) του κινητήρα. Επίσης γίνεται μία εκτίμηση της μάζας του στροβιλοκινητήρα, η οποία βέβαια δεν είναι πάντα ακριβής. Παρόλα αυτά, η κατανομή μπορεί να λειτουργήσει ως ένα κατευθυντήριο εργαλείο για το πώς θα στηθούν οι μεταβλητές στα υπόλοιπα φύλλα εργασίας.

Αν για παράδειγμα ο χρήστης θέλει να έχει μια εικόνα για την κατανομή της μάζας σε έναν αεριοστρόβιλο μηχανικής ισχύος, αρκεί να μηδενίσει τις αντίστοιχες σταθερές για τον ανεμιστήρα (K_F) και για βοηθητικά συστήματα (accessories).

Αν ο χρήστης βρίσκει την κατανομή ικανοποιητική, μπορεί να την αντιγράψει στο φύλλο εργασίας «Materials-Weight» για να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς, πατώντας το κουμπί της Εικόνας 57. Οι τιμές που υπολογίστηκαν συμπληρώνονται στα αντίστοιχα κελιά στο «Materials-Weight».

11	RESULTS	
12	Μάζα Ανεμιστήρα (kg)	Ποσοστό μάζας (%)
13	287,1098006	20,59993376
14		
15	Μάζα Συμπίεστη Χαμηλής Πίεσης (LPC) (kg)	Ποσοστό μάζας (%)
16	85,9606283	6,167616867
17		
18	Μάζα Συμπίεστη Υψηλής Πίεσης (HPC) (kg)	Ποσοστό μάζας (%)
19	108,9308424	7,815714172
20		
21	Μάζα Θαλάμου Καύσης (CC) (kg)	Ποσοστό μάζας (%)
22	122,8535928	8,814662087
23		
24	Μάζα Στροβίλου Υψηλής Πίεσης (HPT) (kg)	Ποσοστό μάζας (%)
25	162,7503103	11,67722455
26		
27	Μάζα Στροβίλου Χαμηλής Πίεσης (LPT) (kg)	Ποσοστό μάζας (%)
28	381,6069358	27,38003921
29		
30	Μάζα Accessories (kg)	Ποσοστό μάζας (%)
31	31,92465067	2,290572065
32		
33	Μάζα Structural Components (kg)	Ποσοστό μάζας (%)
34	212,604617	15,25423729
35		

Εικόνα 14-9 : Πίνακας αποτελεσμάτων εκτίμησης μάζας στροβιλοκινητήρα



Εικόνα 14-10 : Κουμπί αντιγραφής κατανομής μάζας

14.2.2 Βιβλιοθήκη στροβιλοκινητήρων (Engine Library)

Σε αυτό το φύλλο εργασίας περιλαμβάνονται, έτοιμες προς χρήση, κατανομές μάζας ορισμένων στροβιλοκινητήρων διπλού ρεύματος. Η πλειονότητα αυτών αποτελούν αποτελέσματα της υπολογιστικού εργαλείου WATE++ (3.2.1) από ερευνητές του M.I.T. για τη N.A.S.A. [62].

Ο χρήστης επιλέγει από τη λίστα στα αριστερά τον κινητήρα τον οποίο θέλει να μελετήσει. Αυτόματα στα κελιά συμπληρώνονται οι διαθέσιμες τιμές της ποσοστιαίας κατανομής μάζας του επιλεγμένου στροβιλοκινητήρα, η καθαρή μάζα του, τα αεροσκάφη στα οποία προσαρμόζεται και η περίοδος παραγωγής του. Αν το αποτέλεσμα τον ικανοποιεί, μπορεί να πατήσει το πράσινο κουμπί και να αντιγράψει την κατανομή της μάζας στη σελίδα «Materials-Weight», όπου θα του χρειαστεί.

Επιπλέον, μπορεί αν το επιθυμεί να πατήσει το μπλε κουμπί και να δει μία εικόνα (ή φωτογραφία) του στροβιλοκινητήρα που έχει επιλέξει.

The screenshot shows a spreadsheet titled 'ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ [GR] TURBOFAN LIBRARY [EN]'. It contains several tables for different engine components, each with a total weight and a breakdown of weight percentages for various parts.

25,749	ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (FAN)	Ποσοστό υλικού/άρματος (%) στο εδάφημα
Rotor Blades	30,889	
Stator Blades	26,214	
Disk	9,533	
Hardware	1,192	
Casings	32,172	

5,05	ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (L.P.C.)	Ποσοστό υλικού/άρματος (%) στο εδάφημα
Rotor Blades	11,21	
Stator Blades	14,95	
Disks	27,10	
Hardware	20,09	
Casings	26,64	

9,58	ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (H.P.C.)	Ποσοστό υλικού/άρματος (%) στο εδάφημα
Rotor Blades	8,87	
Stator Blades	11,82	
Disks	46,31	
Hardware	10,59	
Casings	22,41	

5,57	ΘΑΛΑΜΟΣ ΚΑΥΣΗΣ (COMBUSTION CHAMBER)	Ποσοστό υλικού/άρματος (%) στο εδάφημα
Casings		
Burners		

8,35	ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΠΙΣΤΗΣ (H.P.T.)	Ποσοστό υλικού/άρματος (%) στο εδάφημα
Rotor Blades	7,91	
Stator Blades	19,21	
Disks	29,66	
Hardware	29,66	
Casings	13,56	

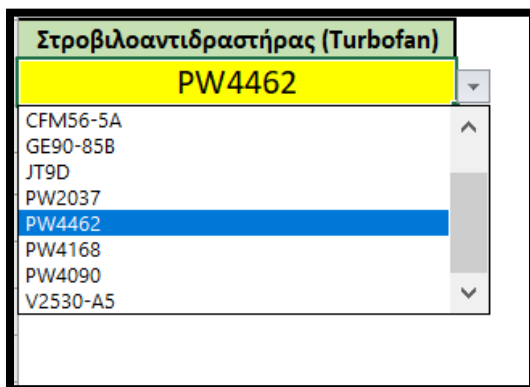
15,95	ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (L.P.T.)	Ποσοστό υλικού/άρματος (%) στο εδάφημα
Rotor Blades	11,39	
Stator Blades	11,69	
Disks	26,48	
Hardware	32,69	
Casings	17,75	

13,24	STRUCTURAL COMPONENTS	Ποσοστό υλικού/άρματος (%) στο εδάφημα
Shaft 1	4,28	
Shaft 2	26,38	
Other (Ducts, ect)	27,63	

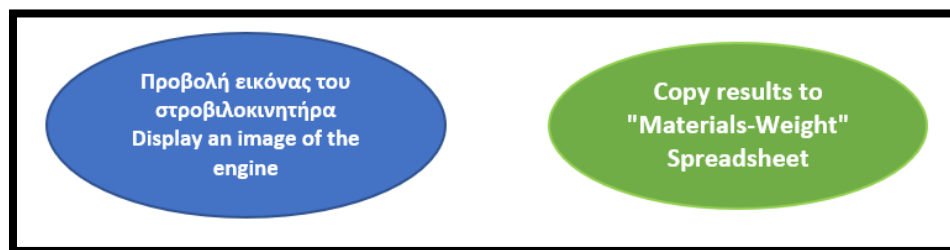
16,50	ACCESSORIES	Ποσοστό υλικού/άρματος (%) στο εδάφημα

Εικόνα 14-11 : Το φύλλο εργασίας "Engine Library"

Ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει αυτές τις αυτοματοποιημένες κατανομές, με κατάλληλες αλλαγές στο Παράρτημα του υπολογιστικού εργαλείου (Appendix, 14.2.10)




Εικόνα 14-12 : Επιλογή στροβιλοκινητήρα από λίστα



Εικόνα 14-13 : Τα κουμπιά προβολής εικόνας και αντιγραφής

14.2.3 Δημιουργός κραμάτων (Alloy Creator)

Το φύλλο εργασίας αυτό στηρίζεται στη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.1.1. Το υπολογιστικό εργαλείο περιέχει ήδη μία εκτενή λίστα με συνήθη υλικά στροβιλοαντιδραστήρων, με δυνατότητες επέκτασης. Στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να δημιουργήσει τα δικά του κράματα, ή να αλλάξει τη σύσταση κατά μάζα των υπάρχοντων κραμάτων, ή απλά να ελέγξει τους δείκτες εκπομπής τους, μπορεί να το κάνει. Αρκεί να συμπληρώσει τα κίτρινα κελιά με το ποσοστό που αντιστοιχεί στο στοιχείο που επιλέγει. Η επιλογή γίνεται μέσω λίστας που βρίσκεται στα αριστερά κάθε κίτρινου κελιού.

RESULTS						ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ [GR]		ALLOY CREATOR [EN]	
Mean	Lower Bound	Upper Bound	St. Deviation (kg)						
Emissions due to melting for Alloy 1 (kg)	23,9798	13,2722	14,662	0,708					
Emissions due to melting for Alloy 2 (kg)	11,3765	10,1555	12,592	1,221					
Emissions due to melting for Alloy 3 (kg)	11,8244	10,5411	13,107	1,281					
Emissions due to melting for Alloy 4 (kg)	11,8310	10,452	12,768	1,359					
Emissions due to melting for Alloy 5 (kg)	19,3388	16,931	18,288	0,968					
Emissions due to melting for Alloy 6 (kg)	14,694	13,683	15,639	0,981					

	1ο Στοιχείο		2ο Στοιχείο		3ο Στοιχείο		4ο Στοιχείο		5ο Στοιχείο		6ο Στοιχείο		7ο Στοιχείο		8ο Στοιχείο		9ο Στοιχείο		10ο Στοιχείο		Σύνολο ποσοτών (Percentage Sum) (%)
	Όνομα	Ποσοστό (%)	Όνομα	Ποσοστό (%)	Όνομα	Ποσοστό (%)	Όνομα	Ποσοστό (%)	Όνομα	Ποσοστό (%)	Όνομα	Ποσοστό (%)	Όνομα	Ποσοστό (%)	Όνομα	Ποσοστό (%)	Όνομα	Ποσοστό (%)			
Υλικό (Material) / Κράμα (Alloy) 1	Cr	18	Mn	58	Co	82	Al	4,4	Ti	1,7	Fe	Mn	Nb								100
Υλικό (Material) / Κράμα (Alloy) 2	Cr	13	Mn	2,5	Mo		Co	88,8	Al		Fe	1,3	Nb								105,5
Υλικό (Material) / Κράμα (Alloy) 3	Cr	12	Ni		Mo		Co	88	Al	2,1	Fe	1,2	Nb								106,3
Υλικό (Material) / Κράμα (Alloy) 4	Cr	15,5	Ni		Mo		Co	77,4	Al		Fe	0,8	Nb								100
Υλικό (Material) / Κράμα (Alloy) 5	Cr	12	Ni		Mo		Co	1,8	Al	0,7	Fe	1,8	Nb								100
Υλικό (Material) / Κράμα (Alloy) 6	Cr	10	Ni		Mo		Co	0,4	Al		Fe	2,1	Nb								100

