



«Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας»
«Πρόγραμμα Σπουδών: Διαχείριση και Τεχνολογία
Ποιότητας»

Διπλωματική Εργασία

«Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αεροσκάφους»

«Όνομα & Επώνυμο Συγγραφέα: Παρασκευή Ανδρόνη»

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: «Όλγα Ανεζίρη»

Πάτρα, «Αύγουστος» «2023»

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίας στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αεροσκάφους»

«Παρασκευή Ανδρώνη»

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

«Όλγα Ανεζίρη»

«Σύμβουλος Καθηγήτρια, ΕΑΠ»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

«Νικόλαος Λογοθέτης»

«Σύμβουλος Καθηγητής, ΕΑΠ»

Πάτρα, «Αύγουστος» «2023»

«Ευχαριστίες»

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια κυρία Ανεζίρη, για την επικοινωνία, την βοήθειά της σε καιριά σημεία της της εργασίας, καθώς και για την κατανόηση της ιδιαίτερης κατάστασης, εξαιτίας των πολλών μετακινήσεών μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον σύντροφό μου, για την ενθάρρυνση και την απόλυτη στήριξη, και στους γονείς μου για τις αξίες που μου εμφύσησαν.

Περίληψη

Καθώς το αεροπορικό δίκτυο επεκτείνεται, τα πολιτικά αεροσκάφη κυριαρχούν ολοένα και περισσότερο στον κλάδο των μεταφορών, προσφέροντας γρήγορες, βολικές, άνετες και ασφαλείς επιλογές υπεραστικών, μεγάλων, διεθνών και περιφερειακών μεταφορών επιβατών και εμπορευμάτων. Ωστόσο, οι πιθανές δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αεροπορικών μεταφορών, ειδικά οι ρύποι που παράγονται κατά την παραγωγή αεροσκαφών, παραμένει σημαντικός προβληματισμός για αυτήν την έρευνα.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη διεξαγωγή αξιολόγησης του κύκλου ζωής των αεροσκαφών A319 και A330 για την ανάλυση των περιβαλλοντικών του επιπτώσεων. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην επίδραση των σύνθετων υλικών στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του αεροσκάφους, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών παραγωγής και απόρριψής τους. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός λοιπόν, έγινε μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική προσέγγιση της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (LCA) των αεροσκαφών, που περιλάμβανε τις επιπτώσεις στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής του, δηλαδή, από την παραγωγή έως και την απόρριψή του τελικά. Το λογισμικό Simapro φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε στις βιβλιογραφικές πηγές για τη μοντελοποίηση των φάσεων κατασκευής, λειτουργίας και τέλους ζωής των αεροσκαφών A319 και A330. Μέσω αυτής της ενδεδειγμένης Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής, η μελέτη προσφέρει κατευθυντήριες γραμμές και συμπεράσματα για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης του αεροσκάφους.

Η ερευνητική διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία μιας λίστας απογραφής, η οποία περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων για το βάρος και τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε κάθε εξάρτημα του αεροσκάφους, τις πληροφορίες εισόδου και εξόδου της διαδικασίας κατασκευής σύνθετου υλικού, καθώς και λεπτομέρειες σχετικά με την απόρριψη αεροσκαφών και την επεξεργασία σύνθετων υλικών. Στη συνέχεια, διενεργείται εκτίμηση επιπτώσεων και των δύο μοντέλων αεροσκαφών για να αξιολογηθεί η περιβαλλοντική τους επίδραση σε κάθε στάδιο ζωής και σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής. Τα ευρήματα που προέκυψαν βιβλιογραφικά με τη χρήση του λογισμικού Simapro αποκαλύπτουν ότι η φάση λειτουργίας του αεροσκάφους είναι ο κύριος μοχλός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ η κατασκευή του αεροσκάφους συνεισφέρει σχετικά μικρότερη. Επιπλέον, το σενάριο τέλους ζωής αποδίδει μια ελαφρά θετική συμβολή σε όλες τις

θεωρούμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, σύμφωνα με το έργο της Airbus «Διαδικασία για την προηγμένη διαχείριση του τέλους ζωής των αεροσκαφών».

Από τη μελέτη τελικά εξάγεται το συμπέρασμα ότι η χρήση σύνθετων υλικών έχει θετική επίδραση στη μείωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής του αεροσκάφους. Αυτό το εύρημα δίνει τη δυνατότητα στους κατασκευαστές αεροσκαφών να στοχεύουν τομείς προς βελτίωση, οδηγώντας στην παραγωγή πιο άνετων, φιλικών προς το περιβάλλον και ανταγωνιστικών αεροσκαφών στην αγορά.

Λέξεις – Κλειδιά

Airbus A330 και A319, Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Κλιματική Αλλαγή, Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της Αεροπορίας, διαδικασία παραγωγής, διαδικασία απόρριψης, αποσυναρμολόγηση.

«LIFE CYCLE ASSESSMENT OF AN AIRCRAFT »

«Paraskevi Androni»

Abstract

As the airline network expands, civil aircraft increasingly dominate the transportation industry, offering fast, convenient, comfortable and safe options for long-distance, long-haul, international and regional passenger and cargo transport. However, the potential adverse environmental impacts of air transport, especially pollutants produced during aircraft production, remains a major concern for this research.

This work focuses on conducting a life cycle assessment of the A319 and A330 aircraft for the analysis of its environmental impacts. Particular attention is paid to the impact of composite materials on the overall environmental footprint of the aircraft, including their production and disposal processes. To achieve this goal, a comprehensive bibliographic approach of Life Cycle Assessment (LCA) of aircraft was carried out, which included environmental impacts throughout its life cycle, from production to disposal. Simapro software appears to have been used in the literature to model the manufacturing, operational and end-of-life phases of the A319 and A330 aircraft. Through this thorough Life Cycle Assessment, the study offers guidelines and conclusions to improve the environmental performance of the aircraft.

The research process begins with the creation of an inventory list, which includes gathering data on the weight and materials used in each aircraft component, input and output data of the composite manufacturing process, and details of aircraft disposal. and the processing of composite materials. An impact assessment of both aircraft models is then carried out to assess their environmental impact at each life stage and over the entire life cycle. The literature findings using the Simapro software reveal that the aircraft operating phase is the main driver of environmental impact, while the aircraft construction is a relatively minor contributor. In addition, the end-of-life scenario yields a slight

positive contribution to all considered environmental impacts, according to the Airbus project "Process for Advanced Aircraft End-of-Life Management".

The study concludes that the use of composite materials has a constructive effect on reducing the overall environmental impact of the aircraft life cycle. This finding enables aircraft manufacturing companies to target areas for improvement, leading to the production of comfortable, environmentally friendly and more competitive aircraft in the market.

Keywords

Keywords: Airbus A330 and A319 aircraft, Life Cycle Assessment, Climate Change, Environmental Impact of Aviation, production process, disposal process, disassembly

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Ανάλυση κύκλου ζωής αεροσκάφους.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Μοντελοποίηση και αξιολόγηση της βιωσιμότητας των αεροσκαφών και των συστημάτων πρόωσής τους	5
1.3 Εννοιολόγηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	7
1.3.1 Σύντομο Ιστορικό Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	8
1.4 Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής.....	11
1.4.1 Μέθοδοι Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	15
1.5 Μηχανογράφηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)	16
Κεφάλαιο 2 Ανάλυση κύκλου ζωής σε αεροσκάφος: Μελέτη περίπτωσης.....	18
2.1 LCA σε αεροσκάφος	18
2.2 Μελέτη περίπτωσης: Μοντελοποίηση του κύκλου ζωής του αεροσκάφους Airbus A330 και A319	22
2.2.1 Ανάλυση Αποθέματος Κύκλου Ζωής.....	25
2.2.2 Στάδιο Παραγωγής	26
2.2.2.1 Εξαρτήματα υλικά και βάρη των αεροσκαφών	26
2.2.3 Στάδιο λειτουργίας και απόρριψης.....	31
2.2.4 Τέλος ζωής του αεροσκάφους.....	34
2.3 Μοντέλο κύκλου ζωής για το A319	38
Συμπεράσματα.....	49
Βιβλιογραφία	51

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1: Μια προσέγγιση μοντελοποίησης για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των μελλοντικών συστημάτων των αεροσκαφών (Lopes 2010).....	6
Εικόνα 2: Αναπαράσταση των διαφορετικών σταδίων του κύκλου ζωής (Lopes 2010)	10
Εικόνα 3: Βήματα Εκτίμησης Επιπτώσεων Κ. Ζ., σύμφωνα με το ISO 14042.....	12
Εικόνα 4: Σύνδεση δείκτη RPK με τον όρο Sustainable Aviation (Sustainable Aviation 2023)	20
Εικόνα 5: Πλαίσιο AKZ στην αεροπορική βιομηχανία (Keiser et Al 2023)	22
Εικόνα 6: Αναγνώριση των κύριων εξαρτημάτων του Airbus A330-200.....	23
Εικόνα 7: Διάγραμμα ροής διαδικασίας των αεροσκαφών A319 και A330	25
Εικόνα 8: Γενική Κατανομή Βάρους σε A330-200.....	26
Εικόνα 9: Κύρια εξαρτήματα του A319 (Airbus, 2002).....	28
Εικόνα 10: Βάρος βασικών εξαρτημάτων A319	29
Εικόνα 11: Βάρος υλικού και ποσοστό A319	30
Εικόνα 12: Γενική ανάλυση υλικού του αεροσκάφους A330-200, συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών προσγείωσης	31
Εικόνα 13: A330-200 κόστος λειτουργίας (Lee et Al 2019).....	33
Εικόνα 14: Στάδια Αποσυναρμολόγησης του αεροσκάφους (Feldhusen et al.,2011)	35
Εικόνα 15: Αναλογία κάθε σεναρίου διάθεσης για το A319.....	37
Εικόνα 16: LCA για το Airbus A319	39
Εικόνα 17: Κατηγοριοποίηση επιπτώσεων που εξετάζονται με τη μέθοδο ReCiPe (Huijbregts et Al 2016)	41
Εικόνα 18: A 319 LCA με χρήση του προγράμματος SimaPro	44
Εικόνα 19: Η συμβολή της LCA του A319 στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις	48

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση πάνελ CFRP κ GLARE με αλουμίνιο 2024.....	19
Πίνακας 2 Σύγκριση σωλήνα CFRP με χάλυβα.....	19
Πίνακας 3 Κύρια χαρακτηριστικά του Airbus A330-200	23
Πίνακας 4 Βασικά στοιχεία του A319 (Airbus, 2013)	24
Πίνακας 5 Γενική σύνθεση βάρους του αεροσκάφους Airbus A330-200, ανά εξαρτήματα αεροσκάφους.....	27
Πίνακας 6 Διαστάσεις A319 (Airbus, 2013)	28
Πίνακας 7 Σενάριο διάθεσης ανά υλικό για το A319.....	36
Πίνακας 8 Μεταφορά εξαρτημάτων A319 προς τελική συναρμολόγηση (Buergin et Al 2019)	39
Πίνακας 9 Εισροές στο Sima Pro για τα δομικά μέρη του Airbus A319.....	42
Πίνακας 10 Κατηγορίες επιπτώσεων της μεθόδου εκτίμησης επιπτώσεων ReCiPe MindPoid.....	45
Πίνακας 11 Η συμβολή της LCA του A319 στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων	47

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

AKZ	Ανάλυση Κύκλου Ζωής
LCA	Life Cycle Assessment
LCM	Life Cycle Management
LCE	Life Cycle Engineering
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
ΠΕ	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις
ΠΑ	Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα
ISO	International Organization for Standarization
EI	Emvairomental Impact
CFRP	Carbon- fiber reinforced plastic
GLARE	Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy
CNG	Συμπιεσμένο Φυσικό Αέριο
LNG	Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο
MCDM	Multi – Criteria Decision - Making
B20	Bio- diesel
REPA	Resource and Environmental Profile Analysis
RPK	Revenue Passenger Kilometers
PAMELA	Process for Advanced Management of End- of- Life Aircraft.

Κεφάλαιο 1: Ανάλυση κύκλου ζωής αεροσκάφους

1.1 Εισαγωγή

Η αεροπορική βιομηχανία αναγκάζεται να εφαρμόσει βιώσιμη κατασκευαστική πρακτική λόγω της αυξανόμενης πίεσης από τις κυβερνήσεις, τους διεθνείς οργανισμούς και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς για τη διασφάλιση βελτιωμένων περιβαλλοντικών επιδόσεων. Η αεροπορική δραστηριότητα συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές CO₂. Υπολογίστηκε ότι κατά την τριετία 2016 με 2019 η συνεισφορά ήταν 3,1% (Federal Association of the German Air Transport Industry e. V.(BDL),(2019).

Διεξήχθη βιβλιογραφική ανάλυση για την ανασκόπηση των μελετών σχετικά με την LCA σε εξαρτήματα αεροσκαφών. Οι Koroneos et al. (2005) διεξήγαγαν μια μελέτη LCA για την κηροζίνη που χρησιμοποιείται σε εμπορικά αεριωθούμενα αεροσκάφη. Ο κύριος στόχος της μελέτης ήταν η εκτίμηση της ΠΕ (Περιβαλλοντικής Επίπτωσης) που προκαλείται από την κηροζίνη ως καύσιμο των αερομεταφορών. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην ανάλυση LCA είναι η μέθοδος στάθμισης Eco-Indicator 95 Hischer et al.(2010) Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι η χρήση κηροζίνης ως καυσίμου αεροσκαφών προκαλεί το 99,5% των εκπομπών CO₂. Άλλα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ΠΕ που προκαλούνται από την κηροζίνη είναι η αυξημένη εκπομπή Nox και SO₂ με αποτέλεσμα να οδηγεί στην άνοδο του φαινομένου της όξυνσης, του φαινομένου του θερμοκηπίου και της αιθαλομίχλης. Οι Lokesh et al. (2015) είχαν κάνει το πρώτο βήμα της εξέτασης της ΠΕ που προκαλείται από τη βίο-συνθετική παραφινική κηροζίνη (bio-SPK) και τη σύγκριση με το συμβατικό καύσιμο jet-A. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε βάσει της έννοιας από την κούνια μέχρι τον τάφο. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν μας δείχνουν ξεκάθαρα ότι η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα στα βίο-καύσιμα έχει θετικότερο ΠΑ και εξοικονόμηση καυσίμου σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα jet-A. Οι Horvath & Chester (2007) είχαν κάνει ένα πρώτο βήμα προς τον προσδιορισμό του ΕΙ διαφόρων συστατικών σε σιδηροδρόμους και αεροσκάφη. Διεξήχθησαν μελέτες σχετικά με το σχεδιασμό, την παραγωγή, τη λειτουργία και τις φάσεις του τέλους ζωής των αεροσκαφών και των βαρέων σιδηροτροχιών. Στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα LCA, είναι η LCA που βασίζεται σε μοντέλα διεργασίας και η LCA που βασίζεται σε ανάλυση εισροών-εκροών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μη λειτουργικά εξαρτήματα προκαλούν μικρότερο ΠΑ και τα χρησιμοποιούμενα ορυκτά καύσιμα

προκαλούν υψηλό ΠΑ. Οι Song et al. (2009) επιχείρησαν το πρώτο βήμα της LCA σε σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με διεργασία pultrusion. Είχαν κάνει μια μελέτη περίπτωσης για διαφορετικές διαδικασίες που εμπλέκονται στη διαδικασία pultrusion. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται στη LCA συγκρίνονται με συμβατικά υλικά αεροσκαφών όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ΠΑ που προκαλείται από σύνθετα υλικά από διεργασία εξωθήσεως ήταν πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το αλουμίνιο και τον χάλυβα. Ο Lopes (2010) πραγματοποίησε LCA σε πλήρη κύκλο ζωής του αεροσκάφους Airbus A330-200. Ο συγγραφέας χρησιμοποίησε το λογισμικό Simapro για ανάλυση LCA και τη μέθοδο ReCiPe Midpoint Hischer et al.(2010). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε φάσεις κατασκευής, λειτουργίας και λήξης ζωής των αεροσκαφών. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η χρήση ορυκτών καυσίμων οδηγεί σε υψηλότερο ΠΑ καθώς και η φάση λειτουργίας αντίθετα, η φάση του τέλους ζωής δημιουργεί μικρότερο ποσοστό ΠΑ επειδή τα περισσότερα από τα συστατικά ανακυκλώνονται σε αυτή τη φάση. Οι Scelsi et al. (2011) προσπάθησαν να καθορίσουν τη συνολική εκπομπή που παράγεται κατά την κατασκευή και την απόρριψη ενός συμβατικού αεροδιαστημικού πάνελ κατασκευασμένου από κράμα αλουμινίου 2024 και ενός, κατασκευασμένο από εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα (CFRP) και υαλοπίνακες/ ελασματοποιημένο υλικό (GLARE). Ως μεθοδολογία ανάλυσης χρησιμοποίησαν το λογισμικό Simapro 7.1 LCA και το Eco- Indicator 99(E) V2.05. Από την ανάλυση, διαπίστωσαν ότι η χρήση CFRP και GLARE μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή κατανάλωση καυσίμου και μείωση του συνολικού ΠΑ. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με τη χρήση ελαφρών σύνθετων κατασκευών, η κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς οι εκπομπές CO₂ μειώνονται. Οι Subic et al. (2010) πραγματοποίησαν LCA για να καθορισθεί η επίδραση που δημιουργούν τα καθίσματα των επιβατών σε διάφορα μοντέλα οχημάτων. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν έδειξαν ότι τα καθίσματα από σύνθετα υλικά, άρα και μικρότερο βάρος, προσδίδουν μικρότερο ΠΑ. Επίσης, τα καθίσματα που είναι σχεδιασμένα να είναι αεροδυναμικά προτιμώνται περισσότερο και δημιουργούν μικρότερο αντίκτυπο από άλλα καθίσματα επιβατών σε διάφορα μοντέλα οχημάτων. Οι Milani et al. (2011) πραγματοποίησαν μελέτη LCA σε σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη. Εξέτασαν τις τρέχουσες σύνθετες μεθοδολογίες και προσπάθησαν να ενσωματώσουν τη λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDM) στην LCA. Με ανάλυση LCA, βρήκαν το EI (Environmental Impact) και το κόστος των σύνθετων υλικών. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η χρήση σύνθετων υλικών στα αεροσκάφη μειώνει το EI και το κόστος κατασκευής και

λειτουργικών φάσεων και ότι η ανακύκλωση των σύνθετων υλικών είναι η φάση που προκαλεί υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Οι Veeramanikandan et al. (2017) πραγματοποίησαν την εφαρμογή της LCA σε προκαταρκτικά/πρώιμα στάδια σχεδιασμού εξαρτημάτων αεροσκαφών. Επικεντρώθηκαν κυρίως στο κόστος του κύκλου ζωής και στην οικονομική ή περιβαλλοντική ανάλυση σε φάσεις του κύκλου ζωής των εξαρτημάτων αυτών. Οι διαφορετικές φάσεις του κύκλου ζωής περιλαμβάνουν το σχεδιασμό, την παραγωγή, τη λειτουργία, την ανακύκλωση και την απόρριψη. Από τις μελέτες τους, ανέφεραν ότι η εφαρμογή της LCA σε προκαταρκτικά στάδια βοηθά στον βιώσιμο σχεδιασμό αεροσκαφών. Οι Böckmann & Schmitt (2012) επιχείρησαν ένα πρώτο βήμα προς την προσέγγιση της ανάλυσης του κύκλου ζωής στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Αυτή η μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως στη μείωση των ΠΕ σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής του αεροσκάφους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι αξιολογήσεων τη παραγωγής, δηλαδή ανάλυση που έγινε από πάνω προς τα κάτω και εκείνη που έγινε από κάτω προς τα πάνω, και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση σύνθετων υλικών στην κατασκευή της ατράκτου σε σχέση με τη χρήση αλουμινίου ως κύριο υλικό είναι προτιμότερη για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους.