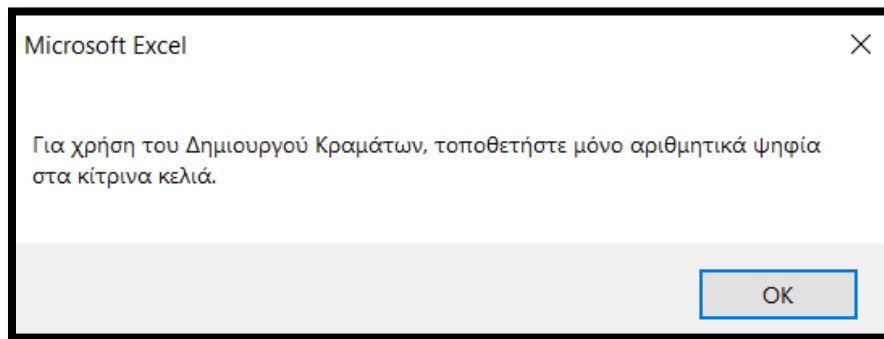
Εικόνα 14-14 : Το φύλλο εργασίας "Alloy Creator"

Τα αποτελέσματα μπορεί να τα λάβει από το πλαίσιο πάνω αριστερά. Το πλαίσιο των αποτελεσμάτων παρουσιάζει τη μέση τιμή των εκπομπών, καθώς και τη τυπική απόκλιση της. Μπορεί να γίνει ταυτόχρονη σύγκριση έξι μετάλλων/κραμάτων.



RESULTS	Mean	Lower Bound	Upper Bound	St.Deviation (kg)
Emissions due to mining for Alloy 1 (kg)	13,9764	13,272	14,681	0,704
Emissions due to mining for Alloy 2 (kg)	11,3761	10,155	12,597	1,221
Emissions due to mining for Alloy 3 (kg)	11,8241	10,541	13,107	1,283
Emissions due to mining for Alloy 4 (kg)	11,6102	10,452	12,768	1,158
Emissions due to mining for Alloy 5 (kg)	17,3208	16,353	18,289	0,968
Emissions due to mining for Alloy 6 (kg)	14,651	13,663	15,639	0,988

Εικόνα 14-15 : Πλαίσιο αποτελεσμάτων του δημιουργού κραμάτων



Εικόνα 14-16 : Μήνυμα σφάλματος του δημιουργού κραμάτων

Αν ο χρήστης συμπληρώσει τα κίτρινα κελιά με μια τιμή διαφορετική από έναν φυσικό αριθμό, τότε εμφανίζεται μήνυμα σφάλματος.

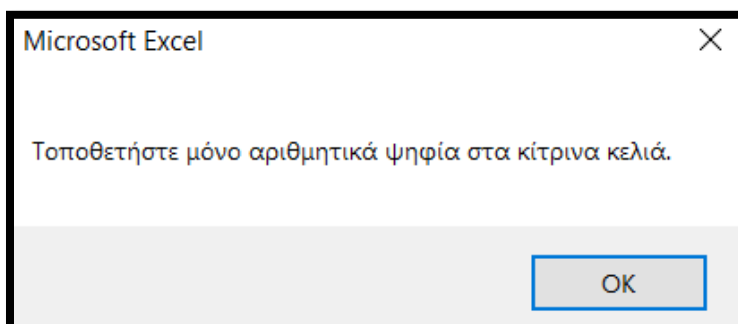
14.2.4 Κατανομή υλικών και μάζας (Materials-Weight)

RESULTS		Total emissions of material production (kg)	13825,26255	Καθαρή Μάζα (Net Weight) (kg)	2197		
Total CO2eq (kg)		7387,491124	ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (FAN)		36,710	Μάζα υλικών/μέρους (kg)	857,9127
Percentage Sum (%)							
2836,63325	Rotor Blades	30,829	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,11339319	
261,460567	GVPS	14,000	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,051394	
221,54568	GVPS	12,214	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,04483794	
875,451348	Disks	9,533	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,03499344	
35,7011698	Hardware	1,120	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,00437583	
646,7963829	Casings	32,172	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,11810141	
0						0	
0						0	
Total CO2eq (kg)		680,483491	ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΧΑΛΚΙΝΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (L.P.C.)		3,09	Μάζα υλικών/μέρους (kg)	118,0183
Percentage Sum (%)							
141,0364534	Rotor Blades	11,21	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,02446191	
24,8909079	Stator Blades	9	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,020494	
15,07276681	GVPS	5,45	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,00778225	
342,3895933	Disks	27,10	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,013686916	
82,78793724	Hardware	20,09	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,010147124	
72,6645906	Casings	26,04	Τέλος υλικού / μέρους (%)	79	Ποσοστό υλικού στην συλλογή	0,013480935	
0						0	
0						0	

Εικόνα 14-17 : Φύλλο εργασίας "Materials-Weight"

Στο φύλλο εργασίας "Materials-Weight" πραγματοποιείται το πρώτο στάδιο υπολογισμού των ανθρακικών εκπομπών. Τα κίτρινα κελιά συμπληρώνονται από τον χρήστη με φυσικούς αριθμούς που αντιστοιχούν σε ποσοστά. Εξαιρεση αποτελεί το κίτρινο κελί που δέχεται την καθαρή (ολική) μάζα του στροβιλοκινητήρα. Αν ο χρήστης συμπληρώσει ένα

κίτρινο κελί με έναν χαρακτήρα που δεν είναι φυσικός αριθμός, εμφανίζεται το παράθυρο σφάλματος της επόμενης εικόνας.



Εικόνα 14-18 : Μήνυμα σφάλματος

Ο στροβιλοκινητήρας χωρίζεται στα βασικά του τμήματα (ανεμιστήρας, συμπιεστής, στρόβιλος, θάλαμος καύσης, παρελκόμενα, δομικά στοιχεία). Κάθε στοιχείο καταλαμβάνει ένα μέρος της μάζας του κινητήρα (που εκφράζεται με ποσοστό) και κάθε τμήμα του στοιχείου καταλαμβάνει ένα μέρος της μάζας του στοιχείου (που εκφράζεται με ποσοστό). Έτσι είναι εύκολο να κατανεμηθούν με όσο το δυνατόν πιο απλό και ακριβή τρόπο τα ποσά των κραμάτων και υλικών που απαιτεί ο στροβιλοκινητήρας.


ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ (FAN)		Βάρος σε σχέση με τον κινητήρα (%)	36,710	Βάρος εξαρτήματος (kg)	857,9127		
	Ποσοστό υλικού/κράματος (%) στο εξάρτημα	Υλικό (Material) / Κράμα (Alloy)	Ποσοστό Παρθένου Υλικού (%)	Είδος υλικού / κράματος	Ποσοστό Ανακυκλωμένου Υλικού (%)	Ποσοστό υλικού στον κινητήρα	Ποσοστό επαναχρησιμοποίησης (%)
Rotor Blades	30,889	Ti-6Al-4V	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,113393519	
IGVS	14,000	A286	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,0513394	
OGVS	12,214	kenlar 149	25	Ενώνητο Υλικό	75	0,044837594	
Disk	9,533	Ti-6Al-4V	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,034995643	
Hardware	1,192	rene-41	25	Ni ή Co κράματα	75	0,004375832	
Casings	32,172	A286	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,118103412	
						0	
						0	
						0	
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (L.P.C.)		Βάρος σε σχέση με τον κινητήρα (%)	5,05	Βάρος εξαρτήματος (kg)	118,0185		
	Ποσοστό υλικού/κράματος (%) στο εξάρτημα	Υλικό (Material) / Κράμα (Alloy)	Ποσοστό Παρθένου Υλικού (%)	Είδος υλικού / κράματος	Ποσοστό Ανακυκλωμένου Υλικού (%)	Ποσοστό υλικού στον κινητήρα	Ποσοστό επαναχρησιμοποίησης (%)
Rotor Blades	11,21	Ti-6Al-4V	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,005663551	
Stator Blades	9	A286	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,004545	
IGVS	5,45	A286	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,00275225	
Disks	27,10	Ti-6Al-4V	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,013686916	
Hardware	20,09	rene-41	25	Ni ή Co κράματα	75	0,010147196	
Casings	26,64	A286	25	Fe ή Ti κράματα	75	0,013450935	
						0	

Εικόνα 14-19 : Εισαγωγή ποσοστού μάζας και επιλογή υλικών

Για κάθε κομμάτι του στοιχείου μπορεί να γίνει επιλογή του κράματος ή σύνθετου υλικού, από μία λίστα η οποία μπορεί να ανανεώνεται από τον χρήστη. Στη συνέχεια, σύμφωνα με τις σχέσεις που παρουσιάζονται στο εδάφιο 4.1.1, μπορεί να γίνει η επιλογή για το αν χρησιμοποιείται παρθένο υλικό (και πόσο), ανακυκλωμένο υλικό (και πόσο), καθώς και αν κάποιο τμήμα (ή και ολόκληρο το στοιχείο) μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

Για διευκόλυνση του χρήστη, η επιλογή ενός υλικού από τη λίστα εμφανίζει δεξιά μία σύντομη περιγραφή του. Επίσης, εμφανίζεται αυτόματα το ποσοστό μάζας που καταλαμβάνει κάθε τμήμα (για παράδειγμα οι ρότορες του συμπιεστή) στο σύνολο του κινητήρα.



RESULTS		Mean total emissions of material production (kg)	12.743,10
		Lower Bound of material production emissions (kg)	11.725,35
		Upper Bound of material production emission (kg)	14.014,12
Total CO2eq (kg)	7567,73968		
CO2 kg		Percentage Sum (%)	99,99951787
2836,641751		Rotor Blades	
263,5074037		IGVS	
2909,696788		OGVS	
875,4027956		Disk	
35,68814606		Hardware	
646,8027956		Casings	
0			
0			
0			

Εικόνα 14-20 : Εκπομπές λόγω εξόρυξης / δημιουργίας υλικών

Αριστερά από κάθε τμήμα (ή και στοιχείο του τμήματος) παρουσιάζεται το ποσό του άνθρακα λόγω εξόρυξης (ή δημιουργίας σύνθετων) υλικών που του αναλογεί. Πάνω αριστερά εμφανίζονται τα αποτελέσματα συνολικά. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν και τη τυπική απόκλιση που μπορεί να εκτιμηθεί από τη δημιουργία των υλικών ή κραμάτων.

Φυσικά οι κατηγορίες που είναι ήδη συμπληρωμένες στο φύλλο εργασίας δεν είναι δεσμευτικές. Για περιπτώσεις όπου για το ίδιο υλικό χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών υλικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες γραμμές και να χωριστούν τα ποσοστά σύμφωνα με υπάρχοντα δεδομένα του κατασκευαστή ή την εκτίμηση του χρήστη.

Επίσης, όπως φάνηκε και κατά τη διάρκεια της πιστοποίησης της εργασίας (6.4), το υπολογιστικό εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με κατάλληλη τροποποίηση των κελιών, για τον υπολογισμό των ανθρακικών εκπομπών οποιουδήποτε προϊόντος ή μηχανικού συστήματος.

14.2.5 Κατεργασίες – Συναρμολόγηση (Processing-Machining)

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ [GR] PROCESSING, MACHINING AND ASSEMBLING OF ENGINE [EN]											
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑ	Περιγραφή των Υλικών	Κωδικός	Ποσότητα	Μονάδα	Αποτέλεσμα	Αποτέλεσμα	Αποτέλεσμα	Αποτέλεσμα	Αποτέλεσμα	Αποτέλεσμα	Αποτέλεσμα
	Επιχειρησιακή	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Εικόνα 14-21 : Φύλλο εργασίας "Processing-Machining"

Στο φύλλο εργασίας “Processing-Machining” πραγματοποιείται ο υπολογισμός των εκπομπών που οφείλονται στις κατεργασίες των τμημάτων του στροβιλοκινητήρα και στη συναρμολόγησή του. Το φύλλο εργασίας χωρίζεται σε αυτά τα δύο τμήματα. Αναλυτικά :

Ανεμοστρέβας (FAN)							Country
	Είδος κατεργασίας 1	Συμμετοχή κατεργασίας 1 (%)	Είδος κατεργασίας 2	Συμμετοχή κατεργασίας 2 (%)	Είδος κατεργασίας 3	Συμμετοχή κατεργασίας 3 (%)	Χώρα κατασκευαστή
Rotor Blades	Σφυσήλαση	70	Machining	30	Φρεζάρισμα (CNC)	30	Γαλλία
IGVS	Χύτευση BOF -BF	60	Machining	30	Gas Tungsten Arc Welding	30	Γαλλία
OGVS	Injection Molding (Υδραυλική)	60	Machining	30	Gas Tungsten Arc Welding	30	Γαλλία
Disk	Σφυσήλαση	70	Machining	30	Φρεζάρισμα (CNC)	30	Γαλλία
Hardware	Χύτευση BOF -BF	60	Machining	30	Φρεζάρισμα (CNC)	30	Γαλλία
Casings	Χύτευση BOF -BF	60	Machining	30	Gas Tungsten Arc Welding	30	Γαλλία
							Γαλλία
							Γαλλία

Εικόνα 14-22 : Κατεργασία τμημάτων στροβιλοκινητήρα


Στην αριστερή πλευρά, γίνεται ο χωρισμός του στροβιλοαντιδραστήρα στα βασικά του τμήματα. Κάθε τμήμα επίσης διαιρείται στα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από λίστες τις τρεις βασικές κατεργασίες που πραγματοποιούνται στο εξάρτημα, με τη μορφή ποσοστού. Τα ποσοστά, που συμπληρώνονται στα **κίτρινα** κελιά, εκφράζουν την επίδραση της κάθε κατεργασίας στη τελική διαμόρφωση της επιλεγμένης μάζας. Για παράδειγμα, ένα εξάρτημα που είναι απολύτως χυτό, θα λάβει ένα ποσοστό «100» % στο αντίστοιχο κελί.

Ενέργεια	Ποσοστό	Βαθμός απόδοσης
Ηλεκτρική (Δίκτυο)	90	-
M.E.K.	10	35
Αεριοστρόβιλος		
M.E.K.		

Εικόνα 14-23 : Κατανάλωση ενέργειας

Δεξιά από τις τρεις βασικές κατεργασίες, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη χώρα κατασκευής του εξαρτήματος. Στις επιλογές περιλαμβάνονται χώρες από όλες τις ηπείρους, συμπεριλαμβανομένων της Αυστραλίας και των Πολιτειών της Αμερικής.

Ταυτόχρονα μπορεί να διαμορφώσει το ενεργειακό μίγμα, επιλέγοντας το ποσοστό της ενέργειας που παρέχεται από μηχανές εσωτερικής καύσης (εμβολοφόρες ή αεριοστρόβιλους) και από τις ενεργειακές πηγές της χώρας.

Συναρμολόγηση / Γραμμή Παραγωγής		Χώρα συναρμολόγησης	
		Γαλλία	
		Καταναλισκόμενη ενέργεια (kJ / kg)	(MJ/kg)
		22000	22
		Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια (kJ/engine)	(MJ/engine)
		51414000	51414
Ενέργεια	Ποσοστό	Βαθμός Απόδοσης	
Ηλεκτρική (Δίκτυο)		90	-
Μ.Ε.Κ.		10	40

Εικόνα 14-24 : Πλαίσιο συναρμολόγησης στροβιλοκινητήρα

Στη δεξιά πλευρά, γίνονται οι υπολογισμοί για τις ενεργειακές απαιτήσεις της συναρμολόγησης του στροβιλοκινητήρα. Όμοια με πριν, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη χώρα συναρμολόγησης από λίστα και τα ποσοστά αξιοποίησης της ενέργειας. Επιπλέον μπορεί, εφόσον το επιθυμεί, να αλλάξει την απαιτούμενη ενέργεια ανά συναρμολόγηση χιλιόγραμμου του στροβιλοκινητήρα.

Εργασία 3 (%)	Χώρα κατασκευής	Energy for Assembling [MJ]	CO2eq for Assembling [kg]
10	Γαλλία	5830,031859	132,0782209
10	Γαλλία	2473,825587	56,04403035
10	Γαλλία	2473,825587	56,04403035
10	Γαλλία	1799,178971	40,76004445
20	Γαλλία	224,8973714	5,095005556
10	Γαλλία	6072,229028	137,56515
	Γαλλία	0	0
	Γαλλία	0	0
	Γαλλία	0	0
Εργασία 3 (%)	Χώρα κατασκευής	Energy for Assembling [MJ]	CO2eq for Assembling [kg]
10	Γαλλία	291,1858318	6,59675754
	Γαλλία	310,2706365	7,029120024
	Γαλλία	77,89221	1,764632642
10	Γαλλία	703,6990935	15,94216406
20	Γαλλία	521,7079486	11,81919059
10	Γαλλία	691,5663505	15,66729916
	Γαλλία	0	0
	Γαλλία	0	0
	Γαλλία	0	0


Εικόνα 14-25 : Στοιχεία συναρμολόγησης

Συμπλήρωση των προαναφερόμενων κελιών δίνει αυτόματα αποτελέσματα δύο μορφών ενέργειας και ανθρακικών εκπομπών. Δεξιά από κάθε γραμμή, υπολογίζεται η ενεργειακή κατανάλωση και οι αντίστοιχες ανθρακικές εκπομπές που οφείλονται σε ένα εξάρτημα



του στροβιλοαντιδραστήρα, κατά τη φάση της συναρμολόγησης. Γίνεται η υπόθεση ότι κάθε εξάρτημα συνεισφέρει σε ποσοστό ανάλογο της μάζας του.

Στην αριστερή πλευρά, γίνονται οι ίδιοι υπολογισμοί, αλλά αυτή τη φορά αφορούν τη φάση των κατεργασιών.

RESULTS		Total Emissions of Parts Processing (kg)	5.202,70	Total Energy of Processing (MJ)	97.682,31	
		Total Emissions of Assembling (kg)	1.164,77	Total Energy of Assembling (MJ)	51.414,00	
		Total Emissions (kg)	6.367,47	Total Energy (MJ)	149.096,31	
		CO2eq (kg)		Ανεμοστράας (FAN)		
Energy (MJ)	CO2eq (kg)	1697,529002		Είδος κατεργασίας 1	Συμμετοχή κατεργασίας 1 (%)	
12086,86445	455,5616445			Rotor Blades	Σφυρηλάτηση	70
3675,007343	138,5133751			IGVS	Χύτευση BOF -BF	60
16137,42099	608,2297089			OGVS	Injection Molding (Υδραυλική)	60
3730,070928	140,5887568			Disk	Σφυρηλάτηση	70
388,4754522	14,64188803			Hardware	Χύτευση BOF -BF	40
9020,638474	339,9936282			Casings	Χύτευση BOF -BF	60
0	0					
0	0					
0	0					

Εικόνα 14-26 : Συνολικά στοιχεία κατεργασιών-συναρμολόγησης

Στο επάνω μέρος του φύλλου εργασίας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις συνολικές ανθρακικές εκπομπές (κατεργασιών και συναρμολόγησης) και την απαιτούμενη ενέργεια (κατεργασιών και συναρμολόγησης).

Αν ο χρήστης δεν τοποθετήσει αριθμητικές μεταβλητές στα **κίτρινα** κελιά, εμφανίζεται προειδοποιητικό μήνυμα σφάλματος. Τέλος, σημειώνεται ότι το φύλλο εργασίας έχει δυνατότητες επέκτασης με κατάλληλη επεξεργασία του φύλλου «Appendix».

14.2.6 Μεταφορές και διανομή των εξαρτημάτων (Logistics-Distribution)

ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ [GR] LOGISTICS AND DISTRIBUTION OF ENGINE PARTS [EN]		Εμφάνιση Ημερομηνίας Κόπης (EN) Show Mop Map (EN)		Επιλογή Αποστολής/Παραγωγής		Παραγωγή	
RESULTS		Total emissions from logistics and distribution (kg)		0,0000			
Ανεμοστράας (FAN)		ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΚΑΜΑΝΙΑ ΠΙΣΩΣ (LPT)					
14.023.1929	Rotor Blades	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Μέση Απόδοση 2 (kg)	Αποστολή 1	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Αποστολή 2	Μέση Απόδοση 1 (kg)
14.023.1929	IGVS	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Μέση Απόδοση 2 (kg)	Αποστολή 1	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Αποστολή 2	Μέση Απόδοση 1 (kg)
14.023.1929	OGVS	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Μέση Απόδοση 2 (kg)	Αποστολή 1	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Αποστολή 2	Μέση Απόδοση 1 (kg)
14.023.1929	Disk	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Μέση Απόδοση 2 (kg)	Αποστολή 1	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Αποστολή 2	Μέση Απόδοση 1 (kg)
14.023.1929	Hardware	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Μέση Απόδοση 2 (kg)	Αποστολή 1	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Αποστολή 2	Μέση Απόδοση 1 (kg)
14.023.1929	Casings	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Μέση Απόδοση 2 (kg)	Αποστολή 1	Μέση Απόδοση 1 (kg)	Αποστολή 2	Μέση Απόδοση 1 (kg)
0							
0							
0							

Εικόνα 14-27 : Μεταφορές και διανομή εξαρτημάτων

Στο φύλλο εργασίας “Processing-Machining” πραγματοποιείται ο υπολογισμός των εκπομπών που οφείλονται στη μεταφορά των τμημάτων του στροβιλοκινητήρα κατά τη χρονική περίοδο που βρίσκεται πριν τη φάση της λειτουργίας, και κατά τη φάση της απόσυρσης του. Η δομή του θυμίζει εκείνη των προηγούμενων φύλλων.