Ο Ehrenberger (2013) διενέργησε LCA σε εξαρτήματα που περιέχουν ποσότητες μαγνησίου που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη. Αυτό το LCA βοηθά στην εύρεση του ΠΑ που προκαλείται από το μαγνήσιο μέσα στην πορεία των διαφορετικών σταδίων του κύκλου ζωής. Έκαναν μια μελέτη περίπτωσης για το μαγνήσιο στα αεροσκάφη και τις εφαρμογές τους. Τα αποτελέσματα της LCA έδειξαν ότι το μαγνήσιο περνά από διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής και μεταξύ αυτών, η ηλεκτρόλυση έχει υψηλή ΠΑ. Η ανακύκλωση προκαλεί μικρότερο ΠΑ επειδή τα περισσότερα από τα συστατικά μαγνησίου στο αεροσκάφος ανακυκλώνονται. Οι Johanning & Scholz (2013) επιχείρησαν ένα πρώτο βήμα προς την ενσωμάτωση της LCA στον εννοιολογικό σχεδιασμό και έτσι βρήκαν την επίδραση στην κλιματική αλλαγή που προκαλούνται από ένα αεροσκάφος. Για την ανάλυση LCA, χρησιμοποίησαν το λογισμικό Simapro και τη μέθοδο World ReCiPe. Από την ανάλυσή τους διαπίστωσαν ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρει ένα αεροσκάφος, οφείλονται σε ποσοστό 47% στην εξάντληση των φυσικών πόρων (καύσιμα) ως 44% στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής. Στο συμπέρασμα αυτό κατέληξαν μελετώντας διαφορετικά πολιτικά αεροσκάφη μικρότερων και μεγαλύτερων διαστάσεων (Embraer 145, AibusA320, AirbusA330, Boeing 737 & Boeing 747).

Ο Liu (2013) διεξήγαγε LCA σε αεροσκάφη Airbus A319 και B737-800 και διαπίστωσε την επίδραση των σύνθετων υλικών στο στάδιο της κατασκευής και της διάθεσης. Ως μέθοδο ανάλυσης χρησιμοποίησαν το λογισμικό Simapro LCA και το Eco-Indicator 99(H) V2.07. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίνονται με δύο αεροσκάφη και το αποτέλεσμα κατέληξε ως χρήση σύνθετων υλικών μειώνει το βάρος του αεροσκάφους και κατ' επέκταση το ΠΑ. Επίσης επιχείρησε ένα πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό του ΠΑ του συστήματος αεροπορικών μεταφορών επιβατών χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σενάρια πτήσης. Ο συγγραφέας πραγματοποίησε τις μελέτες στην εξάτμιση GHG για τα τρία σενάρια πτήσης, το σύνολο των επιβατών και τη διάρκεια ζωής του οχήματος. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τη μέθοδο World ReCiPe (ReCiPe 2016) για την ανάλυση. Μετά τη διεξαγωγή LCA σε ελαφρά αεροσκάφη, Airbus A320 και A330, συνήχθη το συμπέρασμα ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου χωρίς σωλήνα εξαγωγής ήταν περισσότερες σε αεροσκάφη μικρού βάρους. Επίσης διεξήγαγαν LCA σε αεροσκάφη Airbus A320 για να καθορίσει το EI κάθε εξαρτήματος σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής του. Ως μέθοδος ανάλυσης χρησιμοποιείται ο Eco-Indicator 99. Διαπίστωσαν ότι το μεγαλύτερο μέρος του EI που προκαλείται από τα ορυκτά καύσιμα βρίσκεται στην επιχειρησιακή φάση με 99,9%. Τα εξαρτήματα φτερού και κινητήρα με 63% συμβάλλουν στο EI στη φάση της κατασκευής.

Οι Keivanpour et al. (2013) πραγματοποίησαν ανάλυση τέλους ζωής στη διαδικασία ανακύκλωσης αεροσκαφών. Η μελέτη τους αποκάλυψε ότι τα αεροπλάνα που καταλήγουν στο τέλος της ζωής τους αυξάνονται κάθε χρόνο. Πραγματοποίησαν έργο ανακύκλωσης αεροσκαφών στο τέλος του κύκλου ζωής τους (EOLARP) με ένα εννοιολογικό πλαίσιο για τα αεροσκάφη. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι υπάρχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση απέναντι σε διαφορετικούς κλάδους απαραίτητο για την εκτέλεση ανάλυσης τέλους ζωής σε αεροσκάφη. Οι Wilson et al. (2014) επιχείρησαν ένα πρώτο βήμα ανακατασκευής της παραδοσιακής διαδικασίας κατασκευής πτερυγίων στροβίλου σε διαδικασία κατασκευής απόθεσης laser. Διεξήγαγαν περιπτωσιολογικές μελέτες σχετικά με ελαττώματα στο πτερύγιο του στροβίλου και μεθόδους για την εξάλειψη των ελαττωμάτων. Η LCA διεξήχθη για την εύρεση του EI και της ενέργειας που προκαλείται από τη διαδικασία ανακατασκευής. Χρησιμοποίησαν το IPCC 2007 GWP 100aV1.01 και Cumulative Energy Demand V1.05 ως μέθοδο. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν με χρήση LCA έδειξαν ότι η κατασκευή απόθεσης με laser είναι η βέλτιστη μέθοδος κατασκευής. Οι Delogu et al. (2015) πραγματοποίησαν LCA σε πλαστική πολλαπλή εισαγωγής αέρα. Η

μελέτη τους έδειξε ότι η πολλαπλή εισαγωγής αέρα (AIM) είναι ένα μέρος του κινητήρα που υπόκειται σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις και θερμοκρασία. Συμβατικά, χρησιμοποιούνται κράματα αλουμινίου ή μαγνησίου για αυτό στοχεύει. Πραγματοποίησαν LCA για να αναλύσουν την επίδραση του αλουμινίου και του κράματος μαγνησίου και συνέκριναν τα αποτελέσματα με αντίστοιχα κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά. Οι Maxineasa et al. (2015)πραγματοποίησαν LCA για να βρουν το ΕΙ του ενισχυτικού πολυμερούς από ανθρακονήματα. Η μελέτη τους αποκάλυψε τη σημασία και προσδιόρισε την επίδραση που δημιουργείται από το ενισχυτικό πολυμερές από ανθρακονήματα. Πραγματοποίησαν ανάλυση κρούσης μιας μη ενισχυμένης δοκού από οπλισμένο σκυρόδεμα με διαφορετικό πολυμερές οπλισμού από ανθρακονήματα.

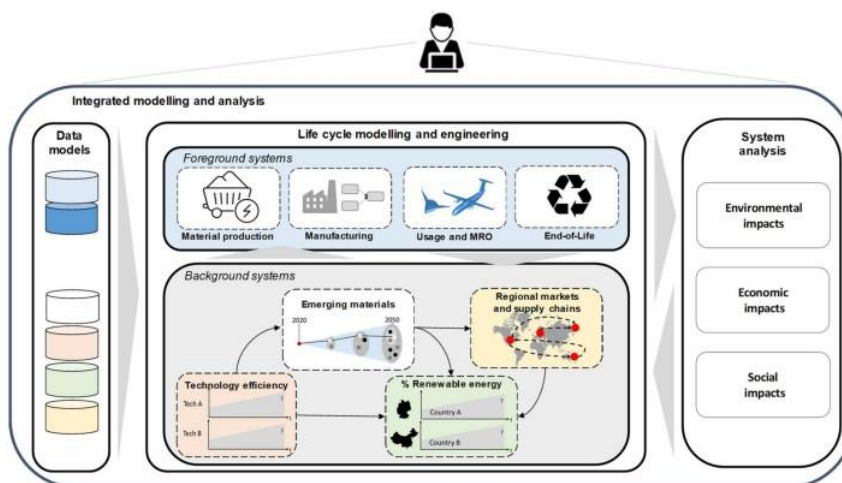
Οι McKenzie & Durango-Cohen (2012) πραγματοποίησαν LCA για να βρουν τον αντίκτυπο των εναλλακτικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στον τομέα των μεταφορών. Ένα εναλλακτικό καύσιμο είναι ένας από τα πιο σημαντικά πράγματα που δεν δεν γίνεται να μην εξεταστούν αν θέλουμε να επιτύχουμε μείωση του κόστους και τη βελτίωση της απόδοσης. Διεξήγαγαν LCA σε διάφορα καύσιμα όπως το συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), αλλά και βιοντίζελ (B2O) και συνέκριναν τα αποτελέσματα.

1.2 Μοντελοποίηση και αξιολόγηση της βιωσιμότητας των αεροσκαφών και των συστημάτων πρόωσής τους

Από την έκθεση «Το κοινό μας μέλλον» της «Επιτροπής Brundtland», η βιωσιμότητα συχνά αναφέρεται ως η τριπλή κατώτατη γραμμή, η αειφόρος ανάπτυξη που ορίζεται παραδοσιακά στις τρεις διαστάσεις της (περιβαλλοντική, οικονομική και κοινωνική βιώσιμη ανάπτυξη). Σε αντίθεση με τον ορισμό της σχετικής βιωσιμότητας, η έννοια της απόλυτης βιωσιμότητας έχει ενισχυθεί τα τελευταία χρόνια, λαμβάνοντας υπόψη τις κοινωνικές και οικονομικές διαστάσεις που βρίσκονται μαζί με την περιβαλλοντική διάσταση. Διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής και στους τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας, η έννοια της Μηχανικής Κύκλου Ζωής (LCE) ορίστηκε «ως δραστηριότητες ανάπτυξης προϊόντων προσανατολισμένες στη βιωσιμότητα εντός του πεδίου εφαρμογής, ενός έως και πολλών κύκλων ζωής ενός προϊόντος» (Wang et al., 2017). Με αυτόν τον τρόπο, η ιδέα LCE στοχεύει στην καθοδήγηση των μηχανικών δραστηριοτήτων από την απαρχή μέχρι και το τέλος ενός αεροσκάφους με στόχο τη βιωσιμότητα.

Στο πλαίσιο του τρέχοντος μετασχηματισμού του συστήματος αεροπορικών μεταφορών προς νέες τεχνολογίες αεροσκαφών, οι πτυχές της βιωσιμότητας σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής θα καθορίσουν την επιτυχία των μελλοντικών συστημάτων αεροσκαφών και θα επηρεάσουν τις δυνατότητές τους, ώστε να μειώσουν τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Η Εικόνα 1 εισάγει ένα πλαίσιο για μια ολοκληρωμένη μοντελοποίηση της βιωσιμότητας που επιτρέπει μια αποτελεσματική αξιολόγηση και τη μηχανική του συστήματος προϊόντων και την αλληλεπίδρασή του με τα σχετικά συστήματα και το περιβάλλον.

Σε αυτήν την ενότητα, εισάγονται οι πτυχές της βιωσιμότητας και τα εργαλεία μοντελοποίησης για την ενσωμάτωση των φυσικών και των περιβαλλοντικών, αλλά και των κοινωνικοοικονομικών μοντέλων πολλαπλής κλίμακας για την αξιολόγηση του μέλλοντος της πολιτικής αεροπορίας. Η ανάγκη για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση μοντελοποίησης LCE, που θα επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού αποθεμάτων με βάση τη διακύμανση των τεχνικών, γεωγραφικών αλλά και χρονικών παραμέτρων, είναι δικαιολογημένη, επιτρέποντας μια ισχυρή αξιολόγηση της βιωσιμότητας της μελλοντικής ανάπτυξης της αεροναυπηγικής βιομηχανίας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, το πλαίσιο συγκεντρώνει τρία σύνολα υπομοντέλων και συναρτήσεων σε μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα μοντελοποίησης και ανάλυσης.



Εικόνα 1: Μια προσέγγιση μοντελοποίησης για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των μελλοντικών συστημάτων των αεροσκαφών. (Lopes 2010)

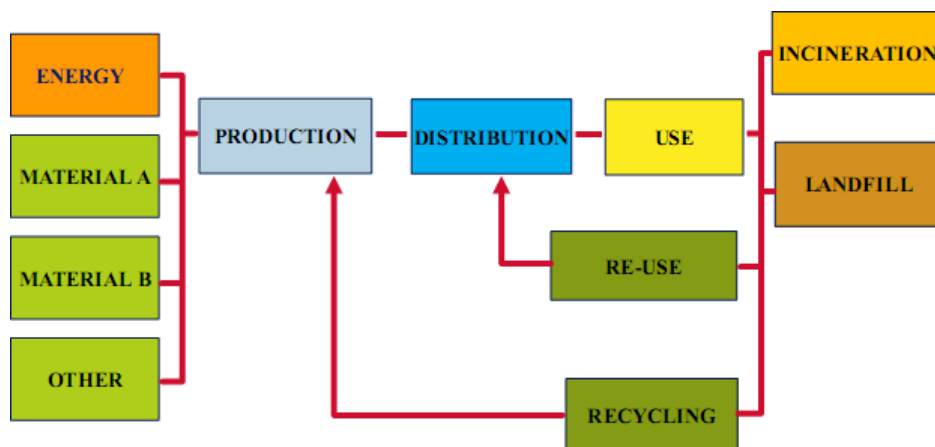
Περιέχει βιβλιοθήκες μοντέλων που απεικονίζουν τα πιθανά συστήματα, καθώς και μοντέλα για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης μεταξύ των φανερών συστημάτων και των μη-φανερών και τη μοντελοποίησή τους. Το ολοκληρωμένο πλαίσιο συνδέεται

επιπλέον με μοντέλα για την αξιολόγηση του συστήματος προϊόντων όσον αφορά τις κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις διαδικασίες ανάλυσης δεδομένων που επιτρέπουν την ενσωμάτωση αυτών των βασικών δεικτών απόδοσης ως μηχανικούς περιορισμούς στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών. Στη συνέχεια, περιγράφεται κάθε ενότητα του πλαισίου και αιτιολογείται η συνάφειά του με την αξιολόγηση βιωσιμότητας και τη μηχανική μελλοντικών τεχνολογιών αεροσκαφών (Pinheiro Melo et al., 2020).

1.3 Εννοιολόγηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Καθοδηγούμενοι από την αυξανόμενη περιβαλλοντική συνείδηση, διάφορες βιομηχανίες έχουν αναγνωρίσει τη σημασία της αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δραστηριοτήτων τους. Υπάρχει πλέον κοινό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη πιο πράσινων προϊόντων και διαδικασιών που ελαχιστοποιούν τις βλάβες που προκαλούνται στο περιβάλλον από τη δραστηριότητά τους. Για να το επιτύχουν αυτό, οι εταιρείες αναζητούν ολιστικές και συστηματικές προσεγγίσεις που να καλύπτουν όχι μόνο οικονομικά και τεχνικά ζητήματα αλλά και περιβαλλοντικές πτυχές. Ένα εργαλείο που έχει αναδειχθεί ως πιθανή λύση σε αυτήν την πρόκληση είναι η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (LCA) (Liu, 2013b; McKenzie & Durango-Cohen, 2012; Timmis et al., 2015).

Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής εξετάζει τις συνέπειες των ενεργειών από την αρχή μέχρι το τέλος, αναγνωρίζοντας ότι τα προϊόντα και οι διαδικασίες έχουν κύκλους ζωής. Κάθε φάση του κύκλου ζωής, μεταξύ των οποίων, η εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών, η κατασκευή, η μεταφορά, η διανομή, η χρήση/επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η διαχείριση των απορριμμάτων, περιλαμβάνει αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον. Η LCA επιτρέπει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση αυτών των αλληλεπιδράσεων και παρέχει δεδομένα για τις περιβαλλοντικές επιδράσεις των προϊόντων και των διαδικασιών.



Εικόνα 2: Αναπαράσταση των διαφορετικών σταδίων του κύκλου ζωής (Lopes 2010)

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) είναι ένα εργαλείο που βοηθάει στην περιβαλλοντική διαχείριση και ποσοτικοποιεί τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός προϊόντος σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, συμπεριλαμβανομένων των δραστηριοτήτων και των διαδικασιών του. Με μια προσέγγιση από την «κούνια μέχρι τον τάφο», η αξιολόγηση ξεκινά με την εξόρυξη πρώτων υλών και τελειώνει με την επιστροφή τους στη φύση ή την επανένταξη τους σε άλλες βιομηχανικές διαδικασίες. Αξιολογώντας μία προς μία τις φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, η LCA παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των περιβαλλοντικών επιδόσεων του, προσφέροντας μια πιο ρεαλιστική κατανόηση της πραγματικής του επίδρασης στη φύση (Bicer&Dincer, 2017; Lopes, 2010; Liu, 2013b).

1.3.1 Σύντομο Ιστορικό Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, η εμφάνιση νέων ενεργειακών τεχνολογιών πυροδότησε συζητήσεις σχετικά με την ενεργειακή ισορροπία. Η πυρηνική ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια και άλλες ανανεώσιμες πηγές παρουσίασαν συναρπαστικές και αμφιλεγόμενες δυνατότητες. Κατά συνέπεια, η ενεργειακή ανάλυση έγινε πιο περίπλοκη, συστημική και περίπλοκη μέσω εμπειρικών εξελίξεων. Αρχικά, η ενεργειακή ανάλυση επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση μιας ενιαίας μονάδας ενέργειας και στην εξέταση των άμεσων εισροών εντός του συστήματος παραγωγής. Καθώς οι τεχνολογίες έγιναν πιο περίπλοκες, η ανάλυση επεκτάθηκε (Lopes, 2010). Μια

κομβική στιγμή στην εξέλιξη της ενεργειακής ανάλυσης συνέβη με ένα θεμελιώδες ερώτημα: Μια δεδομένη διαδικασία παραγωγής πυρηνικής ενέργειας καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από αυτή που παράγει; Για να απαντήσουν σε αυτό το ερώτημα, οι ερευνητές έπρεπε να εξετάσουν πτυχές πέρα από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Άρχισαν να εξετάζουν παράγοντες όπως η εξόρυξη πρώτων υλών (π.χ. ουράνιο), η παραγωγή «κίτρινου κέικ», η μακροπρόθεσμη διαχείριση απορριμμάτων, η μεταφορά προσωπικού, υλικών και εξοπλισμού, καθώς και σχετικές υπηρεσίες έρευνας, ανάπτυξης, μάρκετινγκ και διαχείρισης. Αυτό έθεσε τα θεμέλια για αυτό που τελικά έγινε γνωστό ως Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Bicer & Dincer, 2017; Liu, 2013b; Timmis et al., 2015).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, οι πρώτες Αναλύσεις Περιβαλλοντικού Προφίλ Πόρων (REPAs) πραγματοποιήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα ήταν μια μελέτη που ανατέθηκε από την The Coca-Cola Company το 1969, με επικεφαλής μια ομάδα ερευνητών που αργότερα ίδρυσαν την Franklin Associates. Αυτή η μελέτη συνέκρινε την περιβαλλοντική απόδοση διαφορετικών δοχείων ποτών ποσοτικοποιώντας τις πρώτες ύλες, τη χρήση καυσίμου και τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που σχετίζονται με τη διαδικασία κατασκευής κάθε δοχείου. Παρόμοιες συγκριτικές αναλύσεις απογραφής κύκλου ζωής πραγματοποιήθηκαν στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ από άλλες εταιρείες στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Οι REPAs στην Ευρώπη ήταν γνωστές ως Ecobalance. Περίπου 15 REPA πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 1970 και 1975, κυρίως λόγω των ελλείψεων πετρελαίου στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και της δημόσιας ζήτησης για ακριβείς πληροφορίες από τις βιομηχανίες. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, αναπτύχθηκαν πρωτόκολλα, τυπική τεχνολογία έρευνας και διαδικασίες αναθεώρησης από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA) και εκπροσώπους της βιομηχανίας, που οδήγησαν στην εξέλιξη της ανάλυσης περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των μεθοδολογιών της.

Μεταξύ 1975 και 1980, το ενδιαφέρον για αυτές τις μελέτες μειώθηκε, κυρίως λόγω της φθίνουσας επιρροής της πετρελαϊκής κρίσης και της αυξανόμενης σημασίας της διαχείρισης επικίνδυνων και οικιακών απορριμμάτων. Ωστόσο, οι αναλύσεις του κύκλου ζωής συνεχίστηκαν με βραδύτερο ρυθμό, εστιάζοντας κυρίως στις ενεργειακές απαιτήσεις, με περίπου δύο μελέτες που διεξάγονται ετησίως. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ίδρυσε μια Διεύθυνση Περιβάλλοντος, η οποία διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην τυποποίηση των κανονισμών για τη ρύπανση (Bicer & Dincer, 2017; Timmis et al., 2015).

Στη δεκαετία του 1980, η LCA απέκτησε ξανά τη σημασία ως εργαλείο για την ανάλυση περιβαλλοντικών θεμάτων, ιδιαίτερα ως απάντηση στις κλιμακούμενες ανησυχίες για τα στερεά απόβλητα. Το εύρος της συστηματικής έρευνας πολλαπλών κριτηρίων επεκτάθηκε πέρα από την ενέργεια για να συμπεριλάβει τομείς όπως τα αυτοκίνητα, η κατοικία και οι συσκευές. Με κίνητρο το αυξανόμενο ενδιαφέρον για το περιβάλλον και όλα τα θέματα που σχετίζονται με τους πόρους, η μεθοδολογία της LCA επεκτάθηκε και βελτιώθηκε. Τέλος, το 1990, κατά τη διάρκεια ενός εργαστηρίου που διοργάνωσε η Εταιρεία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (SETAC) στο Βερμόντ των ΗΠΑ, προτάθηκε και υιοθετήθηκε ο όρος «ανάλυση κύκλου ζωής».

Μετά από αυτό το σημείο, η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (LCA) γνώρισε ταχεία ανάπτυξη, εξελισσόμενη σε μια συλλογή συστηματικών, περιεκτικών και αναλυτικών προσεγγίσεων για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Λόγω της ακατάλληλης χρήσης των ΑΚΖ από τους κατασκευαστές προϊόντων για σκοπούς προώθησης και μάρκετινγκ, η SETAC ανέλαβε την πρωτοβουλία να αναπτύξει και να επεκτείνει την ΑΚΖ δημοσιεύοντας διάφορους οδηγούς «βέλτιστων πρακτικών» και παρέχοντας οδηγίες για απλοποίηση και μεθόδους (Bicer & Dincer, 2017). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μελέτες για εφαρμογές ΑΚΖ σε δημόσια πολιτική και συγκεκριμένους τομείς, καθώς και για την ενσωμάτωσή της σε πρακτικές οργανωτικής διαχείρισης. Τελικά, υπό την πίεση των περιβαλλοντικών οργανώσεων, αυτές οι προσπάθειες οδήγησαν στην τυποποίηση της μεθοδολογίας LCA στη σειρά 14000 του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO) (1997-2002). Αυτή η αναγνώριση ISO αποτελεί απόδειξη της δυναμικής και σχετικής φύσης της Βιομηχανικής Οικολογίας και των εργαλείων της, συμπεριλαμβανομένης της LCA.

Το 2002, το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) και η SETAC ίδρυσαν την Πρωτοβουλία Κύκλου Ζωής UNEP/SETAC για να προωθήσουν την ανάπτυξη και την κατανόηση της LCA. Αυτή η πρωτοβουλία στοχεύει στη λειτουργικότητα της σκέψης του κύκλου ζωής και αποτελείται από τρία προγράμματα (Lopes, 2010; Liu, 2013b; Scelsi et al., 2011; Timmis et al., 2015):

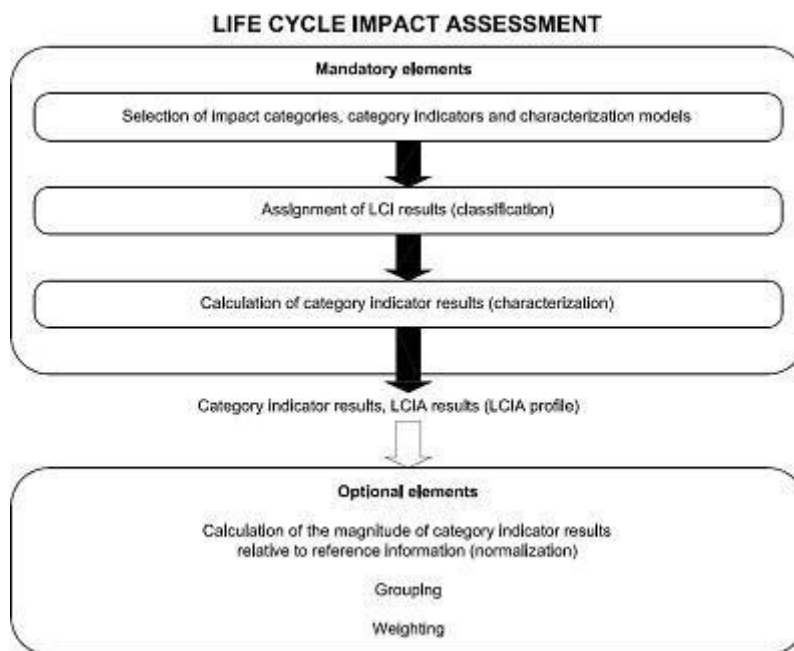
Διαχείριση Κύκλου Ζωής (LCM): Αυτό το πρόγραμμα αυξάνει την ευαισθητοποίηση και ενισχύει τις δεξιότητες των υπευθύνων λήψης αποφάσεων δημιουργώντας ενημερωτικό υλικό, διευκολύνοντας φόρουμ για την ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών και παρέχοντας ευκαιρίες παγκόσμιας κατάρτισης.

Απογραφή Κύκλου Ζωής (LCI): Το πρόγραμμα LCI βελτιώνει την πρόσβαση σε διαφανή και αξιόπιστα δεδομένα του κύκλου ζωής φιλοξενώντας ομάδες εμπειρογνομόνων και υποστηρίζοντας την ανάπτυξη συστημάτων πληροφοριών που βασίζονται στο διαδίκτυο. Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (LCIA): Το πρόγραμμα LCIA ενισχύει την ποιότητα και την παγκόσμια εφαρμογή των δεικτών κύκλου ζωής διευκολύνοντας την ανταλλαγή απόψεων και βέλτιστων πρακτικών μεταξύ των ειδικών, οδηγώντας σε αξιόπιστες συστάσεις.

Την τελευταία δεκαετία, το αυξανόμενο ενδιαφέρον για αυτόν τον τομέα είναι εμφανές μέσα από συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες. Κατά συνέπεια, έχουν προκύψει διεθνή περιοδικά αφιερωμένα στην LCA, όπως το "The International Journal of Life Cycle Assessment". Η LCA περιλαμβάνει διάφορα πεδία γνώσης και έχει συμβάλει σημαντικά στη μηχανική, τη διαχείριση, την οικονομία και την οικολογία, λειτουργώντας ως ζωτικός σύνδεσμος μεταξύ τους. Για αυτούς τους λόγους, η LCA αναγνωρίζεται ευρέως ως θεμελιώδες εργαλείο στη σφαίρα της βιομηχανικής οικολογίας.

1.4 Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής

Η Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (LCIA) περιλαμβάνει την εκτίμηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από τα δεδομένα του Αποθέματος Κύκλου Ζωής (LCI), τα οποία ποσοτικοποιούν τις εισροές και τις εκροές, για την κατανόηση της περιβαλλοντικής τους σημασίας. Λαμβάνει υπόψη την εξάντληση των φυσικών πόρων, τις επιπτώσεις στον άνθρωπο, αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ο σκοπός του LCIA είναι να δημιουργήσει μια συστηματική σύνδεση μεταξύ ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας και των αντίστοιχων περιβαλλοντικών συνεπειών του (ανατρέξτε στο Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Βήματα Εκτίμησης Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής, σύμφωνα με το ISO 14042

Για να εκτελεστεί μια LCIA με επίσημο τρόπο, τρία υποχρεωτικά βήματα ορίζονται από το πρότυπο ISO 14042 για την εκτίμηση επιπτώσεων (ISO 1998). Μπορούν να γίνουν πρόσθετα βήματα εάν είναι επιθυμητό, και έχουν καθοριστεί μέθοδοι για αυτά τα πρόσθετα βήματα. Τα τρία βασικά βήματα που περιγράφονται από το πρότυπο ISO για τη διεξαγωγή LCIA είναι τα εξής (Lopes, 2010; Liu, 2013b):

Επιλογή και ορισμός των κατηγοριών επιπτώσεων: Προσδιορισμός των κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (π.χ. υπερθέρμανση του πλανήτη) που σχετίζονται με μια συγκεκριμένη LCA, με βάση τον στόχο και το εύρος αυτής της ΑΚΖ. Οι επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων καθορίζουν τους τύπους δεδομένων που θα συλλεχθούν κατά τη διάρκεια του LCI. Η μέθοδος αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζεται επίσης σε αυτό το βήμα.

Ταξινόμηση: Αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από το LCI (π.χ. ποσότητα εκπεμπόμενου SO₂ ανά λειτουργική μονάδα) στις αντίστοιχες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις οποίες συμβάλλουν. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα μεμονωμένο αποτέλεσμα LCI μπορεί να συμβάλλει σε πολλαπλές περιβαλλοντικές

κατηγορίες (π.χ. εκπομπές SO₂ που συμβάλλουν τόσο στην οξίνιση όσο και στις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία).

Χαρακτηρισμός: Σε αυτό το βήμα, υπολογίζεται το μέγεθος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για κάθε κατηγορία επιπτώσεων και η συμβολή τους ποσοτικοποιείται. Οι συντελεστές μετατροπής που βασίζονται στην επιστήμη, γνωστοί ως παράγοντες χαρακτηρισμού, χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή και τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων LCI σε αντιπροσωπευτικούς δείκτες για την ανθρώπινη και οικολογική υγεία. Αυτοί οι παράγοντες υποδεικνύουν πόσο μια ουσία συνεισφέρει σε μια κατηγορία επιπτώσεων σε σύγκριση με μια ουσία αναφοράς, επιτρέποντας συγκρίσεις διαφορετικών αποτελεσμάτων LCI σε κάθε κατηγορία επιπτώσεων. Η ακόλουθη εξίσωση δείχνει πώς μπορεί να ληφθεί ένας δείκτης επιπτώσεων:

$$\text{Δείκτης επιπτώσεων} = \text{Δεδομένα αποθέματος} \times \text{Συντελεστής Χαρακτηρισμού}$$

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα μοντέλα για τον προσδιορισμό των παραγόντων χαρακτηρισμού για διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων, αν και μπορεί να υπάρχει συναίνεση για την καλύτερη επιλογή για ορισμένες κατηγορίες όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη και η καταστροφή του όζοντος. Οι παράγοντες χαρακτηρισμού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον χαρακτηρισμό των επιπτώσεων και ένας σημαντικός όγκος έρευνας LCIA στοχεύει να αναπτύξει και να βελτιώσει πιο ισχυρούς παράγοντες χαρακτηρισμού.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της οξίνισης, όλες οι συνεισφέρουσες ουσίες (π.χ. διοξείδια θείου, μονοξείδια του αζώτου) συγκεντρώνονται με βάση τους αντίστοιχους παράγοντες χαρακτηρισμού τους, με αποτέλεσμα έναν δείκτη που αντιπροσωπεύει τη γενική πιθανή επίδραση της οξίνισης.

Η θεμελιώδης μεθοδολογία του LCIA αποτελείται από τα προαναφερθέντα τρία βήματα, και παρόλο που ορισμένες υποκειμενικές κρίσεις μπορεί να είναι απαραίτητες κατά καιρούς, η φύση τους παραμένει αντικειμενική. Επιπλέον, η φάση LCIA επιτρέπει την ανάληψη προαιρετικών βημάτων. Συνοπτικές περιγραφές μερικών από αυτά τα προαιρετικά βήματα παρέχονται παρακάτω (Keivanpour et al., 2013; C. Koroneos et al., 2010; Liu, 2013a; Pinheiro Melo et al., 2020):

Κανονικοποίηση: Σε αυτό το βήμα, μια τιμή δείκτη που λαμβάνεται από το LCIA διαιρείται με μια τιμή αναφοράς που λαμβάνεται από εξωτερικές πηγές. Αυτή η διαίρεση προσφέρει μια νέα προοπτική για τα αποτελέσματα. Η κανονικοποίηση επιτρέπει την ανάλυση των αποτελεσμάτων LCIA σε σχέση με εξωτερικές εκτιμήσεις, ενισχύοντας τη συγκρισιμότητα μεταξύ δεδομένων από διαφορετικές κατηγορίες επιπτώσεων. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την επιλογή μιας τιμής αναφοράς, όπως οι συνολικές εκπομπές ή η χρήση πόρων για μια συγκεκριμένη περιοχή ή περιοχή ή οι κατά κεφαλήν εκπομπές ή η χρήση πόρων. Η επιλογή της καταλληλότερης τιμής αναφοράς εξαρτάται από τον στόχο και το εύρος της μελέτης.

$$\text{Κανονικοποιημένος δείκτης} = \frac{\text{Δείκτης επίπτωσης}}{\text{Τιμή Αναφοράς}}$$

Στάθμιση: Αναγνωρίζοντας ότι ορισμένοι δείκτες κατηγορίας μπορεί να θεωρηθούν πιο σημαντικοί από άλλους από την οπτική γωνία του χρήστη LCA, το βήμα στάθμισης εκχωρεί σταθμίσεις σε κάθε κατηγορία επιπτώσεων με βάση τη σχετική σημασία τους. Αυτό επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας κάθε δείκτη με τον αντίστοιχο συντελεστή στάθμισης, παρέχοντας ένα μέσο για να αντικατοπτρίζονται οι στόχοι της μελέτης και οι αξίες των ενδιαφερομένων. Δεδομένου ότι το βήμα στάθμισης δεν έχει καθαρά επιστημονικό χαρακτήρα, είναι σημαντικό να παρέχονται σαφείς εξηγήσεις και να τεκμηριώνεται αυτή η μεθοδολογία ανάλογα.

$$\text{Σταθμισμένος δείκτης} = \text{Δείκτης} \times \text{Συντελεστής στάθμισης}$$

Συνάθροιση: Αυτό το βήμα στοχεύει στη μείωση του αριθμού των περιβαλλοντικών δεικτών που αποτελούν τη βάση για την ερμηνεία και την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Με τη συγκέντρωση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από το βήμα χαρακτηρισμού, μπορεί να δημιουργηθεί ένας μόνο δείκτης. Η συγκέντρωση αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη όταν χρησιμοποιείται AKZ για σύγκριση πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων ή όταν προσδιορίζεται εάν ένα προϊόν αξίζει οικολογικό σήμα (Keivanpour et al., 2013; Liu, 2013a; Pinheiro Melo et al., 2020).

Έτσι, ο πρωταρχικός στόχος του LCIA είναι να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ των αποτελεσμάτων των αποθεμάτων και των πιο σημαντικών συνεπειών τους. Αυτή η μετάφραση είναι απαραίτητη επειδή η σημασία ορισμένων αποτελεσμάτων απογραφής, όπως η ποσότητα του εκπεμπόμενου SO₂, μπορεί να μην είναι εύκολα κατανοητή από το ευρύ κοινό. Το LCIA διευκολύνει αυτήν την κατανόηση μετατρέποντας τέτοια αποτελέσματα σε πληροφορίες που μεταφέρουν τη δυνατότητα της διαδικασίας να προκαλέσει πιο σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η οξίνιση. Κατά συνέπεια, το LCIA επιτρέπει τη μείωση της ποσότητας των αποτελεσμάτων LCI σε ένα μικρότερο σύνολο κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για παράδειγμα, η LCIA μπορεί να συναθροίσει τις εκπομπές CO₂, μεθανίου και άλλων αερίων του θερμοκηπίου σε μια ενιαία κατηγορία επιπτώσεων, δηλαδή την κλιματική αλλαγή (Scelsi et al., 2011; Timmis et al., 2015).