RESULTS		Total emissions from logistics and distribution (kg)	2.033,7	
CO2eq (kg)	CO2eq (kg)	58,02618995	Ανεμιστήρας (FAN)	
17,9238499			Ροτορ Πτερυγίων	693
7,60552938			IGVS	693
7,60552938			OGVS	693
5,53139583			Disk	693
0,69142448			Hardware	693
18,6684609			Casings	693
0				
0				
0				

Εικόνα 14-28 : Επιλογή μεταφορικού μέσου

Η συνεισφορά κάθε τμήματος του κινητήρα στις ανθρακικές εκπομπές εκφράζεται ανά τόνο και χιλιόμετρο, βάσει του οχήματος που χρησιμοποιείται (4.3). Αριστερά, για κάθε εξάρτημα (και συνολικά για κάθε τμήμα) υπολογίζεται το ανθρακικό αποτύπωμα της μεταφοράς του, αφού ο χρήστης επιλέξει το μέσο μετακίνησης και διάστημα της διαδρομής σε χιλιόμετρα. Αυτό γίνεται με επιλογή από λίστα και τη συμπλήρωση του κίτρινου κελιού, αντίστοιχα (Εικόνα 14-28).

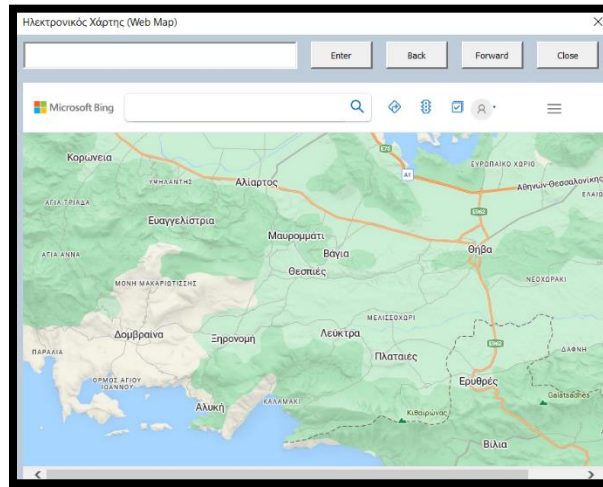
Συνολικά για κάθε εξάρτημα δίνονται έξι διαφορετικές πιθανές διαδρομές. Στο άνω μέρος του φύλλου εργασίας δίνονται οι συνολικές ανθρακικές εκπομπές για τις μεταφορές του στροβιλοκινητήρα.

Αν απαιτείται αερομεταφορά, ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει την απόσταση των δύο αεροδρομίων με τον μικρό υπολογιστή της επόμενης εικόνας. Βασίζεται στη σχέση της γεωδαισιακής καμπύλης που παρουσιάζεται στο εδάφιο .

<p>Εμφάνιση Ηλεκτρονικού Χάρτη (GR) Show Web Map (EN)</p>	Υπολογιστής Αεροπορικών Πτήσεων	Υπολογισμός	
	Αεροδρόμιο αναχώρησης	Αεροδρόμιο άφιξης	Μήκος διαδρομής (km)
	ATHENS	TARBES	2082,553539

Εικόνα 14-29 : Υπολογιστής αεροπορικών πτήσεων

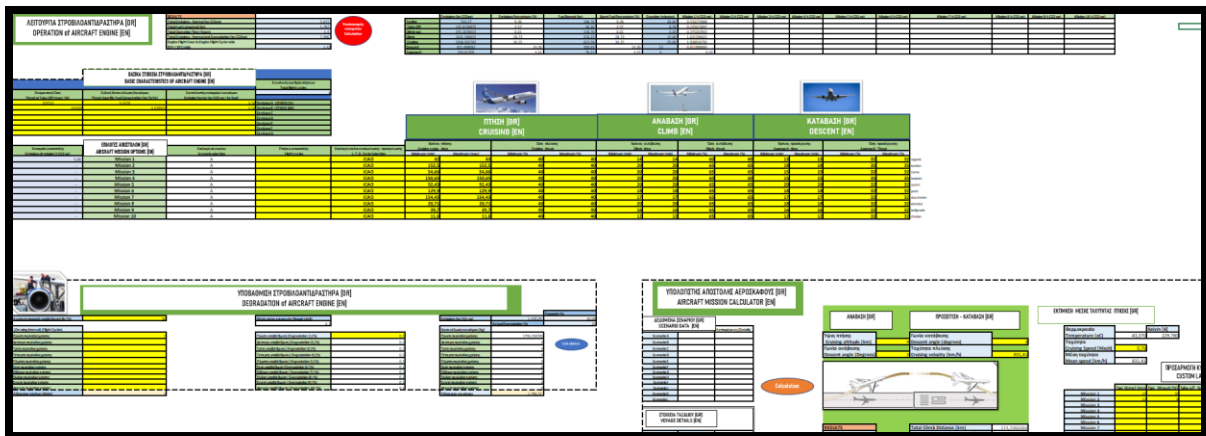
Αν υπάρξει ανάγκη για γεωγραφικό προσδιορισμό των σημείων όπου αρχίζει ή τελειώνει η μεταφορά ενός εξαρτήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ηλεκτρονικός χάρτης (Microsoft Bing ή Google Maps) πατώντας το κατάλληλο κουμπί. Απαιτείται πρόσβαση στο διαδίκτυο.



Εικόνα 14-30 : Ηλεκτρονικός χάρτης

14.2.7 Λειτουργία Στροβιλοαντιδραστήρα (Operation)

Το φύλλο εργασίας «Λειτουργία Στροβιλοαντιδραστήρα» είναι εξίσου σημαντικό με το στάδιο του κύκλου ζωής που προσομοιώνει και για αυτό τον λόγο είναι εκτενές. Η περιγραφή του θα γίνει σε στάδια, με τον ίδιο τρόπο που ο χρήστης θα συμπλήρωνε τα κελιά για να λάβει κάποιο αποτέλεσμα.



Εικόνα 14-31 : Λειτουργία στροβιλοαντιδραστήρα

Αρχικά, πρέπει να εισαχθούν στοιχεία του στροβιλοκινητήρα που θα μελετηθεί. Αυτά είναι η ώση της απογείωσης, η ειδική κατανάλωση καυσίμου στην απογείωση και ο συντελεστής εκπομπών του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Ο τρίτος διαφοροποιείται αν χρησιμοποιηθεί σύνηθες καύσιμο αεροπορίας (συμβατικό ή βιοκαύσιμο) ή κάποιο προηγμένης τεχνολογίας, όπως το υδρογόνο. Σε κάθε περίπτωση αρκεί να συμπληρωθούν τα κελιά, αριστερά από κάθε «σενάριο» κινητήρα.



ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΡΟΒΙΛΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ [GR] BASIC CHARACTERISTICS OF AIRCRAFT ENGINE [EN]			Συνολικός αριθμός πτήσεων Total flight cycles
Όνομαστική Ώση Thrust at Take Off (max) [N]	Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου Thrust-Specific Fuel Consumption [kg/N/hr]	Συντελεστής εκπομπών καυσίμου Emission factor [kg CO ₂ eq / kg fuel]	1
104533	0,0378	3,16	Σενάριο A (CFM56 5A)
104500	0,039925	3,16	Σενάριο B (CFM56 3B2)
			Σενάριο C
			Σενάριο D
			Σενάριο E
			Σενάριο F
			Σενάριο G

Εικόνα 14-32 : Πίνακας βασικών στοιχείων στροβιλοαντιδραστήρων

Για υπολογισμούς μεγαλύτερης ακριβείας, μπορούν να εισαχθούν και δεδομένα για την εμβέλεια του αεροσκάφους. Γίνεται η υπόθεση ότι το αεροσκάφος ανέρχεται και κατέρχεται με σταθερή κλίση και όχι βηματικά, μέχρι ένα ορισμένο ύψος. Αν ο χρήστης επιπλέον εισάγει τη μέση τιμή της ταχύτητας του αεροσκάφους κατά τη πλεύση και το μήκος της διαδρομής (από αεροδρόμιο σε αεροδρόμιο) τότε λαμβάνει τη μέση χρονική διάρκεια της πλεύσης.

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ [GR]
AIRCRAFT MISSION CALCULATOR [EN]**

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ [GR]
SCENARIO DATA [EN]

Σενάριο	Λεπτομέρειες (Details)
Scenario A	
Scenario B	
Scenario C	
Scenario D	
Scenario E	
Scenario F	
Scenario G	
Scenario H	
Scenario I	
Scenario J	
Scenario K	
Scenario L	

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΑΞΙΔΙΟΥ [GR]
VOYAGE DETAILS [EN]

Departure airport	Destination airport	Distance (km)
Athens	Thessaloniki	926

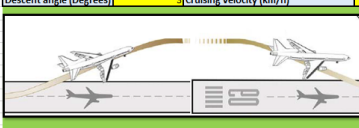
**ΑΝΑΒΑΣΗ [GR]
CLIMB [EN]**

Υψος πτήσης
Cruising altitude (km) 9

Γωνία κατάβασης
Descent angle (degrees) 3

Γωνία ανάβασης
Descent angle (Degrees) 3

Ταχύτητα πλεύσης
Cruising velocity (km/h) 831,41



**ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ - ΚΑΤΑΒΑΣΗ [GR]
APPROACH - DESCENT [EN]**

Γωνία κατάβασης
Descent angle (degrees) 3

Ταχύτητα πλεύσης
Cruising velocity (km/h) 831,41

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΤΗΣΗΣ [GR]
MEAN CRUISING SPEED ESTIMATION [EN]**

Θερμοκρασία Temperature (oC)	Kelvin [K]
-43,370	229,780
Ταχύτητα Cruising Speed (Mach)	0,76
Μέση ταχύτητα Mean speed (km/h)	831,41

**ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΥΚΛΟΥ
CUSTOM LANDING**

Mission	Taxi (time) (min)	Taxi (thrust) (%)	Take-off (time) (min)
Mission 1	15	75	
Mission 2	10	8	
Mission 3			
Mission 4			
Mission 5			
Mission 6			
Mission 7			
Mission 8			
Mission 9			
Mission 10	15	65	

Calculation

RESULTS

Χρόν. διάρκεια πτήσης Total time cruising (min)	42,03987488
Total Climb Distance (km)	171,7302302
Descent + Approach Distance (km)	171,7302302
Cruise Distance (km)	582,5395389
Climb Distance (km)	154,2824388
Descent Distance (km)	154,2824388
Climb-Cruise-Descent (km)	891,1044172
Climb-Cruise-Descent (nautical miles)	481,1578923

Εικόνα 14-33 : Υπολογιστής αποστολής αεροσκάφους

Ως αποτελέσματα λαμβάνονται επίσης και τα μήκη κάθε σταδίου του κύκλου ανάβασης – πλεύσης – κατάβασης (C.C.D.). Έτσι μπορεί ο χρήστης, αν το επιθυμεί, να εκτιμήσει τη χρονική διάρκεια των φάσεων αυτών.