1.4.1 Μέθοδοι Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Η LCIA σαν στόχο έχει τη δημιουργία δεσμού, μεταξύ ενός συστήματος προϊόντος και των πιθανών περιβαλλοντικών του επιπτώσεων. Οι περιβαλλοντικοί μηχανισμοί μπαίνουν στο παιχνίδι για να χαρακτηρίσουν τη διαδικασία με την οποία τα αποτελέσματα LCI (περιβαλλοντικές παρεμβάσεις) μετατρέπονται σε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Timmis et al., 2015). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δείκτες, συγκεκριμένα δείκτες μέσου ή τελικού σημείου. Οι δείκτες μεσαίου σημείου έχουν μια πιο άμεση σύνδεση με περιβαλλοντικές παρεμβάσεις και μεταφράζουν τα αποτελέσματα LCI σε κατηγορίες επιπτώσεων (π.χ. ακτινοβολία, οξίνιση). Αυτή η προσέγγιση μειώνει την πολυπλοκότητα των μοντέλων και των αποτελεσμάτων, ελαχιστοποιώντας τις υποθέσεις και την υποκειμενικότητα στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας διαδικασίας. Αντίθετα, οι δείκτες τελικού σημείου απεικονίζουν τη ζημιά που προκαλείται από περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην εξάντληση των πόρων, στα οικολογικά συστήματα και στην ανθρώπινη υγεία (π.χ. καρκίνος του δέρματος, αποψίλωση δασών). Είναι ευκολότερο να τα κατανοήσουν οι απλοί άνθρωποι, αλλά εισάγουν περισσότερη υποκειμενικότητα και αβεβαιότητα στην αξιολόγηση (Scelsi et al., 2011).

Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες μέθοδοι εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, χρησιμοποιώντας δείκτες είτε μέσου είτε τελικού σημείου. Η επιλογή της μεθόδου

εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εργασία που διεξάγεται, ιδιαίτερα από τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της LCA.

1.5 Μηχανογράφηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA)

Η μηχανογράφηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) είναι ζωτικής σημασίας λόγω του εκτεταμένου όγκου δεδομένων που απαιτούνται για τον χαρακτηρισμό ενός προϊόντος σε όλα τα στάδια κατασκευής, σέρβις και στο τέλος του κύκλου ζωής του. Η πρόσβαση σε ολοκληρωμένες βάσεις δεδομένων είναι απαραίτητη για την ακριβή μοντελοποίηση του υπό μελέτη συστήματος. Αυτές οι βάσεις δεδομένων πρέπει να περιέχουν αξιόπιστες και διαφανείς πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους υπολογισμούς. Οι περιβαλλοντικές διαδικασίες είναι συχνά πολύπλοκες και ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί εργαλεία λογισμικού για να βοηθήσουν στη δόμηση μοντελοποιημένων σεναρίων, στην οπτικοποίηση των διεργασιών και στην ανάλυση των ληφθέντων αποτελεσμάτων. Ένα ιδανικό λογισμικό ΑΚΖ θα πρέπει να οργανώνει δεδομένα, να ελαχιστοποιεί την προσπάθεια που απαιτείται για την ανάλυση του αποθέματος και την εκτίμηση επιπτώσεων, να παρέχει τεκμηρίωση που επικυρώνει τη μελέτη και να είναι συμβατό με άλλο λογισμικό για να διευκολύνει την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται από τους επαγγελματίες LCA (Lopes, 2010; C. Koroneos et al., 2010; Liu, 2013b).

Κατά τη φάση της απογραφής του κύκλου ζωής, το λογισμικό μπορεί να προσφέρει σημαντική βοήθεια, συχνά με τη μορφή υπολογιστικών φύλλων, τα οποία χρησιμεύουν ως δεδομένα εισόδου, συστήματα υπολογισμού και υποστήριξη ανάλυσης αποτελεσμάτων. Καθορίζοντας τον τύπο και την ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται, ο χρήστης μπορεί να περιγράψει πλήρως μια διαδικασία συστήματος, με όλες τις εισροές και εξόδους υλικών και ενέργειας άμεσα συνδεδεμένες και καθορισμένες. Οι εξωτερικές βάσεις δεδομένων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στο λογισμικό για την αντιμετώπιση ζητημάτων που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα δεδομένων. Αυτές οι βάσεις δεδομένων προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι είναι καλά τεκμηριωμένες και αξιόπιστες (Lopes, 2010; C. Koroneos et al., 2010).

Ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για το LCA Simapro έκδοση 7.2 (αναφέρεται ως Simapro) που αναπτύχθηκε από την ολλανδική εταιρεία «PR Consultants». Το Simapro χρησιμοποιείται ευρέως στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολυάριθμες μελέτες στο Instituto Superior Técnico (IST) και αναφέρεται σε βιβλία καθηγητών IST.

Το Simapro χρησιμεύει ως επαγγελματικό εργαλείο για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Το λογισμικό οργανώνει πληροφορίες μέσω μοντέλων που καλύπτουν διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής και παρέχει διαδικασίες από τη βάση δεδομένων του. Αυτές οι διεργασίες κατηγοριοποιούνται στις κατηγορίες υλικών, ενέργειας, μεταφοράς, επεξεργασίας, χρήσης, σεναρίου αποβλήτων και επεξεργασίας αποβλήτων στην ενότητα Απογραφή της Simapro. Χρησιμοποιώντας αυτό το λογισμικό, ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος μπορεί να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με τους κανονισμούς που καθορίζονται στο ISO 14040. Η Simapro δομεί τον κύκλο ζωής σε τρία διασυνδεδεμένα μέρη: Συναρμολόγηση, η οποία περιλαμβάνει διαδικασίες κατασκευής, διανομής και χρήσης. Σενάριο απόρριψης, το οποίο περιγράφει τη φάση του τέλους ζωής και διαδικασίες όπως αποσυναρμολόγηση, ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση. και Κύκλος Ζωής, που ενσωματώνει τη φάση κατασκευής (Συναρμολόγηση) με την επεξεργασία στο τέλος του κύκλου ζωής (Σενάριο Διάθεσης) (Lopes, 2010; C. Koroneos et al., 2010; Liu, 2013b).

Κεφάλαιο 2: Ανάλυση κύκλου ζωής σε αεροσκάφος: Μελέτη περίπτωσης

2.1 LCA σε αεροσκάφος

Ως απάντηση στις αυξανόμενες ανησυχίες της αεροπορικής βιομηχανίας σχετικά με την περιβαλλοντική απόδοση των αεροσκαφών, η έρευνα για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) έχει εφαρμοστεί και σε αυτόν τον τομέα. Για παράδειγμα, οι Koroneos et al. (2010) διεξήγαγαν μια μελέτη περίπτωσης χρησιμοποιώντας LCA για να εξετάσει την κηροζίνη της αεροπορίας. Αν και η πρωτογενής ρύπανση από κηροζίνη εμφανίζεται κατά το επιχειρησιακό στάδιο του αεροσκάφους μέσω της διαδικασίας καύσης, αυτή η έρευνα επικεντρώθηκε στη διαδικασία διύλισης της κηροζίνης για να εντοπίσει περιοχές προς βελτίωση.

Επιπλέον, μια μελέτη από τους Scelsi et al. (2011) ερευνήσε τα περιβαλλοντικά οφέλη που σχετίζονται με τη χρήση σύνθετων υλικών στην αεροπορία. Οι ερευνητές αποφάσισαν να κάνουν LCA σε δυο ειδών εξαρτήματα ευρέως χρησιμοποιούμενα στην αεροπορική βιομηχανία, ένα πάνελ κ έναν σωλήνα. Αρχικά συνέκριναν πάνελ κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου 2024 και άλλα κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά CFRP (Carbon- fiber reinforced plastic) και GLARE (Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy) και σωλήνα CFRP με αντίστοιχο χαλύβδινο.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παρόλο που τα σύνθετα υλικά απαιτούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας να κατασκευαστούν και η καταστροφή τους είναι δύσκολη τελικά φαίνεται πως η χρήση τους είναι πιο συμφέρουσα για το περιβάλλον, πράγμα το οποίο συμβαίνει, λόγω του χαμού τους βάρους και συνεπώς της σημαντικά μειωμένης χρήσης καυσίμου, λόγω της ιδιότητας αυτής. Πιο συγκεκριμένα έδειξαν ότι για τα πάνελ το κρίσιμο σημείο όπου το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αρχίζει να έχει θετικότερο πρόσημο, είναι για τα CFRP τα 70.000 km, ή τις 93 ώρες πτήσης και για τα GLRE τα 240.000 km και τις 320 ώρες πτήσης (Πίνακας 1). Για τον σωλήνα CFRP που αντικαθιστά τον χαλύβδινο το σημείο αυτό είναι μόλις τα 3.600 km. ή οι 4,8 ώρες πτήσης (Πίνακας 2). Πρόκειται δηλαδή για τα σημεία στα οποία, η αρνητική περιβαλλοντική επίδραση που προσδίδαν, λόγω των αυξημένων ποσών ενέργειας που δαπανήθηκαν για την κατασκευή, και την ανακύκλωσή τους, αρχίζει να ισοσκελίζεται, μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου που επιτυγχάνεται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, λόγω του χαμηλού τους βάρους.

	CFRP		GLARE	
	Distance [km]	Time [hours]	Distance [km]	Time [hours]
Single Score	70 000	93	240 000	320
Fossil Fuel	85 000	113	105 000	140
Climate Change	45 000	60	120 000	160

Πίνακας 1: Σύγκριση πάνελ CFRP και GLARE με αλουμίνιο 2024

Transport scenario	Break-even distance [km]	Break-even time [h]
Air transport	3 600	4.8
Road transport	13 600	170.0
Marine transport	373 000	9325.0

Πίνακας 2: Σύγκριση σωλήνα CFRP με χάλυβα.

Οι Bachman et.al (2017), διεξήγαγαν LCA μελάτη, σχετικά με τα σύνθετα υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά στην αεροπορική βιομηχανία, τα οποία έχουν καινοτόμα και βιώσιμα χαρακτηριστικά. Αν και τα συμβατικά σύνθετα υλικά (FGRP), με τα οποία κατασκευάζονται επί το πλείστο τα μοντέρνα αεροσκάφη, φαίνεται να προσδίδουν μια μείωση στο CO₂ της τάξης του 15-20% μέχρι το 2050, εξακολουθεί να προβληματίζει η χρήση τους λόγω της γνωστής δυσκολίας σχετικά με την ανακύκλωσή και την ενέργεια που απαιτείται στην κατασκευή τους Scelsi et al. (2011). Εξέτασαν λοιπόν βίο-συνθετικά υλικά, όπως μπαμπού, γιούκα, αγαύη κ.α σε συνδυασμό με βίο-συνθετικές ρητίνες. Κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι το τέλος ζωής των υλικών αυτών επιβαρύνει σημαντικά λιγότερο το περιβάλλον, λόγω της απλότητας και της ταχύτητας της διαδικασίας, που μπορεί να είναι είτε υγειονομική ταφή, είτε αποτέφρωση.

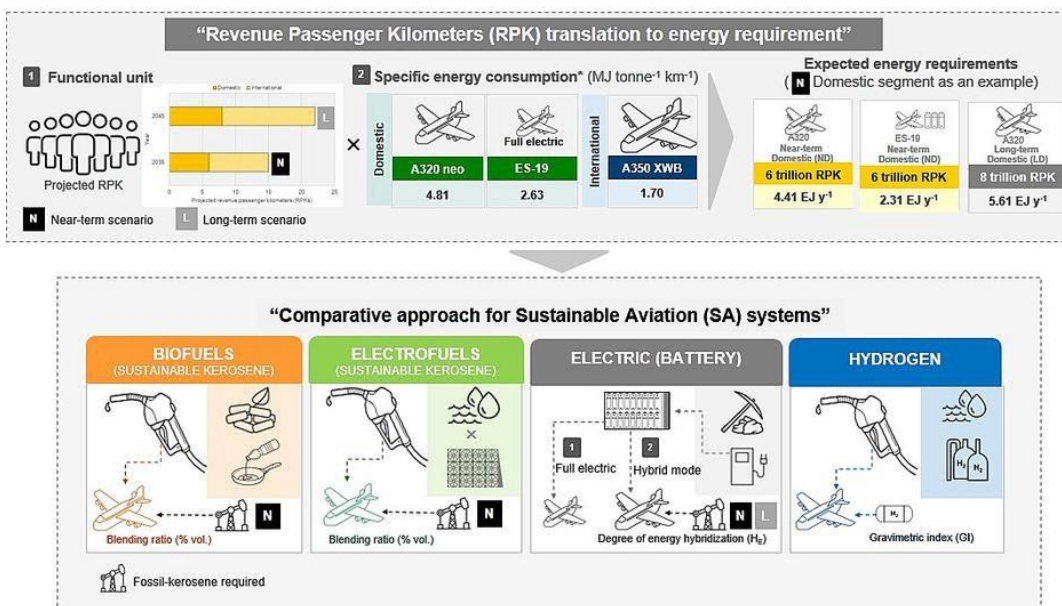
Οι Su-ungkavatin et.al (2023) εργάστηκαν πάνω σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα που αφορά την αξιολόγηση LCA της πολιτικής αεροπορίας. Εξέτασαν την επιρροή τεσσάρων διαφορετικών καινοτόμων αεροπορικών συστημάτων που σταδιακά έρχονται στο προσκήνιο. Πρόκειται για τα βιοκαύσιμα (bio-fuels), τα electro- fuels, τις μπαταρίες και το υδρογόνο. Στην έρευνά τους χρησιμοποίησαν ως δείκτη το RPK (Revenue Passenger Kilometer) κι έκαναν έναν διαχωρισμό κοντινών και μακρινών αποστάσεων, όλα αυτά σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη κλίμακα, με ορόσημο τα έτη 2035 και 2045 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια χώρισαν τη διαδικασία σε επτά φάσεις. Η πρώτη φάση σχετίζεται με τα ορυκτά καύσιμα, η δεύτερη με τη μεταποιητική διαδικασία των πρώτων υλών και η τρίτη

με την ορθή χρήση πόρων που δεν βρίσκονται σε αφθονία. Το τέταρτο στάδιο πρόκειται για την κατασκευή του αεροσκάφους, το πέμπτο είναι η χρήση και λειτουργία του, το έκτο οι υποστηρικτικές δομές που πρέπει να κατασκευαστούν και τέλος η διαχείριση του αεροσκάφους μετά το πέρας της λειτουργίας του.

Κάτι σημαντικό που παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη είναι η έλλειψη συσχέτισης προηγούμενων ερευνών με τα πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO14044:2006.

Η έρευνα τελικά πρότεινε η AKZ να πραγματοποιείται σε ένα πιο ολοκληρωμένο πλαίσιο άρρηκτα συνδεδεμένο με τα πρότυπα ISO που δεν μελετά απλά τις επιπτώσεις, αλλά αξιολογεί το σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλες τις φάσεις ζωής του αεροσκάφους. Η μονάδα μέτρησης των αεροπορικών υπηρεσιών είναι το RPK, έτσι πρότειναν ένα μοντέλο που θα δύναται να συνδέσει τον δείκτη αυτόν με τα ποσά ενέργειας που απαιτείται να δαπανηθούν. (Εικόνα 4)



Εικόνα 4: Σύνδεση του δείκτη RPK με τον όρο Sustainable Aviation (Su-ungkavitan 2023)

Οι Keiser et. al (2023) θέλησαν να κάνουν μια έρευνα εις βάθος με βάση τη γνώση που υπάρχει μέχρι στιγμής. Για να το επιτύχουν αυτό μελέτησαν πάνω από χίλιες αναφορές και εστίασαν σε σαράντα πέντε εξ αυτών.

Σκοπό είχαν πρώτον να ερευνήσουν το κατά πόσο είναι δυνατόν να αξιολογηθεί η εφαρμογή της AKZ στην αεροπορική βιομηχανία και να εξετάσουν την κατάσταση τη δεδομένη στιγμή στη διεξαγωγή της σχετικής έρευνας. Και δεύτερον να αναδείξουν ποιες

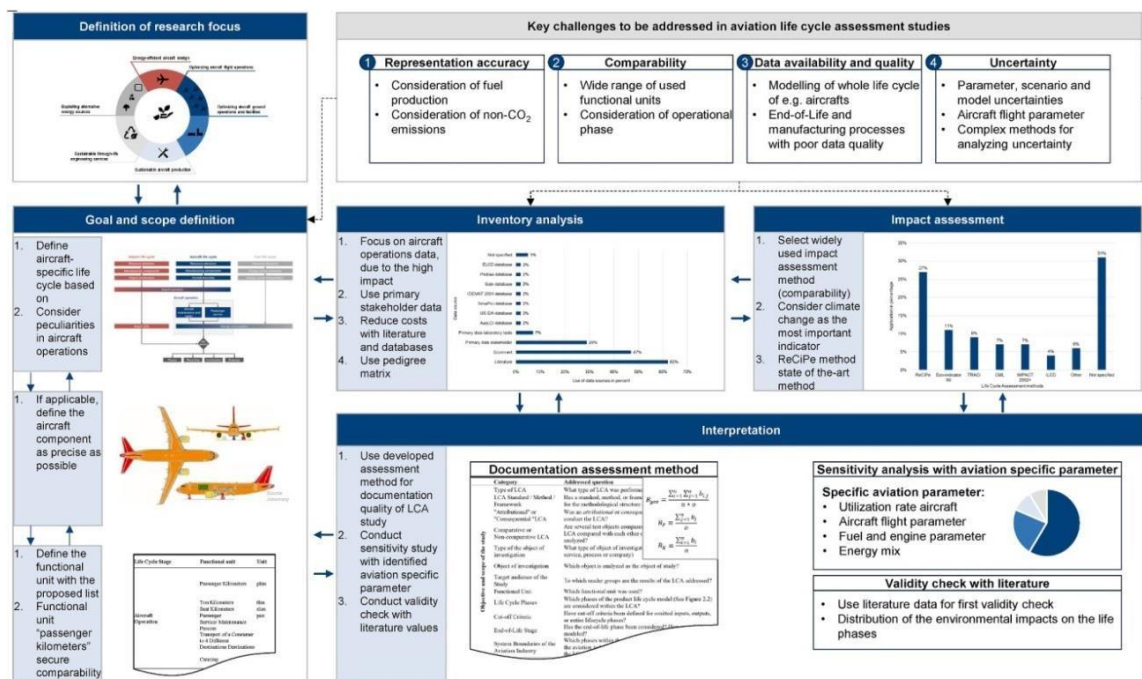
είναι οι προκλήσεις που υπάρχουν τη δεδομένη στιγμή, ώστε να συνεχίσει να εφαρμόζεται η AKZ στην αεροπορική βιομηχανία και μέσω αυτής να υπάρξει πρόοδος στον κλάδο.

Κατένειμαν την υπάρχουσα βιβλιογραφία με βάση, τις περιοχές έρευνας, τα συστήματα αεροσκαφών που μελετιούνται, τις λειτουργικές μονάδες, τα όρια των συστημάτων. Επίσης με τα διαθέσιμα δεδομένα, τις μεθόδους για εκτίμηση των επιπτώσεων αλλά και τα λογισμικά που έχουμε στη διάθεσή μας. Τους περιβαλλοντικούς δείκτες, όπως κλιματική αλλαγή, αιθαλομίχλη κλπ. και τέλος την αξιολόγηση των μεθόδων τεκμηρίωσης.

Μελέτησαν επίσης το διαθέσιμα δεδομένα, ως προς την ακρίβεια αναπαράστασης, τη συγκρισιμότητα, την ποιότητα των δεδομένων και τέλος ως προς την αβεβαιότητα.

Τα αποτελέσματα της μελέτης τους έδειξαν ότι θα χρειαστεί μεγαλύτερη συνεισφορά δεδομένων από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς, μια και παρατηρήθηκε έλλειψη πληροφοριών και επίσης διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν έρευνες που μελετούν το αεροσκάφος τμηματικά και δεν το αντιμετωπίζουν ως ένα σύνολο. Επιπλέον αναδείχτηκε η ανάγκη να αναπτυχθούν νέα μοντέλα διεργασιών ώστε να αντιμετωπιστεί η πολυπλοκότητα της αεροπορικής βιομηχανίας.

Τελικά πρότειναν ένα νέο πλαίσιο για τη διενέργεια μελετών AKZ που αφορά την αεροπορική βιομηχανία, με στόχο την ανάπτυξη βέλτιστων πρακτικών που θα ωφελήσει γενικότερα τον κλάδο. Η δομή του πλαισίου αυτού προτείνεται να ακολουθεί το ISO 14044 και η μελέτη AKZ να γίνεται σε τέσσερα στάδια (Εικόνα 5). Δηλαδή, αρχικά ξεκινάμε με τον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, καθώς και τον ορισμό εστίασης της έρευνας. Στη συνέχεια συνεχίζουμε με την ανάλυση του αποθέματος, μετέπειτα την εκτίμηση των επιπτώσεων και τελικά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5: Πλαίσιο AKZ στην αεροπορική βιομηχανία Keiser et. Al (2023)

2.2 Μελέτη περίπτωσης: Μοντελοποίηση του κύκλου ζωής του αεροσκάφους Airbus A330 και A319

Θα επικεντρωθούμε στη μοντελοποίηση του κύκλου ζωής του αεροσκάφους Airbus A330-200 και Airbus A319.

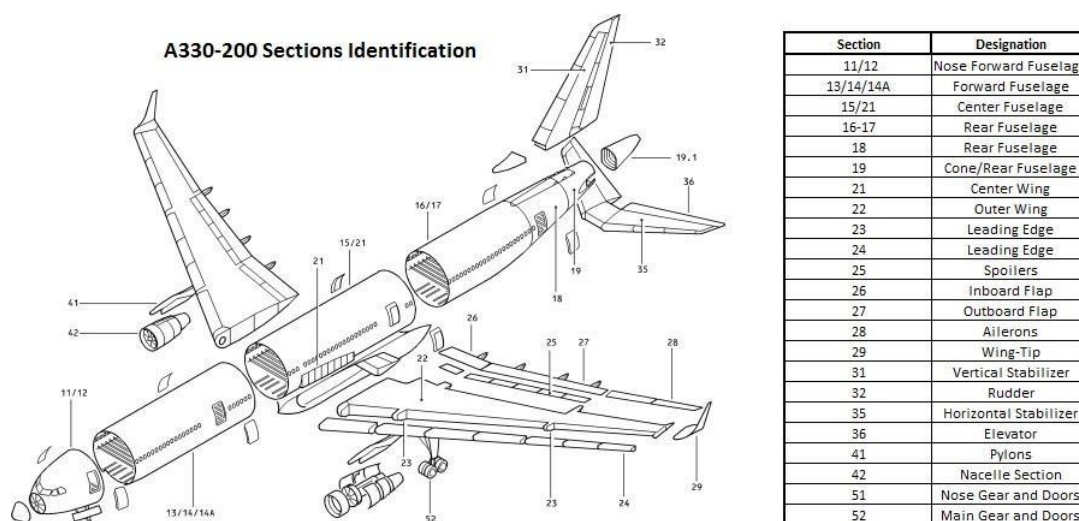
Το Airbus A330 είναι ένα εμπορικό επιβατικό αεροσκάφος που κατασκευάζεται από την Airbus, σχεδιασμένο για πτήσεις μεσαίου έως μεγάλου βεληνεκούς. Διαθέτει μεγάλη χωρητικότητα και είναι εξοπλισμένο με δύο κινητήρες. Παρουσιάστηκε το 1995, το Airbus A330-200 και μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί πολλές νέες εκδόσεις, σχετίζεται στενά με το A340-200 και είναι η μικρότερη έκδοση του A330-300. Χρησιμοποιεί την άτρακτο του A340-200 και ενσωματώνει τα φτερά και τους κινητήρες του A330-300 (de Oliveira, 2010; Liu, 2013b).

Το Airbus A330-200 μπορεί να εξοπλιστεί με τρεις διαφορετικούς κινητήρες: τον General Electric (GE) CF6-80E1, τον Rolls-Royce Trent 700 και τον Pratt&Whitney PW4000. Για τη συγκεκριμένη μελέτη, επιλέχθηκαν οι κινητήρες General Electric CF6-80E1 λόγω της χρήσης τους στα αεροσκάφη A330-200.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα βασικά δεδομένα για το αεροσκάφος A330-200 και η Εικόνα 6 απεικονίζει την αναγνώριση των εξαρτημάτων και των τμημάτων του, παρέχοντας μια κύρια διάταξη δομής.

A330-200 Κύρια χαρακτηριστικά	
Μέγιστο εύρος	13430km
MTOW (Kg)	230000
Κενό βάρος κατασκευαστή - MEW (kg)	108206
Κενό βάρος λειτουργίας (σε κιλά)	124359
Τυπική διάταξη ενιαίας τάξης	303 Καθίσματα
Μέγιστη ταχύτητα	Mach 0,86
Κινητήρες (×2)	General Electric CF6-80E1

Πίνακας 3: Κύρια χαρακτηριστικά του Airbus A330-200



Εικόνα 6: Αναγνώριση των κύριων εξαρτημάτων του Airbus A330-200.

Το αεροσκάφος A319 είναι μια συμπυκνωμένη έκδοση του Airbus A320, το οποίο είναι ένα εξέχον αεροπλάνο μονού διαδρόμου (Airbus, 2013b). Μοιράζεται την ίδια βελτιστοποιημένη διατομή καμπίνας με άλλα μέλη της οικογένειας A320, που φημίζονται για την ευρύτερη άτρακτο μονού διαδρόμου που διατίθεται στην αγορά (Airbus, 2013b). Μέχρι τις 31 Αυγούστου 2013, υπήρξαν 1528 παραγγελίες και 1378 παραδόσεις του A319, με 1372 αεροσκάφη να εξακολουθούν να λειτουργούν ενεργά (Airbus, 2013b). Επιπλέον, το Airbus A330-200 μπορεί να εξοπλιστεί με δύο διαφορετικούς κινητήρες: τον CFM International CFM56-5B και τον IAE International Aero Engines V2500-A5

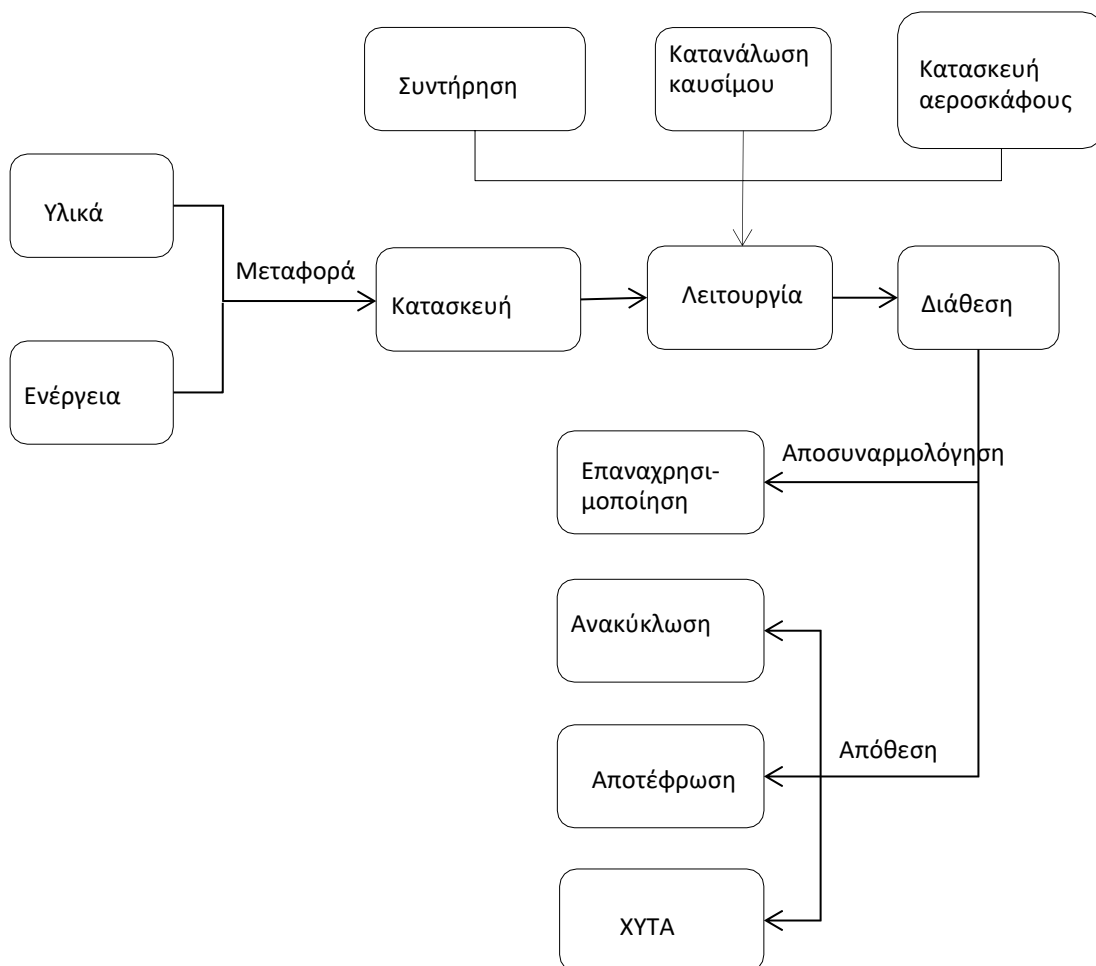
(Airbus, 2013b). Για αυτό την εργασία αυτή, επιλέχθηκαν οι κινητήρες CFM International μοντέλου CFM56-5B. Βασικές διαστάσεις, χωρητικότητα και στοιχεία απόδοσης για το A319 βρίσκονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Βασικά στοιχεία του A319 (Airbus, 2013)

Διαστάσεις	
Ολικό μήκος	33.84m
Μήκος καμπίνας	23.78m
Πλάτος ατράκτου	3.95m
Μέγιστο πλάτος καμπίνας	3.70m
Άνοιγμα φτερών (γεωμετρικό)	34.10m
Ύψος	11.76m
Μεταξόνιο	11.04m
Χωρητικότητα	
Τυπικά καθίσματα	124(2-class)
Μέγιστος αριθμός θέσεων	156
Εκτέλεση	
Εύρος	6850km
Μέγιστο βάρος ράμπας	64.4tonnes
Μέγιστο βάρος απογείωσης	64.0tonnes
Μέγιστο βάρος προσγείωσης	61tonnes
Μέγιστο μηδενικό βάρος καυσίμου	57.0tonnes
Μέγιστη χωρητικότητα καυσίμου	24,210litres

2.2.1 Ανάλυση Αποθέματος Κύκλου Ζωής

Η ανάλυση του Αποθέματος Κύκλου Ζωής (LCI) περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων και την εφαρμογή διαδικασιών υπολογισμού για την ποσοτικοποίηση των σχετικών εισροών και εκροών του συστήματος προϊόντων (British Standards, 2006). Αυτή η ανάλυση θα παρουσιαστεί για κάθε στάδιο που εμπλέκεται στον κύκλο ζωής των αεροσκαφών Airbus A330-200 και Airbus A319. Έχουν συγκεντρωθεί δεδομένα σχετικά με τα υλικά και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα στάδια για τη δημιουργία μιας λίστας αποθεμάτων και την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου του προϊόντος. Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας απεικονίζεται στην Εικόνα 7.



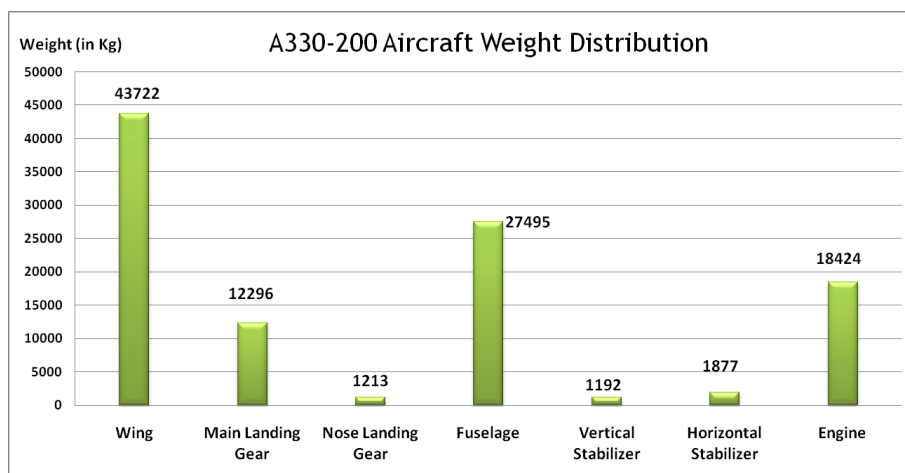
Εικόνα 7: Διάγραμμα ροής διαδικασίας των αεροσκαφών A319 και A330

2.2.2 Στάδιο Παραγωγής

Ο στόχος του σταδίου κατασκευής είναι η κατασκευή της συναρμολόγησης εντός του μοντέλου προϊόντος. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να συγκεντρωθούν πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση του αεροσκάφους. Αυτό περιλαμβάνει τη λήψη λεπτομερειών σχετικά με τα υλικά και τα βάρη των εξαρτημάτων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία συνδέσεων μεταξύ των διεργασιών και της συναρμολόγησης. Επιπλέον, πρέπει να συλλέγονται δεδομένα σχετικά με τα προϊόντα εισροών και εκροών και τις εκπομπές που σχετίζονται με αυτά τα υλικά και τις διαδικασίες παραγωγής για να δημιουργηθούν ακριβείς αναπαραστάσεις των διαδικασιών.

2.2.2.1 Εξαρτήματα, υλικά και βάρη των αεροσκαφών

Το αεροσκάφος A319 μπορεί να χωριστεί σε έξι κύρια δομικά στοιχεία: την άτρακτο, τις πτέρυγες, τους οριζόντιους σταθεροποιητές και τον κάθετο, τα συστήματα προσγείωσης και τους κινητήρες (Airbus, 2002b; Airbus, 2012). Κάθε ένα από αυτά τα εξαρτήματα αποτελείται από πολλά δευτερεύοντα εξαρτήματα και υποσυστήματα. Υπάρχουν συνολικά 25 δευτερεύοντα εξαρτήματα και 107 υποσυστήματα στο A319 (Airbus, 2002b, 2002a). Η Εικόνα 6 απεικονίζει τα κύρια εξαρτήματα και τα υποσυστήματα του A319. Τα περισσότερα από τα δεδομένα βάρους και υλικού προέρχονται από το Εγχειρίδιο Βάρους και Ισορροπίας A320 (Airbus, 2002) και προηγούμενη έρευνα (Howe, 2011).



Εικόνα 8: Γενική Κατανομή Βάρους σε A330-200

Αν και αυτές οι αναφορές αφορούν το A320, το βάρος του A319 μπορεί να υπολογιστεί με βάση την αναλογία του μήκους της ατράκτου. Αυτό συμβαίνει επειδή, σύμφωνα με τις διαστάσεις που παρέχονται από την Airbus στον επίσημο ισότοπο της (Airbus, 2013a), η κύρια διαφορά μεταξύ του A320 και του A319 έγκειται στο μήκος της ατράκτου (Πίνακας 5).

Πίνακας 5 : Γενική σύνθεση βάρους του αεροσκάφους AirbusA330-200, ανά εξαρτήματα αεροσκάφους.

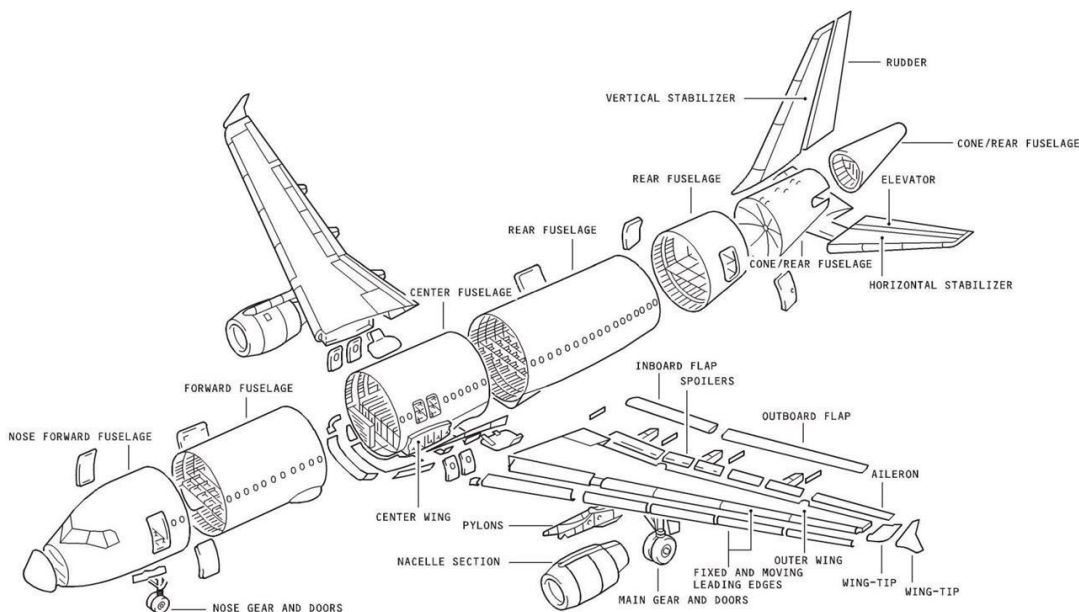
Δομικό Μέρος	Βάρος (Kg)
Πτέρυγες	43722
Κεντρικό σύστημα προσγείωσης	12296
Ρηναίο σύστημα προσγείωσης	1213
Άτρακτος	27495
Κάθετος σταθεροποιητής	1192
Οριζόντιοι σταθεροποιητές	1877
Κινητήρες	18424
ΣΥΝΟΛΟ	106218

Η συνολική μάζα της δομής και των κινητήρων του αεροσκάφους A320 είναι 39.181 τόνοι, με την άτρακτο να ζυγίζει 11.755 τόνους (Howe, 2011).