Στη συνέχεια ξεκινά το στάδιο υπολογισμού των εκπομπών. Μπορούν να γίνουν υπολογισμοί για δέκα διαφορετικές αποστολές, με άλλους κινητήρες ή συνθήκες πτήσης. Οι αποστολές διαφέρουν μεταξύ τους στα παρακάτω στοιχεία :

- Στον κινητήρα και στο καύσιμο που έχει επιλεγεί, το λεγόμενο «Σενάριο». Αυτό θα μπορούσε να ήταν ακόμη και ένας στροβιλοκινητήρας που, για λόγους γήρανσης, έχει μειωμένη ώση απογείωσης ή μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Τα «Σενάρια» τα δημιουργεί ο χρήστης και στηρίζονται στη σχέση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με την ώση. Παραδείγματα τέτοιων σχέσεων και



διαγραμμάτων υπάρχουν στο εδάφιο 5.1. Η σχέση μπορεί να προκύψει από τη χρήση λογισμικών προσομοίωσης στροβιλοκινητήρων (PROOSIS για παράδειγμα).

- Στον αριθμό των πτήσεων που πραγματοποιούνται. Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό, αλλά για έναν τυπικό στροβιλοαντιδραστήρα πολιτικής αεροπορίας, ο αριθμός αυτός δε ξεπερνά τις 50.000 πτήσεις.
- Στο είδος του κύκλου απογείωσης-προσγείωσης που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης στον υπολογισμό. Μπορεί να επιλέξει τον γνωστό κύκλο του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (I.C.A.O.) (Πίνακας 5-1), ή να διαμορφώσει τον κύκλο όπως επιθυμεί εκείνος (Custom). Μπορεί για παράδειγμα να ελέγξει τη χρονική διάρκεια της τροχοδρόμησης (taxiing) ή την μέση ώση του κινητήρα στο στάδιο αυτό.

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΥΚΛΟΥ ΑΠΟΓΕΙΩΣΗΣ - ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗΣ [GR] CUSTOM LANDING AND TAKE-OFF CYCLE [EN]									
	Taxi (time) [min]	Taxi (thrust) [%]	Take-off (time) [min]	Take-off (thrust) [%]	Climb-Out (time) [min]	Climb-out (thrust) [%]	Approach (time) [min]	Approach (thrust) [%]	
Mission 1	15	70	3	80	5	20	4	30	
Mission 2	10	9	0,43	100	2,2	85			
Mission 3									
Mission 4									
Mission 5									
Mission 6									
Mission 7									
Mission 8									
Mission 9									
Mission 10	15	65	6	87	4	23	86	28	

Εικόνα 14-34 : Προσαρμογή κύκλου απογείωσης-προσγείωσης

ΠΤΗΣΗ [GR] CRUISING [EN]		ΑΝΑΒΑΣΗ [GR] CLIMB [EN]				ΚΑΤΑΒΑΣΗ [GR] DESCENT [EN]					
Χρόνος πτήσης Cruising cycle time	Όση πλεύσης Cruising thrust		Χρόνος ανόδου Climb time		Όση ανόδου Climb thrust		Χρόνος προσγείωσης Approach time		Όση προσγείωσης Approach thrust		
Minimum [min]	Maximum [max]	Minimum [%]	Maximum [%]	Minimum [min]	Maximum [min]	Minimum [%]	Maximum [%]	Minimum [min]	Maximum [min]	Minimum [%]	Maximum [%]
42	43	40	40	14	14	60	60	13	13	32	32
152,5	152,5	40	40	20	20	65	65	18	18	35	35
54,66	54,66	40	40	20	20	65	65	15	15	32	32
150,65	150,65	40	40	20	20	60	60	15	15	35	35
92,43	92,43	40	40	20	20	65	65	20	20	32	32
129,9	129,9	40	40	18	18	65	65	18	18	32	32
154,43	154,43	40	40	17	17	65	65	17	17	32	32
20,71	20,71	40	40	20	20	65	65	18	18	32	32
39,7	39,7	40	40	16	16	65	65	16	16	32	32
11,6	11,6	40	40	12	12	65	65	12	12	32	32

Εικόνα 14-35 : Στοιχεία κύκλου ανάβασης - πτήσης – κατάβασης

- Στα ποσοστά ώσης (μέσες τιμές) και στη χρονική διάρκεια (μέση τιμή) κάθε φάσης του C.C.D. κύκλου. Μία τυπική τιμή για τη πλεύση (cruising) είναι 40 % της ονομαστικής ώσης (ώση απογείωσης). Κατόπιν, ο χρήστης μπορεί να πατήσει το κουμπί υπολογισμού και να λάβει τα αποτελέσματα των ανθρακικών εκπομπών.



	Emissions (kg CO ₂ e)	Emissions Percentage (%)	Fuel Burned (kg)	Burnt Fuel Percentage (%)	Duration (minutes)	Mission 1 (t CO ₂ e)	Mission 2 (t CO ₂ e)	Mission 3 (t CO ₂ e)
Taxiing	533,27	9,39	168,78	9,39	26,00	0,533273989		
Take-Off	145,6730075	2,57	46,10	2,57	0,70	0,145673007		
Climb-out	375,2678423	6,61	118,76	6,61	2,20	0,375267842		
Climb	1631,290822	28,73	516,23	28,73	14,00	1,631290822		
Cruising	1938,932702	34,15	613,59	34,15	25,00	1,938932702		
Descent	811,898692	14,30	256,93	14,30	13	0,811898692		
Approach	240,81359	4,24	76,21	4,24	4		0,24	

Εικόνα 14-36 : Πίνακας αποτελεσμάτων αποστολών

Στην καρτέλα αποτελεσμάτων, κάθε αποστολή αναλύεται ώστε να παρουσιάζεται το ανθρακικό αποτύπωμα όλων των φάσεων της πτήσης. Επιπλέον, αν έχουν επιλεγθεί πολλές αποστολές, το ανθρακικό τους αποτύπωμα αθροίζεται και αποτυπώνεται στο αριστερό μέρος του υπολογιστικού φύλλου ως άθροισμα.

RESULTS	
Total Emissions - Normal (kg CO ₂ e)	5,677
Total Fuel consumed (kg)	1,797
Total Operation Time (hours)	1,4
Total Emissions - Normal and Degradation (kg CO ₂ e)	7,096
Engine Flight Hour to Engine Flight Cycle ratio	
EFH / EFC ratio	1,42

Εικόνα 14-37 : Πίνακας τελικών αποτελεσμάτων λειτουργίας

Επιπλέον γίνεται ο υπολογισμός του συνολικής χρονικής διάρκειας της αποστολής (ή των αποστολών) καθώς και του καυσίμου που έχει καταναλωθεί. Ταυτόχρονα υπολογίζεται και ο λόγος ωρών λειτουργίας προς αριθμό πτήσεων (engine flight hours to flights ratio), σύμφωνα με τον αριθμό των πτήσεων που έχει δηλώσει ο χρήστης.

Στο ίδιο φύλλο εργασίας υπολογίζονται οι ανθρακικές εκπομπές που οφείλονται στη χειροτέρευση του στροβιλοκινητήρα. Το υπολογιστικό εργαλείο στηρίζεται στη θεωρία που αναπτύσσεται στο εδάφιο 5.3. Ο χρήστης εισάγει το ανώτατο όριο υποβάθμισης *B_v* (%), τις περιόδους (σε κύκλους πτήσεων) με το πέρας των οποίων γίνεται ολική συντήρηση του κινητήρα και την πρώτη υποβάθμιση (%) που οφείλεται στη γήρανση του κινητήρα. Με το πάτημα του μπλε κουμπιού, το εργαλείο βρίσκει την κατανάλωση καυσίμου για κάθε περίοδο συντήρησης και δίνει ως αποτέλεσμα τις ανθρακικές εκπομπές και την τελική χειροτέρευση του κινητήρα (σε ποσοστό).



Διάρκεια Ζωής Κινητήρα (Flight Cycles or Hours)		34000	
Ανεμιστήρας (FAN)		Διάρκεια Ζωής Εξαρτημάτων (Flight Cycles or Hours)	Include Transportation? (YES / NO)
CO2 [kg eq]			
741,3993668	Rotor Blades	17900	YES
42,55907163	IGVS	17900	YES
327,3314604	OGVS	17900	YES
70,60884178	Disk	17900	YES
0,278196042	Hardware	30000	YES
183,5960364	Casings	25000	YES
0			YES
0			YES
0			YES

Εικόνα 14-40 : Υπολογισμός εκπομπών συντήρησης

Αριστερά από κάθε εξάρτημα του στροβιλοκινητήρα εμφανίζονται τα ποσά διοξειδίου του άνθρακα που του αναλογούν. Ο χρήστης μπορεί επίσης να επιλέξει αν θα συμπεριλάβει τις εκπομπές των μεταφορών στους υπολογισμούς, πατώντας τα αντίστοιχα κουμπιά ή συμπληρώνοντας τα κελιά (YES/NO).

Στο αριστερό τμήμα του φύλλου εργασίας γίνεται ο υπολογισμός των ανθρακικών εκπομπών που οφείλονται στην παραγωγή καυσίμου και λιπαντικού. Η χρήση του εργαλείου αυτού απαιτεί τη γνώση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου και του χρόνου λειτουργίας του κινητήρα. Ο χρήστης μπορεί αυθαίρετα να συμπληρώσει τα κελιά αυτά, αλλά σαφώς συνιστάται πρώτα η χρήση του φύλλου εργασίας «Λειτουργία Στροβιλοαντιδραστήρα» (14.2.7) και μετά «πάτημα» του κουμπιού «Copy from Operation». Υπάρχουν δύο δυνατές επιλογές για το λάδι και πολλές για το είδος του καυσίμου, μεταξύ άλλων βιοκαυσίμων, υδρογόνου αλλά και φυσικού αερίου.