Η λεπτομερής ανάλυση των υλικών και της κατανομής βάρους για το A330-200 περιλαμβάνει μια σαφή περιγραφή των εξαρτημάτων του αεροσκάφους ως προς το βάρος και τα υλικά τους. Λόγω της μη διαθεσιμότητας δεδομένων ειδικού βάρους για εξαρτήματα αεροσκάφους από δημόσια βιβλιογραφία ή πηγές του Διαδικτύου, τα δεδομένα προέρχονται από τεχνικά εγχειρίδια ειδικά για το A330-200, περιλάμβαναν το Εγχειρίδιο Βάρους και Ισορροπίας (Airbus, 2008b) και το Εγχειρίδιο Ανάκτησης Αεροσκαφών (Airbus, 2005).

Αφού συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα βάρους, προσδιορίστηκε μια γενική κατανομή βάρους και παρουσιάστηκε στον Πίνακα 4, με αντίστοιχη απεικόνιση στην Εικόνα 9. Στο Εγχειρίδιο Βάρους και Ισορροπίας, η Airbus διεξήγαγε μια αναφορά στάθμισης αεροσκάφους που είχε ως αποτέλεσμα μια μέτρηση κενού βάρους κατασκευαστή (MEW) 1 108.206 kg για το A330-200. Η τελική τιμή που λήφθηκε σε αυτή τη μελέτη είναι 106.218 kg, που αντιπροσωπεύει πάνω από το 98% του MEW που υπολογίστηκε από την Airbus, υποδηλώνοντας μια αρκετά κοντινή προσέγγιση. Η διαφορά μεταξύ των τιμών βάρους του αεροσκάφους μπορεί να αποδοθεί στον

αποκλεισμό στοιχείων όπως ηλεκτρονικά, όργανα πλοήγησης και υγρά κλειστού συστήματος (π.χ. υδραυλικά υγρά).



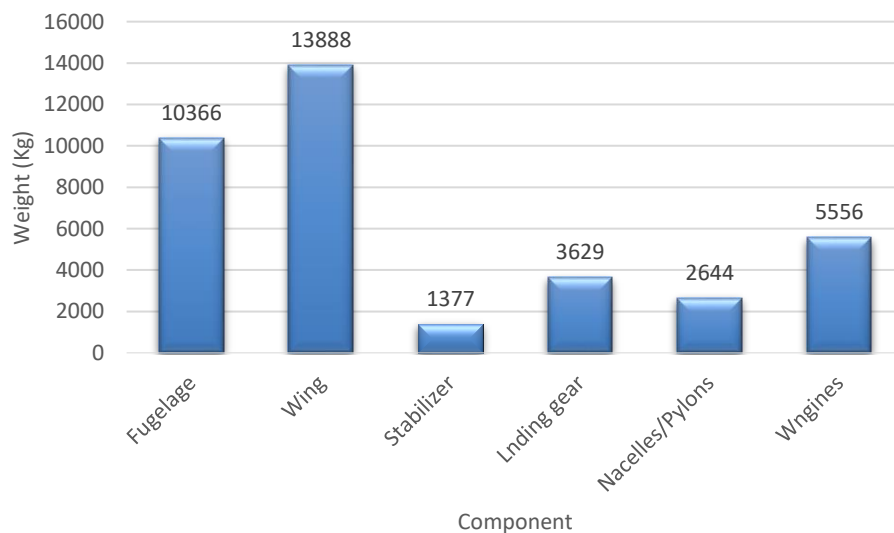
Εικόνα 9: Κύρια εξαρτήματα του A319 (Airbus, 2002)

Πίνακας 6: Διαστάσεις A319 (Airbus, 2013)

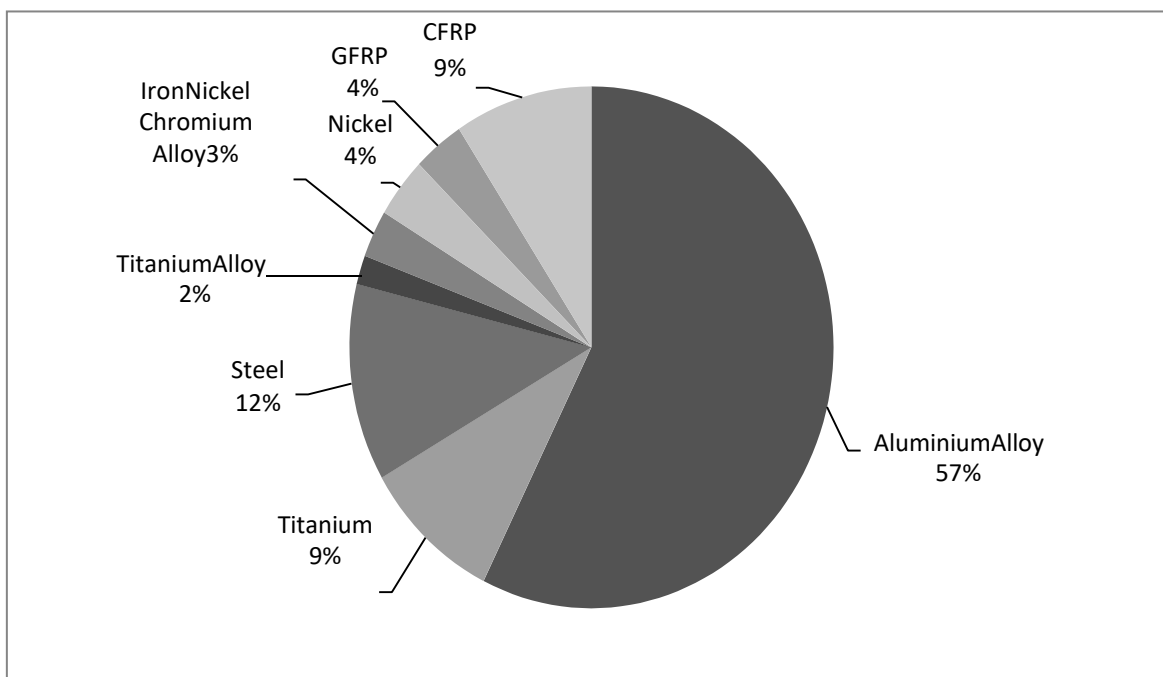
Διαστάσεις A319	
Συνολικό μήκος	33.84m
Πλάτος ατράκτου	3.95m
Μέγιστο πλάτος καμπίνας	3.70m
Άνοιγμα φτερών (γεωμετρικό)	34.10m
Ύψος	11.76m
Πίστα (απόσταση μεταξύ τροχών)	7.59m

Στη συνέχεια, το συνολικό βάρος των αεροσκαφών A319 και A330 κατανεμήθηκε στα εξαρτήματά τους, τα δευτερεύοντα εξαρτήματα και τα υποσυστήματα με βάση

πληροφορίες από το Εγχειρίδιο Βάρους και Ισορροπίας A320 (Airbus, 2002c) και προηγούμενη έρευνα που διεξήχθη από τον Howe (2011). Λόγω της εξαιρετικά ευαίσθητης φύσης των λεπτομερών πληροφοριών στον κλάδο των αερομεταφορών, τα πλήρη δεδομένα βάρους και υλικού για κάθε υπό-συγκρότημα του αεροσκάφους δεν είναι πάντα άμεσα διαθέσιμα, με αποτέλεσμα περίπου το 30% των δεδομένων να απαιτούν εκτίμηση. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα εκτιμώμενα δεδομένα, αν και λιγότερο ακριβή, δεν αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA), καθώς ακριβείς πληροφορίες βάρους και υλικού είναι διαθέσιμες για τα περισσότερα εξαρτήματα, σημαντικά υποσυστήματα και σύνθετα μέρη. Η κατανομή βάρους των βασικών εξαρτημάτων του A319 παρουσιάζεται στην Εικόνα 10, ενώ η Εικόνα 11 απεικονίζει τα βάρη των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται στο αεροσκάφος και τα αντίστοιχα ποσοστά τους στο συνολικό βάρος.



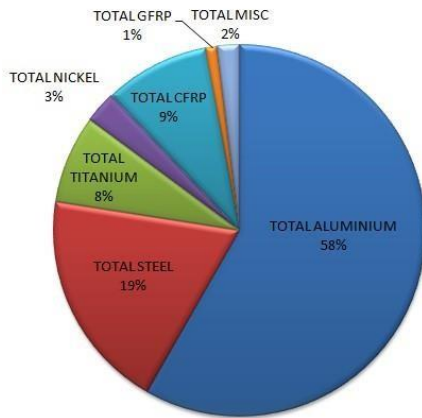
Εικόνα 10: Βάρος βασικών εξαρτημάτων A319



Εικόνα 11: Βάρος υλικού και ποσοστό A319

Η κατανομή των επιμέρους υλικών του αεροσκάφους A330-200 απεικονίζεται στην Εικόνα 12, με βάση το συνολικό βάρος του A330-200 αεροσκάφους που υπολογίστηκε (106.218 kg). Το σχήμα αποκαλύπτει ότι το αλουμίνιο είναι το κυρίαρχο υλικό, που αντιπροσωπεύει το 58% του συνολικού βάρους, ακολουθούμενο από τον χάλυβα (19%), ενώ τα σύνθετα υλικά συμβάλλουν περίπου στο 11% του συνολικού βάρους του αεροσκάφους. Μεταξύ των σύνθετων υλικών, το πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα είναι το πιο εκτεταμένο χρησιμοποιούμενο, το οποίο ευθυγραμμίζεται με την επικρατούσα τάση που παρατηρείται στα πρόσφατα αεροσκάφη Airbus (Saksorn et al., 2006).

Material Breakdown of the A330-200 Aircraft



Materials in A330-200	Weight (in Kg)	Weight contribution (in %)
Aluminium	61903	58,3
Steel	20388	19,2
Titanium	8161	7,7
Nickel	2948	2,8
CFRP	9743	9,2
GFRP	1059	1,0
Miscellaneous	2015	1,9
TOTAL	106218	100

Εικόνα 12: Γενική ανάλυση υλικού του αεροσκάφους A330-200, συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών προσγείωσης

2.2.3 Στάδιο λειτουργίας απόρριψης

Το στάδιο λειτουργίας της ανάλυσης περιλαμβάνει τρεις κύριες πτυχές: κατανάλωση καυσίμου στη φάση λειτουργίας του αεροσκάφους, κατασκευή αεροδρομίου και συντήρηση αεροδρομίου. Οι εργασίες υπολογισμού επικεντρώνονται κυρίως στην κατανάλωση καυσίμου, καθώς οι διαδικασίες που σχετίζονται με την κατασκευή και τη συντήρηση του αεροδρομίου περιλαμβάνονται ήδη στις υπάρχουσες βιβλιοθήκες.

Ο υπολογισμός της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου περιλαμβάνει δύο βήματα: τον προσδιορισμό του ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου για κάθε αεροσκάφος και τον πολλαπλασιασμό του με τον συνολικό αριθμό επιβατών και την απόσταση ταξιδιού σε όλη τη διάρκεια ζωής τους. Ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου ορίζεται ως η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται ανά επιβάτη ανά χιλιόμετρο. Η εξίσωση αυτού του παράγοντα παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\text{Κατανάλωση καυσίμου ανά επιβάτη (kg/km/επιβάτη)} = \frac{\text{Καύσιμο που καταναλώνεται στη μέση απόσταση πτήσης (kg)}}{\text{Αριθμός επιβατών} \times \text{Μέση απόσταση πτήσης (χλμ)}}$$

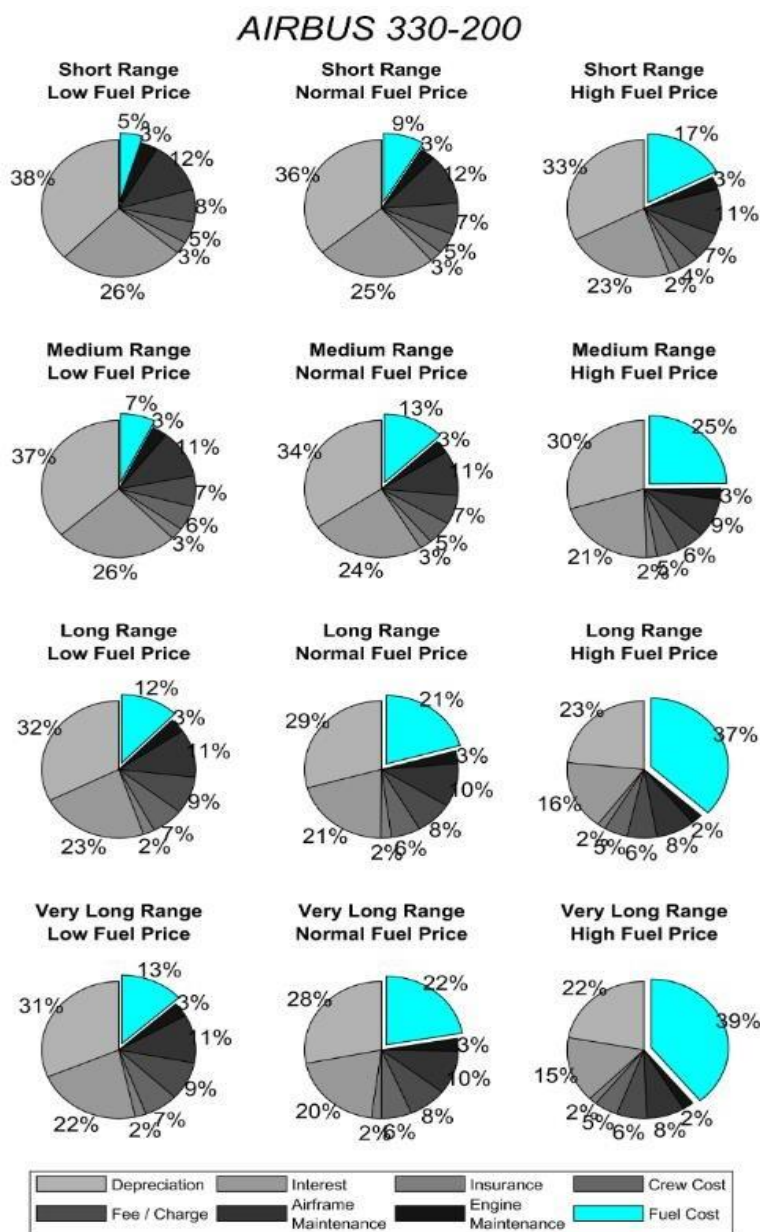
Οι ρυθμοί κατανάλωσης καυσίμου για τα A319 και A330 προέρχονται από την ανάλυση που βρίσκεται στον Οδηγό Ιδιοκτητών & Χειριστή αεροσκαφών: οικογένεια A320/737NG (Aircraft commerce, 2010).

Lee et.al(2019) έκαναν μελέτη για το κόστος λειτουργίας (καύσιμο, απαξίωση και λοιπά κόστη) σε αεροσκάφη μεγάλης ατράκτου, που συνήθως εκτελούν υπερατλαντικές πτήσεις, Διπλωματική Εργασία

μεταξύ των αεροσκαφών που μελέτησαν ήταν και το A330-200 (Εικόνα 13). Παρατηρούμε λοιπόν, ότι τα μεγαλύτερα κόστη, είναι το κόστος καυσίμου και το κόστος που επέρχεται από την απαξίωση του αεροσκάφους. Βλέπουμε λοιπόν ότι η απαξίωση μειώνεται αισθητά σε χρήση του αεροσκάφους σε μεγάλες και πολύ μεγάλες αποστάσεις και ειδικά όταν έχουμε υψηλές τιμές καυσίμου. Παράλληλα παρατηρούμε, ότι το κόστος λειτουργίας λόγω του καυσίμου, φαίνεται να σταθεροποιείται στις πτήσεις μεγάλων και πολύ μεγάλων αποστάσεων. Τα υπόλοιπα κόστη, όπως, συντήρηση, κόστος προσωπικού, φόροι κλπ., παραμένουν σταθερά για μικρές ή μεγάλες πτήσεις. Όλα αυτά μας οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι το αεροσκάφος αυτό είναι πιο συμφέρον να χρησιμοποιείται σε πτήσεις μεγάλων και πολύ μεγάλων αποστάσεων (Εικόνα 13).

Το στάδιο απόρριψης είναι μια κρίσιμη φάση σε μια μελέτη AKZ, και στοχεύει στο να αξιολογήσει τις τυχόν περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προέρχονται από τη χρήση του προϊόντος. Για να αναλυθούν τα σενάρια απόρριψης των αεροσκαφών, πρέπει να γίνει κατανοητή η δομή τους. Η κατασκευή ενός σεναρίου διάθεσης περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: ορισμό επεξεργασίας αποβλήτων, δημιουργία σεναρίων απορριμμάτων και δημιουργία σεναρίων διάθεσης. Ωστόσο, δεν είναι όλα αυτά τα βήματα υποχρεωτικά. η συμπερίληψή τους εξαρτάται από τη συγκεκριμένη μέθοδο απόρριψης του προϊόντος. Η βασική διαφορά έγκειται στην εστίαση: το σενάριο απόρριψης περιστρέφεται γύρω από το προϊόν και διατηρεί πληροφορίες σχετικά με τη συναρμολόγησή του, περιλαμβάνοντας έτσι λειτουργίες αποσυναρμολόγησης και πολλαπλής επαναχρησιμοποίησης. Από την άλλη πλευρά, το σενάριο των αποβλήτων επικεντρώνεται στα υλικά «χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του προϊόντος», περιγράφοντας τη ροή των αποβλήτων σε διάφορες επεξεργασίες, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών για τις εκπομπές.

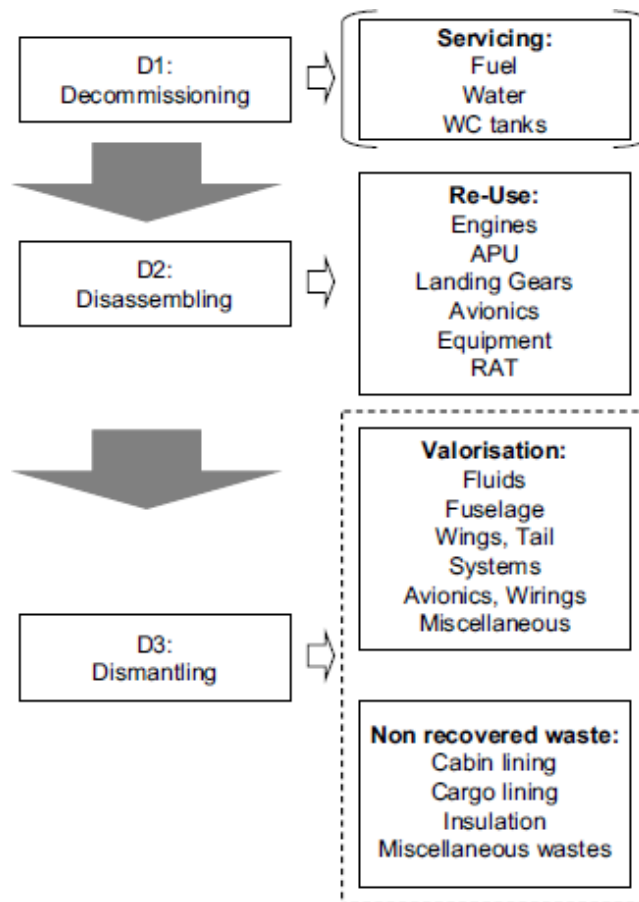
Για τη μοντελοποίηση του σεναρίου απόρριψης αποσυρθέντων αεροσκαφών, πρέπει να συλλεχθούν και να διευκρινιστούν τρεις πληροφορίες: οι διαδικασίες χειρισμού αεροσκαφών στο τέλος του κύκλου ζωής τους, δεδομένα σχετικά με τη θέση των απορριπτόμενων εξαρτημάτων και υλικών και οι εισροές και οι εκροές κάθε επεξεργασίας αποβλήτων.



Εικόνα 13 A330-200 Κόστος λειτουργίας Lee et.al(2019)

2.2.4 Τέλος ζωής του αεροσκάφους

Τα δεδομένα για αυτό το στάδιο προέρχονται κυρίως από το Process for Advanced Management of End-of-Life of Aircraft (PEMELA) και από σχετική βιβλιογραφία (Airbus, 2008a). Ο αυξανόμενος αριθμός των αποσυρθέντων αεροσκαφών έχει καταστήσει την επεξεργασία των αεροσκαφών στο τέλος του κύκλου ζωής τους μια σημαντική ανησυχία, επειδή επί του παρόντος δεν φαίνεται να υπάρχει αποτελεσματική και φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία διάθεσης των αεροσκαφών. Συνήθως, τα εκτός υπηρεσίας αεροσκάφη εγκαταλείπονται και αποθηκεύονται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Ως απάντηση σε αυτήν την κατάσταση, η Airbus ερευνά ενεργά τρόπους βελτίωσης της οικολογικής απόδοσης των αεροσκαφών. Το έργο PEMELA, που ξεκίνησε από την Airbus, στοχεύει να προτείνει μια βιώσιμη διαδικασία διάθεσης αεροσκαφών που μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κάποιο βαθμό (Airbus, 2012). Τα αποτελέσματα του έργου PEMELA μπορεί επίσης να προτείνουν ένα πιθανό ποσοστό ανακύκλωσης υλικών και να τυποποιήσουν τη χρήση μεταχειρισμένων υλικών (Feldhusen et al., 2011). Το επίπεδο αναφοράς για το έργο PEMELA είναι το αεροσκάφος A300 και η αποδόμησή του περιλαμβάνει τρία στάδια: παροπλισμό, αποσυναρμολόγηση και διάλυση (Howe, 2011) (Εικόνα 14).



Εικόνα 14: Στάδια Αποσυναρμολόγησης του αεροσκάφους (Feldhusenetal., 2011)

Στο στάδιο του παροπλισμού, το αεροσκάφος σταθμεύεται, απολυμαίνεται και καθαρίζεται. Οι δεξαμενές νερού και καυσίμου αδειάζονται και τα αντίστοιχα υγρά απορρίπτονται σωστά ή αποθηκεύονται για επαναχρησιμοποίηση στην περίπτωση καυσίμου (Feldhusenetal., 2011).

Στο στάδιο της αποσυναρμολόγησης, αποσυναρμολογούνται από το αεροσκάφος οι Κινητήρες, η APU (βοηθητική μονάδα ισχύος), τα αεροηλεκτρονικά συστήματα, ο RAT (αεροστρόβιλος), τα όργανα προσγείωσης, ο εξοπλισμός καμπίνας και ορισμένα άλλα βοηθητικά εξαρτήματα. Μετά από επιθεώρηση και καθαρισμό, ορισμένα από αυτά τα εξαρτήματα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς, ενώ τα εξαρτήματα που δεν μπορούν να επεξεργαστούν εκ νέου καταστρέφονται. (Feldhusenetal., 2011).

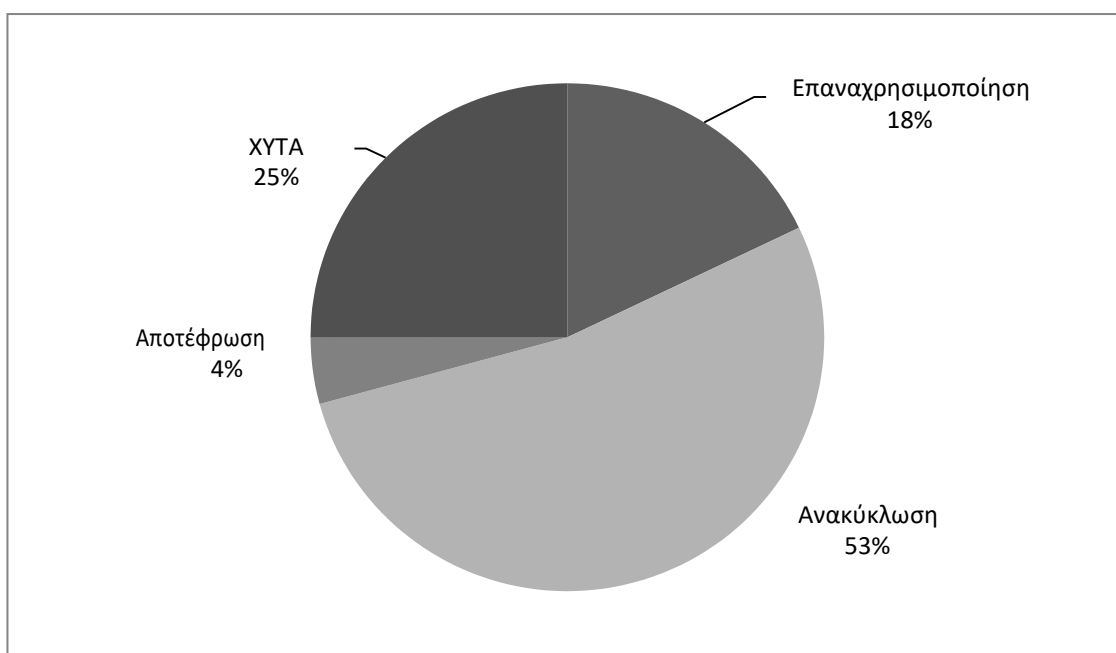
Τέλος, στο στάδιο της διάλυσης, «όλα τα χρησιμοποιημένα υλικά θα πρέπει να διαχωριστούν και να προβλεφθούν για τα ανάλογα κανάλια ανακύκλωσης» (Feldhusen et al., 2011). Η έρευνα LCA των A319 και A330 στην παρούσα εργασία έχει εξετάσει ως επί

το πλείστο τις επεξεργασίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των αεροσκαφών, στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Ως εκ τούτου, εκείνα τα εξαρτήματα που επαναχρησιμοποιούνται ή καταστρέφονται ενσωματωμένα θα ληφθούν επίσης υπόψη στο επίπεδο του υλικού. Και οι πιθανές επεξεργασίες αποβλήτων αυτής της μελέτης είναι: επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, υγειονομική ταφή και αποτέφρωση. Σύμφωνα με το αποτέλεσμα του έργου PEMELA και προηγούμενων μελετών, το σενάριο διάθεσης ανά υλικό μπορεί να εκτιμηθεί όπως φαίνεται στον Πίνακα 7 (Airbus, 2008a; Feldhusen et al., 2011). Οι κινητήρες και τα όργανα προσγείωσης υποτίθεται ότι έχουν ποσοστό επαναχρησιμοποίησης 75% και 80%. Το ποσοστό ανακύκλωσης του σύνθετου υλικού θεωρείται ότι είναι 50. Η αναλογία κάθε σεναρίου διάθεσης φαίνεται στην Εικόνα 15.

Πίνακας 7 Σενάριο διάθεσης ανά υλικό για το A319

Στοιχείο	Υλικό	Βάρος(kg)	Σενάριο διάθεσης (%)			
			Επαναχρησ ιμοποίηση	Ανακύ κλωση	Αποτέφρ ωση	ΧΥΤΑ
Άτρακτος	Αλουμίνιο	89 25		85		15
	Κράμα τιτανίου	15 0			50	50
	Ατσάλι	10 0		85		15
	GFRP	10 46		50	25	25
	CFRP	14 5		50	25	25
Πτέρυγες	Αλουμίνιο	11244		70		30
	Κράμα τιτανίου	13 40		50		50
	Ατσάλι	40 0		75		25
	GFRP	90 4		50	25	25
Σταθεροπο ιητής	Αλουμίνιο	86		64		36
	GFRP	12 9		50	25	25
	CFRP	11 62		50	25	25
	Aluminium Alloy	1000	75			25

Μηχανή	Τιτάνιο	1656	75			25
	Ατσάλι	400	75			25
	Κράμα σιδήρου- νικελίου- χρωμίου-	1100	75			25
	Νικέλιο	1400	75			25



Εικόνα 15: Αναλογία κάθε σεναρίου διάθεσης για το A319

2.3 Μοντέλο κύκλου ζωής για το A319

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μια διεξοδική μελέτη αξιολόγησης του κύκλου ζωής για το αεροσκάφος Airbus a319 από την παραγωγή έως το τέλος της ζωής του. Διερευνήθηκαν όλα τα στάδια, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής, της συναρμολόγησης, της χρήσης (πτήσεις), της επεξεργασίας απορριμμάτων και της διάθεσης των υπολοίπων αποβλήτων στη μελέτη αυτή.

Ο σκοπός της έρευνας, ήταν να προβλεφθούν οι εκπομπές στον αέρα, το νερό και το έδαφος, για κάθε μονάδα αεροσκάφους που παράγεται για έναν πλήρη κύκλο ζωής και να εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

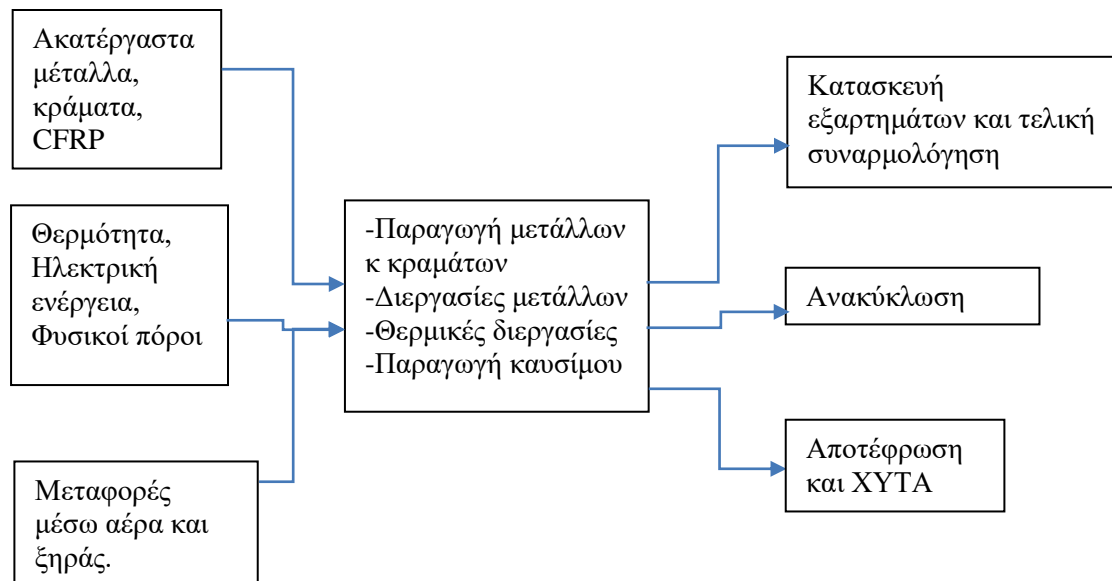
Για την διεξαγωγή της έρευνας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SimaPro. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα αυτό, είναι ότι αποτελεί ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις μελέτες LCA, γιατί ακολουθεί τις αρχές του ISO 14040/44. Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα περιγραφής του κάθε έργου, αναφέροντας κάθε φορά τις διαφορετικές διεργασίες που είναι απαραίτητες για κάθε μελέτη, για τον καλύτερο ορισμό του στόχου. Παράλληλα μέσω της επιλογής χρήσης των υπάρχουσών βάσεων δεδομένων μπορεί να γίνει η έρευνα πιο στοχευμένη, όσον αφορά τον χώρο διεξαγωγής. (Goedkoop et al 2016).

Στην περίπτωση μας, το βάρος κάθε μονάδας είναι 38.000 kg κατά τη φάση λειτουργίας του, συμπεριλαμβανομένης της απογείωσης της, πτήσης και της προσγείωσης. Στον πίνακα 8 φαίνονται και τα βάρη ανά δομικό κομμάτι του αεροσκάφους και ανά υλικό κατασκευής (Airbus 2002c). Τα δεδομένα για τη χρήση του καυσίμου του a319, είναι για μια πτήση 1485km (Koroneos 2010, Howe 2013)

Η LCA του A319, είναι κατά κύριο λόγο μια διαδικασία που περιλαμβάνει τις διαδικασίες παραγωγής των μεταλλικών μερών (κραμάτων αλουμινίου κλπ), τις διεργασίες παραγωγής των σύνθετων υλικών (CFRP) και την επεξεργασία και διάθεση των απορριμμάτων. Περιλαμβάνει επίσης όλες τις απαιτούμενες εισροές για την παραγωγή και λειτουργία του αεροσκάφους, όπως η θερμότητα που δαπανήθηκε για την παραγωγή του, τα ακατέργαστα

μέταλλα που απαιτήθηκαν, οι μεταφορές, οι φυσικοί πόροι που απαιτήθηκαν (ορυκτά καύσιμα), καθώς και η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε κατά τον κύκλο ζωής του. Πρόκειται για μια μελέτη που βασίζεται στη λογική «από το λίκνο στον τάφο». Τέλος η μελέτη επικεντρώνεται στην Ευρώπη, καθώς τα δύο μεγάλα εργοστάσια παραγωγής του συγκεκριμένου αεροσκάφους βρίσκονται στην Τουλούζ και το Αμβούργο (Buergin et al. 2019, Winther 2006). Σχηματικά φαίνεται η απεικόνιση της LCA στην εικόνα

16



Εικόνα 16: LCA για το Airbus A319

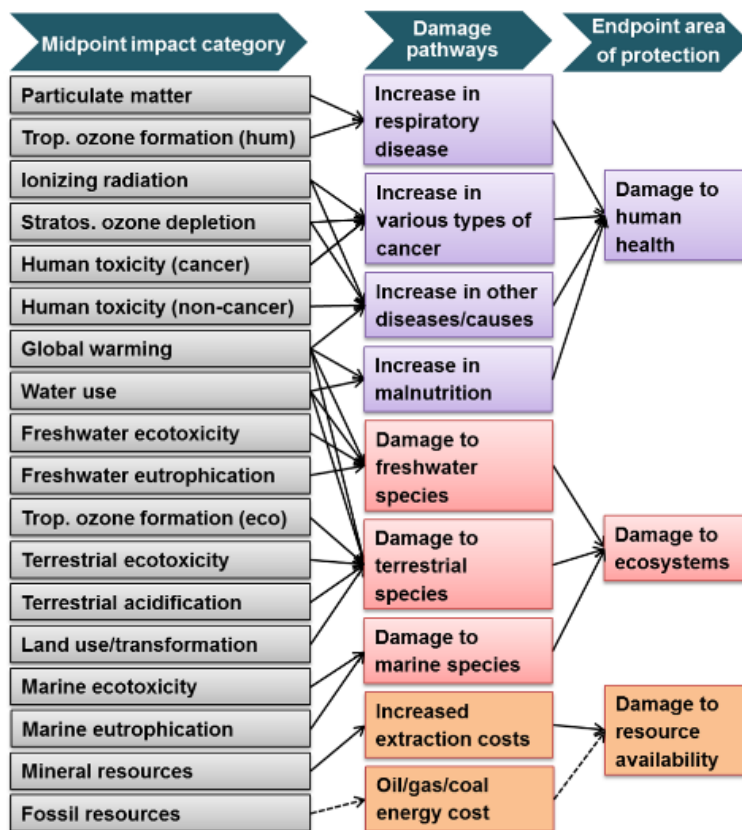
Πίνακας 8 Μεταφορά εξαρτημάτων A319 προς τελική συναρμολόγηση.(Buergin et al. 2019).

Component	Assembly location	Transportation	Distance (km)
Fuselage	Toulouse, France	-	-
Wings	Broughton, UK	Plane	966
Vertical stabilizer	Stade, Germany	Plane	1288
Horizontal stabilizer	Getafe, Spain	Track	805
Main landing gear	Bidos, France	Track	233
Nose Landing gear	Bidos, France	Track	233

Για τη διεξαγωγή της LCA με το SimaPro, υποθέτουμε ότι η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση μετάλλων, πλαστικών και κραμάτων ομαδοποιούνται σε μια κατηγορία. Επιπλέον ο τρόπος μεταφοράς για τα φτερά και το κάθετο σταθερό stabilizer επιλέγεται μεγάλο φορτηγό αεροσκάφος και ο τρόπος μεταφοράς για τα Horizontal stabilizers και συστήματα προσγείωσης θεωρείται το βαρύ εμπορικό φορτηγό (για φορτία>32 τόνους) Πίνακας 8. (Buergin et al. 2019). Τέλος, η μελέτη έγινε για μία μόνο πτήση του συγκεκριμένου αεροσκάφους ελλείπει περισσότερων δεδομένων.

Επιλέχθηκαν κατηγορίες επιπτώσεων για τη μέθοδο εκτίμησης επιπτώσεων ReCiPe Midpoint, οι οποίες αξιολογούν τις εκπομπές και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ο Πίνακας 9 επισημαίνει τις κατηγορίες επιπτώσεων αυτής της μεθόδου αξιολόγησης. Η μέθοδος επιπτώσεων ReCiPe Midpoint είναι μια μέθοδος για την εκτίμηση επιπτώσεων (LCIA) σε μια LCA. Η αξιολόγηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA) μεταφράζει τις εκπομπές και τις εξορύξεις πόρων σε περιορισμένο αριθμό βαθμολογιών περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω των λεγόμενων παραγόντων χαρακτηρισμού. Η μέθοδος ReCiPe εξετάζει δεκαοχτώ δείκτες οι οποίοι ομαδοποιούνται σε τρεις τελικούς, που δεν είναι

άλλοι από την επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, τη φθορά της βιοποικιλότητας και την μείωση των φυσικών πόρων, (Huijbregts Et al. 2016) όπως φαίνεται και στην εικόνα 17.