Εικόνα 14-41 : Υπολογιστικό εργαλείο παραγωγής καυσίμων

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται αυτόματα στο ανώτερο μέρος του φύλλου εργασίας, και διαχωρίζονται στα δύο προαναφερόμενα μέρη.



RESULTS	Total Emissions (kg CO2 eq)	5.656,45
	Total Emissions from Fuel Production (kg CO2 eq)	4.149,48
	Total Emissions from Oil / Lubricant Production (kg CO2 eq)	0,45
	Total Emissions from Maintenance (kg CO2 eq)	1.506,51

Εικόνα 14-42 : Ανθρακικό αποτύπωμα συντήρησης

14.2.9 Ανακύκλωση- αποτέφρωση- χρήση χωματερής (Recycling-Landfilling)

Σε αυτό το φύλλο εργασίας υπολογίζονται οι ανθρακικές εκπομπές που οφείλονται στην απόσυρση του στροβιλοκινητήρα. Η δομή του είναι όμοια με εκείνη του «Κατεργασίες και Συναρμολόγηση του Κινητήρα» (14.2.5).

Εικόνα 14-43 : Ανακύκλωση, αποτέφρωση και χρήση χωματερής


Για κάθε εξάρτημα του στροβιλοκινητήρα, ο χρήστης επιλέγει το ποσοστό του το οποίο θα αποτεφρωθεί, θα ανακυκλωθεί, θα ταφεί ή θα επαναχρησιμοποιηθεί. Η επιλογή απαιτεί την εισαγωγή ενός ποσοστού (στο **κίτρινο** κελί) και την επιβεβαίωση «OK» στο αντίστοιχο κελί. Επίσης πρέπει να γίνει επιλογή της χώρας στην οποία θα γίνει η απόσυρση του εξαρτήματος του κινητήρα.

Αποτέφρωση	Συμμετοχή αποτέφρωσης (%)	Χωματερή	Συμμετοχή χωματερής (%)	Ανακύκλωση	Συμμετοχή ανακύκλωσης (%)	Ποσοστό Επαναχρησιμοποίησης (%)	Χώρα απόσυρσης
		OK	25	OK	75		Ηνωμένο Βασίλειο
		OK	25	OK	75		Ηνωμένο Βασίλειο
OK	50	OK	50				Ηνωμένο Βασίλειο
		OK	25	OK	75		Ηνωμένο Βασίλειο
		OK	25	OK	75		Ηνωμένο Βασίλειο
		OK	25	OK	75		Ηνωμένο Βασίλειο
		OK	25	OK	75		Ηνωμένο Βασίλειο
		OK	25	OK	75		Ηνωμένο Βασίλειο

Εικόνα 14-44 : Επιλογές απόσυρσης εξαρτημάτων

Σημειώνεται ότι εδώ οι επιλογές είναι ανεξάρτητες από εκείνες που μπορεί να γίνουν στο φύλλο εργασίας «Materials-Weight» (14.2.4). Θεωρητικά, ένας κινητήρας μπορεί να είναι κατασκευασμένος από ανακυκλώσιμα υλικά, αλλά για διάφορους λόγους τελικά κανένα από τα εξαρτήματα του να ανακυκλώνεται.

Δεξιά υπάρχει ένα υπολογιστικό εργαλείο για τις εκπομπές που οφείλονται στην αποσυναρμολόγηση του στροβιλοκινητήρα. Η λειτουργία του είναι ακριβώς η ίδια με το εργαλείο για τη συναρμολόγηση του κινητήρα (14.2.5).

Αποσυναρμολόγηση (Disassembly)		Χώρα αποσυναρμολόγησης	
		Γαλλία	
		Καταναλισκόμενη ενέργεια (kJ / kg)	(MJ/kg)
		11000	11
		Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια (kJ/engine)	(MJ/engine)
		25707000	25707
Ενέργεια	Ποσοστό	Βαθμός Απόδοσης	
Ηλεκτρική (Δίκτυο)		90	-
Μ.Ε.Κ.		10	40

Εικόνα 14-45 : Πλαίσιο αποσυναρμολόγησης στροβιλοκινητήρα


Όμοια επίσης γίνεται ο υπολογισμός της ενεργειακής κάλυψης από μηχανές εσωτερικής καύσης και από το δίκτυο της χώρας απόσυρσης (14.2.5, [Εικόνα 14-23](#)). Για κάθε εξάρτημα, εμφανίζεται δεξιά του, η απαραίτητη ενέργεια ταφής, αποτέφρωσης και αποσυναρμολόγησης. Για την ανακύκλωση χρησιμοποιούνται δείκτες εκπομπής από τη βιβλιογραφία, ανάλογα το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το εξάρτημα. Προϋπόθεση, επομένως, είναι να έχουν γίνει οι υπολογισμοί στο φύλλο εργασίας «Materials-Weight» (14.2.4).

Energy for Incineration (MJ)	Energy for Landfilling (MJ)	Energy for Disassembly (MJ)	Emissions from Disassembly (kg CO2eq)
0	182,136631	2915,015929	66,03911047
0	77,28504218	1236,912793	28,02201518
5341,942116	154,5700844	1236,912793	28,02201518
0	56,20833717	899,5894856	20,38002222
0	7,026042146	112,4486857	2,547502778
0	189,7031379	3036,114514	68,782575
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

Εικόνα 14-46 : Ενεργειακές απαιτήσεις απόσυρσης εξαρτήματος

Για κάθε εξάρτημα εμφανίζεται και το ποσό των ανθρακικών εκπομπών αποσυναρμολόγησης που του αναλογούν. Οι ανθρακικές εκπομπές που οφείλονται στην απόσυρση εμφανίζονται στα αριστερά του φύλλου εργασίας και οργανώνονται ως προς και το τμήμα του κινητήρα (συμπιεστής, θάλαμος καύσης, κ.λπ.) .



CO2eq (kg)		CO2eq (kg)	Ανεμιστήρας (FAN)
		104,5819571	
12,19945563			Rotor Blades
5,345198327			IGVS
69,75061286			OGVS
3,764817168			Disk
0,401599543			Hardware
13,12027356			Casings
0			
0			
0			
0			

Εικόνα 14-47 : Ανθρακικές εκπομπές λόγω απόσυρσης τμήματος στροβιλοκινητήρα

RESULTS				
Energy for Disassembly (MJ)		23.372,7		
Energy for Incineration (MJ)		5.545,1		
Energy for Landfilling (MJ)		1.686,6		
RESULTS	Total Emissions of End of Life (kg)	746,72	Emissions from Recycling (kg)	94,79
	Emissions from Incineration (kg)	69,77	Emissions from Disassembling (kg)	582,44
	Emissions from Landfilling (kg)	0,69		

Εικόνα 14-48 : Ανθρακικό αποτύπωμα απόσυρσης και αποσυναρμολόγησης

Με κάθε υπολογισμό, δίνονται αυτόματα οι ενεργειακές απαιτήσεις των διεργασιών αποσυναρμολόγησης και απόσυρσης, καθώς και οι συνολικές ανθρακικές εκπομπές απόσυρσης.

14.2.10 Παράρτημα (Appendix)

Το συγκεκριμένο φύλλο εργασίας αποτελεί τη βάση δεδομένων για όλους τους υπολογισμούς. Ο χρήστης μπορεί, εφόσον το επιθυμεί, να μεταβάλλει τους συντελεστές εκπομπής, τις έτοιμες κατανομές μάζας ή ακόμη και τις αποστάσεις μεταξύ διαφόρων προορισμών. Από τη σελίδα αυτή επίσης εισάγονται οι κατανομές ειδικής κατανάλωσης και ώσης για κάθε σενάριο που χρησιμοποιείται στη λειτουργία του στροβιλοκινητήρα.

14.3 Δείγμα υπολογιστικού κώδικα

Στο σύνολο του, το υπολογιστικό εργαλείο «Turbomachine CO₂ Calculator» αποτελείται από περίπου 4.375 γραμμές κώδικα Visual Basic. Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο κώδικας του υπολογισμού των ανθρακικών εκπομπών εξαιτίας της (κανονικής) λειτουργίας του στροβιλοαντιδραστήρα.



```
Sub operation1()  
Application.ScreenUpdating = False  
Dim t As Double  
Worksheets("Calculations1").Rows("2:" & Rows.Count).ClearContents  
For t = 29 To 38 'αρχίζει το loop για κάθε mission  
Dim userInput As Long  
Dim userInput0 As Long  
Dim scenario As Range  
Dim thrust As Double, sfc As Double, emission As Double  
Dim time1 As Double, rng5 As Double, time3 As Double, rng7 As Double, time2 As Double, rng2 As Double  
Dim r As Long  
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "A" Then  
Set scenario = Worksheets("Appendix").Range("A22:BA102")  
thrust = Worksheets("Operation").Range("A18").Value  
sfc = Worksheets("Operation").Range("B18").Value  
emission = Worksheets("Operation").Range("C18").Value  
Else  
End If  
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "B" Then  
Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 54),  
Worksheets("Appendix").Cells(102, 55))  
thrust = Worksheets("Operation").Range("A19").Value  
sfc = Worksheets("Operation").Range("B19").Value  
emission = Worksheets("Operation").Range("C19").Value  
Else  
End If  
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "C" Then  
Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 56),  
Worksheets("Appendix").Cells(102, 57))  
thrust = Worksheets("Operation").Range("A20").Value  
sfc = Worksheets("Operation").Range("B20").Value
```



```
emission = Worksheets("Operation").Range("C20").Value
```

```
Else
```

```
End If
```

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "D" Then
```

```
Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 58),  
Worksheets("Appendix").Cells(102, 59))
```

```
thrust = Worksheets("Operation").Range("A21").Value
```

```
sfc = Worksheets("Operation").Range("B21").Value
```

```
emission = Worksheets("Operation").Range("C21").Value
```

```
Else
```

```
End If
```

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "E" Then
```

```
Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 60),  
Worksheets("Appendix").Cells(102, 61))
```

```
thrust = Worksheets("Operation").Range("A22").Value
```

```
sfc = Worksheets("Operation").Range("B22").Value
```

```
emission = Worksheets("Operation").Range("C2").Value
```

```
Else
```

```
End If
```

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "F" Then
```

```
Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 62),  
Worksheets("Appendix").Cells(102, 63))
```

```
thrust = Worksheets("Operation").Range("A23").Value
```

```
sfc = Worksheets("Operation").Range("B23").Value
```

```
emission = Worksheets("Operation").Range("C23").Value
```

```
Else
```

```
End If
```

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "G" Then
```

```
Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 64),  
Worksheets("Appendix").Cells(102, 65))
```

```
thrust = Worksheets("Operation").Range("A24").Value
```

```
sfc = Worksheets("Operation").Range("B24").Value
```

```
emission = Worksheets("Operation").Range("C24").Value
```



Else

End If

If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "H" Then

Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 66), Worksheets("Appendix").Cells(102, 67))

Else

End If

If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "I" Then

Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 68), Worksheets("Appendix").Cells(102, 69))

Else

End If

If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "J" Then

Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 70), Worksheets("Appendix").Cells(102, 71))

Else

End If

If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "K" Then

Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 72), Worksheets("Appendix").Cells(102, 73))

Else

End If

If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "L" Then

Set scenario = Worksheets("Appendix").Range(Worksheets("Appendix").Cells(2, 74), Worksheets("Appendix").Cells(102, 75))

Else

End If

UserInput = Worksheets("Operation").Cells(t, 4).Value + 1

If UserInput > 0 Then

GoTo Continue

Else

GoTo Nextt

End If



Continue:

If Worksheets("Operation").Cells(t, 5).Value = "ICAO" Then

time1 = Worksheets("Appendix").Range("CH3").Value 'taxiing

rng5 = 7

time3 = Worksheets("Appendix").Range("CH4").Value 'takeoff

rng7 = 100

time2 = Worksheets("Appendix").Range("CH5").Value 'climb out

rng2 = 85

time4 = Worksheets("Appendix").Range("CH6").Value 'approach

rng6 = 30

Else

End If

If Worksheets("Operation").Cells(t, 5).Value = "Europe (2015)" Then

time1 = Worksheets("Appendix").Range("CI3").Value 'taxiing

rng5 = 7

time3 = Worksheets("Appendix").Range("CI4").Value 'takeoff

rng7 = 100

time2 = Worksheets("Appendix").Range("CI5").Value 'climb out

rng2 = 85

time4 = Worksheets("Appendix").Range("CI6").Value 'approach

rng6 = 30

Else

End If

If Worksheets("Operation").Cells(t, 5).Value = "Custom" Then

time1 = Worksheets("Operation").Cells(t + 42, 22).Value 'taxiing

rng5 = Worksheets("Operation").Cells(t + 42, 23).Value

time3 = Worksheets("Operation").Cells(t + 42, 24).Value 'takeoff

rng7 = Worksheets("Operation").Cells(t + 42, 25).Value

time2 = Worksheets("Operation").Cells(t + 42, 26).Value 'climb out

rng2 = Worksheets("Operation").Cells(t + 42, 27).Value

time4 = Worksheets("Operation").Cells(t + 42, 28).Value 'approach



```
rng6 = Worksheets("Operation").Cells(t + 42, 29).Value
```

```
Else
```

```
End If
```

```
If t = 29 Then
```

```
UserInput0 = 2 And UserInput = Worksheets("Operation").Cells(t, 4).Value + 1
```

```
Else
```

```
UserInput0 = Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Operation").Range(Worksheets("Operation").Cells(29, 4), Worksheets("Operation").Cells(t - 1, 4))) + 2
```

```
UserInput = Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Operation").Range(Worksheets("Operation").Cells(29, 4), Worksheets("Operation").Cells(t - 1, 4))) + Worksheets("Operation").Cells(t, 4).Value + 1
```

```
End If
```

```
For r = UserInput0 To UserInput 'αρχίζει το loop για τον αριθμό των flight cycles της κάθε αποστολής
```

```
'Πρώτο τμήμα για το taxiing
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 1).Value = time1 'Υπολογισμός χρόνου μίας τροχοδρόμησης
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 2).Value = rng5 * (1 / 100) * (thrust) 'Υπολογισμός ώσης
```

```
Dim a As Variant
```

```
Dim taxi1 As Double
```

```
Dim taxi2 As Double
```

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "" Or Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = 0 Then
```

```
taxi2 = sfc
```

```
Else
```

```
taxi1 = 100 * (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 2).Value / thrust)
```

```
a = Application.VLookup(taxi1, scenario, 2, True) 'έβαλα True για approximate και όχι exact match
```

```
If Not IsError(a) Then
```

```
taxi2 = (a / 100) * sfc
```

```
Else
```

```
taxi2 = sfc
```

```
End If
```

```
End If
```

```
'Τώρα υπολογισμός εκπομπών μίας τροχοδρόμησης
```



```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 3).Value = (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 1).Value * 60) *  
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 2).Value * (taxi2 / 3600) * emission
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 4).Value = Worksheets("Calculations1").Cells(r, 3).Value / emission
```

'Δεύτερο τμήμα για takeoff

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 7).Value = time3 'Υπολογισμός χρόνου μίας τροχοδρόμησης
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 8).Value = rng7 * (1 / 100) * (thrust) 'Υπολογισμός ώσης
```

Dim w As Variant

Dim takeoff1 As Double

Dim takeoff2 As Double

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "" Or Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = 0 Then
```

```
takeoff2 = sfc
```

Else

```
takeoff1 = 100 * (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 8).Value / thrust)
```

```
w = Application.VLookup(takeoff1, scenario, 2, True) 'έβαλα True για approximate και όχι exact match
```

```
If Not IsError(w) Then
```

```
takeoff2 = (w / 100) * sfc
```

Else

```
takeoff2 = sfc
```

```
End If
```

```
End If
```

'Τώρα υπολογισμός εκπομπών ενός takeoff

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 9).Value = (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 7).Value * 60) *  
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 8).Value * (takeoff2 / 3600) * emission
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 10).Value = Worksheets("Calculations1").Cells(r, 9).Value / emission
```

'Τρίτο τμήμα για climb-out

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 31).Value = time2 'Υπολογισμός χρόνου climb-out
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 32).Value = rng2 * (1 / 100) * (thrust) 'Υπολογισμός ώσης climb-out
```

Dim g As Variant

Dim climbout1 As Double

Dim climbout2 As Double

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "" Or Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = 0 Then
```

```
climbout2 = sfc
```




Else

$\text{climbout1} = 100 * (\text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 32).\text{Value} / \text{thrust})$

$g = \text{Application.VLookup}(\text{climbout1}, \text{scenario}, 2, \text{True})$ 'έβαλα True για approximate και όχι exact match

If Not IsError(g) Then

$\text{climbout2} = (g / 100) * \text{sfc}$

Else

$\text{climbout2} = \text{sfc}$

End If

End If

'Τώρα υπολογισμός εκπομπών ενός climb-out

$\text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 33).\text{Value} = (\text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 31).\text{Value} * 60) * \text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 32).\text{Value} * (\text{climbout2} / 3600) * \text{emission}$

$\text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 34).\text{Value} = \text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 33).\text{Value} / \text{emission}$

'τέταρτο τμήμα για approach

$\text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 35).\text{Value} = \text{time4}$ 'Υπολογισμός χρόνου climb-out

$\text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 36).\text{Value} = \text{rng6} * (1 / 100) * (\text{thrust})$ 'Υπολογισμός ώσης climb-out

Dim b As Variant

Dim approach1 As Double

Dim approach2 As Double

If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "" Or Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = 0 Then

$\text{approach2} = \text{sfc}$

Else

$\text{approach1} = 100 * (\text{Worksheets}(\text{"Calculations1"}).\text{Cells}(r, 36).\text{Value} / \text{thrust})$

$b = \text{Application.VLookup}(\text{approach1}, \text{scenario}, 2, \text{True})$ 'έβαλα True για approximate και όχι exact match

If Not IsError(b) Then

$\text{approach2} = (b / 100) * \text{sfc}$

Else

$\text{approach2} = \text{sfc}$

End If

End If

'Τώρα υπολογισμός εκπομπών ενός climb-out



```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 37).Value = (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 35).Value * 60) *  
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 36).Value * (climbout2 / 3600) * emission
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 38).Value = Worksheets("Calculations1").Cells(r, 37).Value / emission
```

'Γέμπτο τμήμα για climb

```
Dim time7 As Range
```

```
Dim time8 As Range
```

```
Dim rng11 As Long
```

```
Dim rng12 As Long
```

```
Worksheets("Calculations1").Range("W2").Value = Worksheets("Operation").Cells(t, 10).Value * 1000 'min time
```

```
Worksheets("Calculations1").Range("X2").Value = Worksheets("Operation").Cells(t, 11).Value * 1000 'max time
```

```
Set time7 = Worksheets("Calculations1").Range("W2")
```

```
Set time8 = Worksheets("Calculations1").Range("X2")
```

```
rng11 = Worksheets("Operation").Cells(t, 12).Value 'min thrust
```

```
rng12 = Worksheets("Operation").Cells(t, 13).Value 'max thrust
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 19).Value = (WorksheetFunction.RandBetween(time7, time8)) / 1000
```

'Υπολογισμός χρόνου μίας απογείωσης

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 20).Value = WorksheetFunction.RandBetween(rng11, rng12) * (1 / 100) * (thrust)
```

'Υπολογισμός ώσης

```
Dim d As Variant
```

```
Dim climb1 As Double
```

```
Dim climb2 As Double
```

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "" Or Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = 0 Then
```

```
climb2 = sfc
```

```
Else
```

```
climb1 = 100 * (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 20).Value / thrust)
```

```
d = Application.VLookup(climb1, scenario, 2, True) 'έβαλα True για approximate και όχι exact match
```

```
If Not IsError(d) Then
```

```
climb2 = (d / 100) * sfc
```

```
Else
```

```
climb2 = sfc
```

```
End If
```

```
End If
```

'Τώρα υπολογισμός εκπομπών ενος climb



```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 21).Value = (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 19).Value * 60) *  
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 20).Value * (climb2 / 3600) * emission
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 22).Value = Worksheets("Calculations1").Cells(r, 21).Value / emission
```

'Τέταρτο τμήμα για descent

```
Dim time5 As Range
```

```
Dim time6 As Range
```

```
Dim rng9 As Long
```

```
Dim rng10 As Long
```

```
Worksheets("Calculations1").Range("Q2").Value = 1000 * Worksheets("Operation").Cells(t, 14).Value 'min time
```

```
Worksheets("Calculations1").Range("R2").Value = 1000 * Worksheets("Operation").Cells(t, 15).Value 'max time
```

```
Set time5 = Worksheets("Calculations1").Range("Q2")
```

```
Set time6 = Worksheets("Calculations1").Range("R2")
```

```
rng9 = Worksheets("Operation").Cells(t, 16).Value 'min thrust
```

```
rng10 = Worksheets("Operation").Cells(t, 17).Value 'max thrust
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 13).Value = (WorksheetFunction.RandBetween(time5, time6)) / 1000  
'Υπολογισμός χρόνου μίας απογείωσης
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 14).Value = WorksheetFunction.RandBetween(rng9, rng10) * (1 / 100) * (thrust)  
'Υπολογισμός ώσης
```

```
Dim c As Variant
```

```
Dim descent1 As Double
```

```
Dim descent2 As Double
```

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "" Or Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = 0 Then
```

```
descent2 = sfc
```

```
Else
```

```
descent1 = 100 * (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 14).Value / thrust)
```

```
c = Application.VLookup(descent1, scenario, 2, True) 'έβαλα True για approximate και όχι exact match
```

```
If Not IsError(c) Then
```

```
descent2 = (c / 100) * sfc
```

```
Else
```

```
descent2 = sfc
```

```
End If
```

```
End If
```

'Τώρα υπολογισμός εκπομπών ενος descent



```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 15).Value = (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 13).Value * 60) *  
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 14).Value * (descent2 / 3600) * emission
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 16).Value = Worksheets("Calculations1").Cells(r, 15).Value / emission
```

'Πέμπτο βήμα για cruise

```
Dim time9 As Range
```

```
Dim time10 As Range
```

```
Dim rng13 As Long
```

```
Dim rng14 As Long
```

```
Worksheets("Calculations1").Range("AC2").Value = 1000 * Worksheets("Operation").Cells(t, 6).Value 'min time
```

```
Worksheets("Calculations1").Range("AD2").Value = 1000 * Worksheets("Operation").Cells(t, 7).Value 'max time
```

```
Set time9 = Worksheets("Calculations1").Range("AC2")
```

```
Set time10 = Worksheets("Calculations1").Range("AD2")
```

```
rng13 = Worksheets("Operation").Cells(t, 8).Value 'min thrust
```

```
rng14 = Worksheets("Operation").Cells(t, 9).Value 'max thrust
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 25) = (WorksheetFunction.RandBetween(time9, time10)) / 1000 'Υπολογισμός  
χρόνου μίας cruise
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 26) = WorksheetFunction.RandBetween(rng13, rng14) * (1 / 100) * (thrust)  
'Υπολογισμός ώσης
```

```
Dim e As Variant
```

```
Dim cruise1 As Double
```

```
Dim cruise2 As Double
```

```
If Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = "" Or Worksheets("Operation").Cells(t, 3).Value = 0 Then
```

```
    cruise2 = sfc
```

```
Else
```

```
    cruise1 = 100 * (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 26).Value / thrust)
```

```
    e = Application.VLookup(cruise1, scenario, 2, True) 'έβαλα True για approximate και όχι exact match
```

```
If Not IsError(e) Then
```

```
    cruise2 = (e / 100) * sfc
```

```
Else
```

```
    cruise2 = sfc
```

```
End If
```

```
End If
```

'Τώρα υπολογισμός εκπομπών ενός cruise



```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 27) = (Worksheets("Calculations1").Cells(r, 25) * 60) *  
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 26) * (cruise2 / 3600) * emission
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(r, 28) = Worksheets("Calculations1").Cells(r, 27) / emission
```

Next r

'Υπολογισμός εκπομπών για κάθε αποστολή ξεχωριστά

```
Worksheets("Operation").Cells(2, t - 17) =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range(Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput  
0, 3), Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput, 3))) / 1000 'taxiing
```

```
Worksheets("Operation").Cells(3, t - 17) =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range(Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput  
0, 9), Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput, 9))) / 1000 'take-off
```

```
Worksheets("Operation").Cells(4, t - 17) =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range(Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput  
0, 33), Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput, 33))) / 1000 'climb-out
```

```
Worksheets("Operation").Cells(5, t - 17) =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range(Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput  
0, 21), Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput, 21))) / 1000 'climb
```

```
Worksheets("Operation").Cells(6, t - 17) =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range(Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput  
0, 27), Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput, 27))) / 1000 'cruise
```

```
Worksheets("Operation").Cells(7, t - 17) =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range(Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput  
0, 15), Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput, 15))) / 1000 'descent
```

```
Worksheets("Operation").Cells(8, t - 17) =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range(Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput  
0, 37), Worksheets("Calculations1").Cells(UserInput, 37))) / 1000 'approach
```

Nextt:

Next t

'Ξεκαθάρισμα των κελιών που δεν αντιστοιχούν σε αποστολή

Dim n As Double

For n = 29 To 38

If Not Worksheets("Operation").Cells(n, 4).Value > 0 Then

```
Worksheets("Operation").Range(Worksheets("Operation").Cells(2, n - 17), Worksheets("Operation").Cells(8, n -  
17)).ClearContents
```

Else

End If

'Σύνολο εκπομπών κάθε αποστολής



Worksheets("Operation").Cells(n, 1).Value =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Operation").Range(Worksheets("Operation").Cells(2, n - 17),
 Worksheets("Operation").Cells(8, n - 17)))

Next n

Άθροισμα των εκπομπών άνθρακα

Worksheets("Operation").Range("G2") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("C2:C99999")) 'taxi

Worksheets("Operation").Range("G3") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("I2:I99999")) 'takeoff

Worksheets("Operation").Range("G4") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("AG2:AG99999")) 'climbout

Worksheets("Operation").Range("G5") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("U2:U99999")) 'climb

Worksheets("Operation").Range("G6") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("AA2:AA99999")) 'cruise

Worksheets("Operation").Range("G7") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("O2:O99999")) 'descent

Worksheets("Operation").Range("G8") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("AK2:AK99999")) 'approach

Worksheets("Operation").Range("D2") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Operation").Range("G2:G8")) 'Total CO2

Ποσοστό κάθε φάσης

Worksheets("Operation").Range("H2").Value = (Worksheets("Operation").Range("G2").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D2")) * 100

Worksheets("Operation").Range("H3").Value = (Worksheets("Operation").Range("G3").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D2")) * 100

Worksheets("Operation").Range("H4").Value = (Worksheets("Operation").Range("G4").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D2")) * 100

Worksheets("Operation").Range("H5").Value = (Worksheets("Operation").Range("G5").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D2")) * 100

Worksheets("Operation").Range("H6").Value = (Worksheets("Operation").Range("G6").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D2")) * 100

Worksheets("Operation").Range("H7").Value = (Worksheets("Operation").Range("G7").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D2")) * 100

Worksheets("Operation").Range("H8").Value = (Worksheets("Operation").Range("G8").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D2")) * 100

Άθροισμα της μάζας καυσίμου που καταναλώνεται

Worksheets("Operation").Range("I2") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("D2:D99999")) 'taxi



Worksheets("Operation").Range("I3") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("J2:J99999")) 'takeoff

Worksheets("Operation").Range("I4") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("AH2:AH99999")) 'climbout

Worksheets("Operation").Range("I5") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("V2:V99999")) 'climb

Worksheets("Operation").Range("I6") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("AB2:AB99999")) 'cruise

Worksheets("Operation").Range("I7") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("P2:P99999")) 'descent

Worksheets("Operation").Range("I8") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("AL2:AL99999")) 'approach

Worksheets("Operation").Range("D3") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Operation").Range("I2:I8")) 'Total Fuel

Ποσοστό καυσίμου που καίγεται

Worksheets("Operation").Range("J2").Value = (Worksheets("Operation").Range("I2").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D3")) * 100 'taxi

Worksheets("Operation").Range("J3").Value = (Worksheets("Operation").Range("I3").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D3")) * 100 'takeoff

Worksheets("Operation").Range("J4").Value = (Worksheets("Operation").Range("I4").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D3")) * 100 'climbout

Worksheets("Operation").Range("J5").Value = (Worksheets("Operation").Range("I5").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D3")) * 100 'climb

Worksheets("Operation").Range("J6").Value = (Worksheets("Operation").Range("I6").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D3")) * 100 'cruise

Worksheets("Operation").Range("J7").Value = (Worksheets("Operation").Range("I7").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D3")) * 100 'descent

Worksheets("Operation").Range("J8").Value = (Worksheets("Operation").Range("I8").Value /
 Worksheets("Operation").Range("D3")) * 100 'approach

Χρόνος που διαρκεί κάθε φάση

Worksheets("Operation").Range("K2") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("A2:A99999")) 'taxi

Worksheets("Operation").Range("K3") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("G2:G99999")) 'takeoff

Worksheets("Operation").Range("K4") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("AE2:AE99999")) 'climbout

Worksheets("Operation").Range("K5") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("S2:S99999")) 'climb

Worksheets("Operation").Range("K6") =
 Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("Y2:Y99999")) 'cruise



```
Worksheets("Operation").Range("K7") =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("M2:M99999")) 'descent
```

```
Worksheets("Operation").Range("K8") =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Calculations1").Range("A12:A199999")) 'approach
```

```
Worksheets("Operation").Range("D4").Value =  
(Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Operation").Range("K2:K8")))/60 'Total time
```

```
Worksheets("Operation").Range("D5").Value = Worksheets("Operation").Range("D2").Value +  
Worksheets("Operation").Range("H58").Value 'Total emissions
```

'Σύνολο των πτήσεων

```
Worksheets("Operation").Range("D16") =  
Application.WorksheetFunction.Sum(Worksheets("Operation").Range("D29:D38"))
```

'EFH/EFC ratio

```
If Not Worksheets("Operation").Range("D16") = 0 Then
```

```
Worksheets("Operation").Range("D7").Value = Worksheets("Operation").Range("D4").Value /  
Worksheets("Operation").Range("D16").Value
```

```
Else
```

```
End If
```

'υπολογισμός λιπαντικού που καταναλώθηκε (se kg)

```
Dim total_flights As Double
```

```
Dim uu As Variant
```

```
total_flights = Worksheets("Operation").Range("D16").Value
```

```
For uu = 2 To (total_flights + 2)
```

```
Worksheets("Calculations1").Cells(uu, 39).Value = (Worksheets("Maintenance").Range("B25").Value *  
(Worksheets("Calculations1").Cells(uu, 1).Value + Worksheets("Calculations1").Cells(uu, 7).Value +  
Worksheets("Calculations1").Cells(uu, 13).Value + Worksheets("Calculations1").Cells(uu, 19).Value +  
Worksheets("Calculations1").Cells(uu, 25).Value + Worksheets("Calculations1").Cells(uu, 31).Value +  
Worksheets("Calculations1").Cells(uu, 35).Value) / 60)
```

```
Next
```

```
Call pinakas3
```

```
Application.ScreenUpdating = True
```

```
End Sub
```