Εικόνα 17 Κατηγοριοποίηση επιπτώσεων που εξετάζονται με τη μέθοδο ReCiPe (Huijbregts Et al. 2016)

Αναλυτικά τα δεδομένα που εισάχθηκαν στο Simapro, όσον αφορά τα δομικά μέρη του αεροσκάφους βρίσκονται στον πίνακα 9

Επιπλέον στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση στο SimaPro:

1. Το τελικό βάρος του αεροσκάφους εξαιρουμένων των καλωδίων, των ηλεκτρονικών συσκευών κ.λπ. είναι 30.065,51354 kg (Ecoinvent 3.9.)
2. Μια πτήση αεροσκάφους λαμβάνει υπόψη και την απογείωση και προσγείωση και υπολογίζεται ότι το συνολικό καύσιμο (κηροζίνη) που καταναλώθηκε είναι 10516 kg για μέση πτήση απόστασης 1487 km.

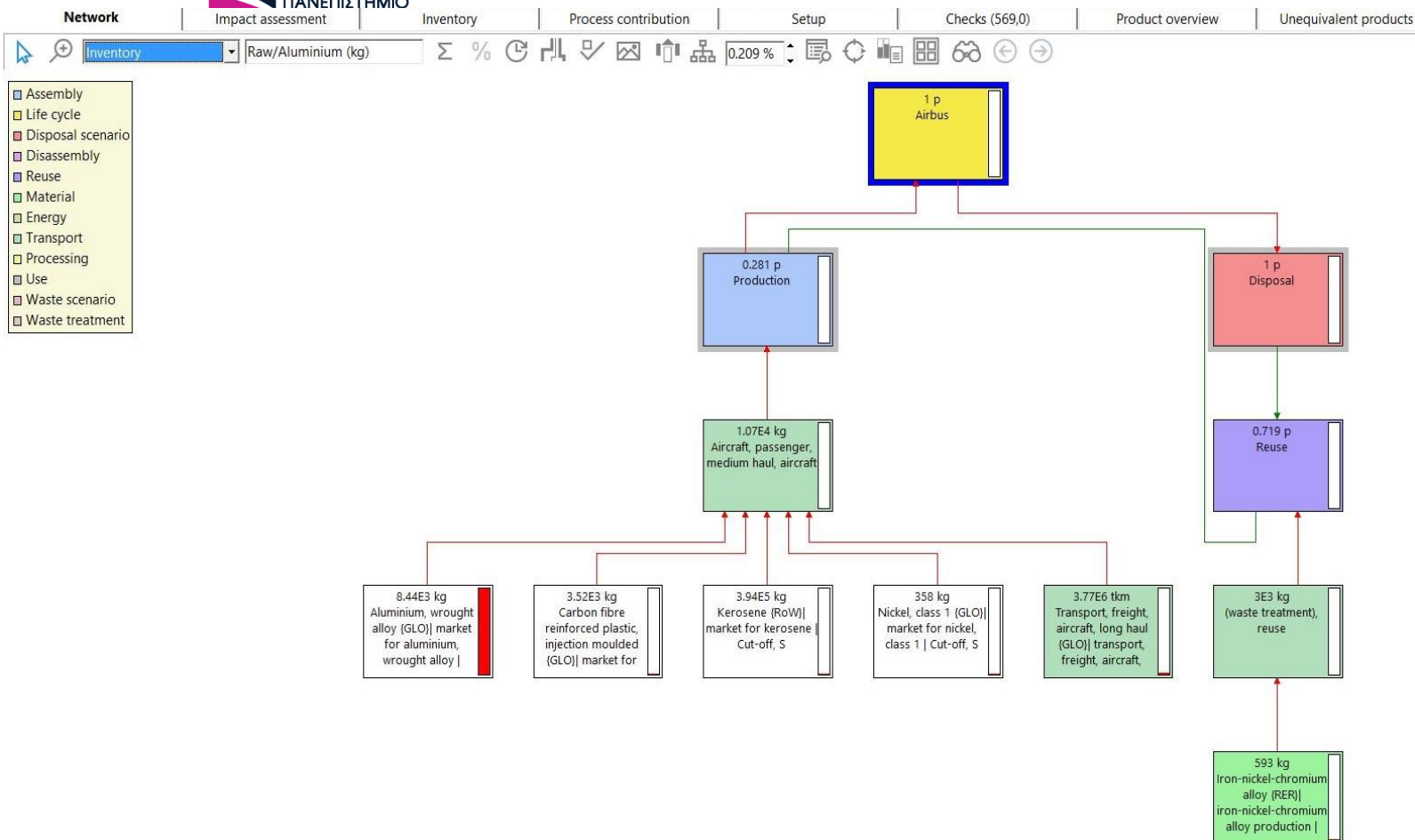
3. Η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση συνδυάζονται στην μελέτη LCA και υπολογίζονται ως το 71,91% του συνολικού όγκου του scrap του αεροσκάφους μετά την αποσυναρμολόγηση στο στάδιο του τέλους ζωής. (Πίνακας 9)
4. Η διάθεση των μη ανακυκλωμένων κομματιών πηγαίνει για αποτέφρωση και υγειονομική ταφή. Το συνολικό ποσοστό είναι το 2,955% των απορριμάτων που προορίζεται για αποτέφρωση και το 25,13% για υγειονομική ταφή. Οι διαδικασίες διάθεσης και αποτέφρωσης λαμβάνονται από το Ecoinvent 3.9.

Πίνακας 9 Εισροές στο SimaPro για τα δομικά μέρη του Airbus A319

Component	Material	Weight (kg)	End of life use (%)				
			Re-use	Recycle	Incineration	Landfill	
	Aluminum	8925		7586.25		1338.75	
	Titanium	150			75	75	
	Steel	100		85		15	
Fuselage	GFRP	1046		523	261.5	261.5	
	CFRP	145		72.5	36.25	36.25	
	Aluminum	11244		7870.8		3373.2	
	Titanium	1340		670		670	
Wings	Steel	400		300		100	
	GFRP	904		452	226	226	
	Aluminum	86		55.04		30.96	
Stabilizer	GFRP	129		64.5	32.25	32.25	
	CFRP	1162		581	290.5	290.5	
	Aluminium	1000	750			250	
	Alloy						
	Titanium	1656	1242			414	
	Steel	400	300			100	
Engine	Fe-Ni-Cr Alloy	1100	825			275	
	Nickel	1400	1050			350	
		31187	4167	18260.09	921.5	7838.41	8759.91
			13.36%	58.55%	2.955%	25.13%	28.09%
					10.520%	89.480%	
					71.912%		

Ανάλυση SimaPro

Στην εικόνα 18 απεικονίζεται η LCA μέσω του SimaPro για την παραγωγή, χρήση και το τέλος ζωής ενός αεροσκάφους Airbus a 319 (1 p Airbus). Όπως παρατηρούμε την εικόνα, οι εισροές του συστήματός μας, μέχρι να φτάσουμε στο στάδιο της συναρμολόγησης, είναι τα υλικά όπως το αλουμίνιο, τα CFRP, τα καύσιμα, τα υπόλοιπα μέταλλα που χρησιμοποιούνται, καθώς και η επιβάρυνση που προκύπτει μέσω της χρήσης άλλων μεταφορικών μέσων (αεροπλάνο και φορτηγό) για τη μεταφορά των υποσυστημάτων του αεροσκάφους στο εργοστάσιο που γίνεται η τελική συναρμολόγηση. Επιπλέον υπάρχει εισροή και ανακυκλωμένων πρώτων υλών από κράματα μετάλλων που εισέρχονται στην παραγωγική διαδικασία. Έτσι φτάνουμε στην παραγωγή ενός αεροσκάφους το οποίο μετά τη χρήση του διαλύεται για να επαναχρησιμοποιηθεί ένα μέρος του μέσω της ανακύκλωσης και ένα άλλο να καταστραφεί.



Εικόνα 18: A319 LCA με χρήση του προγράμματος SimaPro.

Στη συνέχεια θα δούμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη μέθοδο ReCiPe Midpoint. Οι κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που επιλέξαμε για τον ορισμό στόχου μέσω της μεθόδου ReCiPe Midpoint βρίσκονται στον πίνακα 10. Πρόκειται για παράγοντες που επηρεάζουν το περιβάλλον σφαιρικά, αλλά και την ποιότητα ζωής του ανθρώπου.

Πίνακας 10 Κατηγορίες επιπτώσεων της μεθόδου εκτίμησης επιπτώσεων ReCiPE Midpoint

Impact Category	Reference Unit
agricultural land occupation	m ² a
climate change	kg CO ₂ -Eq
fossil depletion	kg oil-Eq
freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq
freshwater eutrophication	kg P-Eq
human toxicity	kg 1,4-DCB-Eq
ionizing radiation	kg U235-Eq
marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq
marine eutrophication	kg N-Eq
metal depletion	kg Fe-Eq
natural land transformation	m ²
ozone depletion	kg CFC-11-Eq
particulate matter formation	kg PM ₁₀ -Eq
photochemical oxidant formation	kg NMVOC
terrestrial acidification	kg SO ₂ -Eq
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation	m ² a
water depletion	m ³
marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq
marine eutrophication	kg N-Eq
metal depletion	kg Fe-Eq
natural land transformation	m ²
ozone depletion	kg CFC-11-Eq
particulate matter formation	kg PM ₁₀ -Eq
photochemical oxidant formation	kg NMVOC
terrestrial acidification	kg SO ₂ -Eq
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation	m ² a
water depletion	m ³

Παρατηρήσεις και προτάσεις.

Παρακάτω στον πίνακα 10, βλέπουμε τα αποτελέσματα που πήραμε από την επεξεργασία των δεδομένων μέσω του προγράμματος Simapro και της μεθόδου ReCiPe Midpoint. Βλέπουμε πως η διαδικασία παραγωγής, χρήσης και καταστροφής ενός αεροσκάφους Airbus A319, επηρεάζει τελικά το περιβάλλον και πόσο. Τα ίδια αποτελέσματα παρατηρούμε σχηματικά και στην εικόνα 19.

Αναλυτικά, εδώ παρουσιάζονται οι 18 δείκτες που εξετάζει η μέθοδος που ακολουθήσαμε σε κάθε φάση του κύκλου ζωής. (παραγωγή, χρήση, και καταστροφή).

Βλέπουμε, ότι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου οφείλονται κυρίως στην καύση των ορυκτών καυσίμων, στην παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, σε κάθε διαδικασία παραγωγής και σε διαδικασίες επεξεργασίας απορριμμάτων.

Παρατηρούμε ακόμη, στην εικόνα 19 ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες μέσω των οποίων επηρεάζεται το περιβάλλον από τον κύκλο ζωής ενός αεροσκάφους είναι, η καρκινογόνος τοξικότητα στον άνθρωπο, η μόλυνση των θαλασσών, αλλά και του γλυκού νερού.

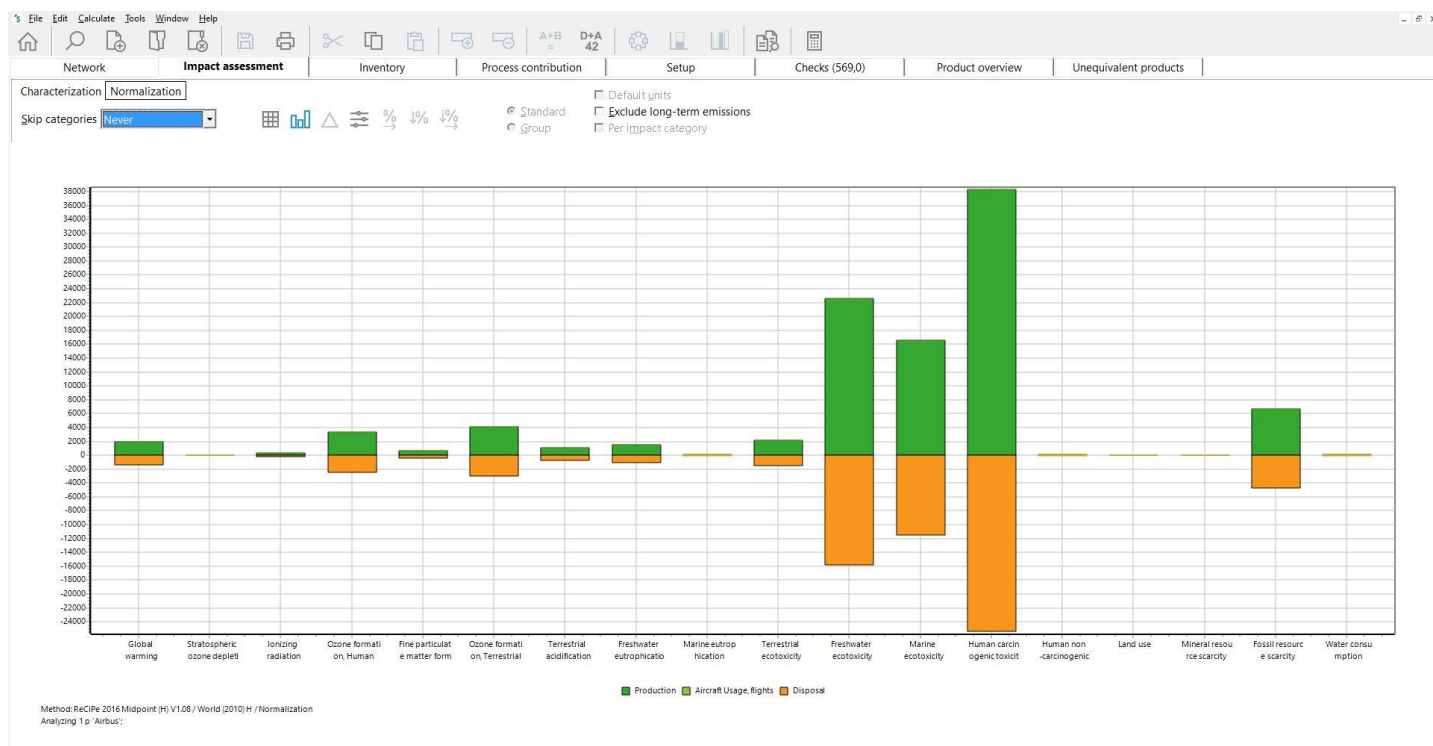
Οι υπόλοιποι δείκτες βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, πράγμα που εξηγείται από το γεγονός ότι η έρευνα εκτελέστηκε για μία πτήση. Αν λοιπόν αναγάγουμε τα ποσά αυτά στις πτήσεις που αναμένεται να εκτελέσει ένα τέτοιο αεροσκάφος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, είναι εύκολο να γίνει αντιληπτό ότι οι εκπομπές θα είναι θεαματικά υψηλότερες.

Τα CFRP και FGRP προσδίδουν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, πράγμα που φαίνεται από την επίδραση που έχει η χρήση μετάλλων στην επίδραση της έλλειψης ορυκτών πόρων.

Έτσι με βάση τα αποτελέσματα, προτείνεται η περεταίρω έρευνα για αύξηση της χρήσης σύνθετων υλικών στην κατασκευή αεροσκαφών. Επιπλέον θα ήταν σκόπιμη η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ, για τη χρήση στις μεταφορές. Όσον αφορά τα καύσιμα, αν και το φυσικό αέριο είναι ένα αποτελεσματικό καύσιμο που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, θα πρέπει να εξεταστεί και η λύση των βίο-καυσίμων.

Πίνακας 11 Η συμβολή της LCA του A319 στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Impact category	Unit	Total	Production	Aircraft Usage, flight	Disposal
Global warming	kg CO ₂ eq	4536520.012	15924939.94	9484.626956	-11397904.55
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.4637420213	1.557203573	0.002280610886	-1.095742162
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	42887.69939	140334.4183	147.9691627	-97594.68809
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	19760.90143	69713.35417	25.99448284	-49978.44722
Fine particulate matter formation	kg PM _{2.5} eq	4750.107143	16202.75667	9.230528889	-11461.88006
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	20681.0347	72951.54941	32.82592993	-52303.34064
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	13171.22706	45024.86916	26.10684921	-31879.74895
Freshwater eutrophication	kg P eq	308.1110427	965.8674954	0.5097691299	-658.2662218
Marine eutrophication	kg N eq	131.6406844	458.9861473	0.9735324713	-328.3189953
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	10030656.37	33043449.12	16783.41916	-23029576.17
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	172632.2985	569733.7963	71.26758843	-397172.7654
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	218776.7298	719434.6446	132.163319	-500790.0782
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	133266.0261	394310.8648	310.8591719	-261355.6978
Human non- carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1456544.88	4630498.253	2187.945277	-3176141.318
Land use	m ² a crop eq	49200.44145	166964.243	210.779635	-117974.5812
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	14301.74784	29075.56314	15.88111912	-14789.69642
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1856637.297	6520770.971	12572.4399	-4676706.114
Water consumption	m ³	8452.277093	27378.88058	26.21163434	-18952.81512



Εικόνα 19: Η συμβολή της LCA του A319 στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η αξιολόγηση του κύκλου ζωής αποδεικνύεται μια αποτελεσματική μέθοδος για τη διαχείριση περιβαλλοντικών θεμάτων. Παρέχει μια σαφή κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος και βοηθά στον εντοπισμό περιοχών για βελτίωση και εστίαση. Ενώ η φάση συλλογής δεδομένων μπορεί να είναι περίπλοκη, η χρήση λογισμικού LCA, όπως το Simapro, μέσω των βιβλιοθηκών που διαθέτει, αλλά και των μεθόδων αξιολόγησης επιπτώσεων όπως η μέθοδος ReCiPe Midpoint ενισχύουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της έρευνας και μειώνουν τον πλεονασμό.

Στην έρευνα που διεξήχθη μέσω βιβλιογραφικής αναζήτησης διαπιστώθηκε ένα πρόβλημα που σχετίζεται με τις μελέτες AKZ που αφορούν στην αεροπορική βιομηχανία. Παρατηρήθηκαν μειωμένες αναφορές που αντιμετωπίζουν το αεροσκάφος σαν σύνολο, αντιθέτως οι μελέτες εξειδικεύονται σε επιμέρους υποσυστήματα. Πολλές έρευνες εξετάζουν την παραγωγή κάποιων εξαρτημάτων, ή του καυσίμου που καταναλώνεται κλπ. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη στο μέλλον οι LCA που εξετάζουν αεροσκάφη να εξετάζουν το αεροσκάφος ως σύνολο.

Φαίνεται επίσης ότι έχει αρχίσει να προκύπτει η ανάγκη, μεγαλύτερης συνεισφοράς δεδομένων από εταιρίες και φορείς, ώστε να καλυφθεί το πρόβλημα της πολυπλοκότητας λόγω των πολλών εμπλεκόμενων φορέων και υποσυστημάτων. Κάτι ακόμη που φάνηκε μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι η έλλειψη σύνδεσης των AKZ με το πρότυπο ISO:14040, μια πρακτική που φαίνεται πως πρέπει να αλλάξει.

Παρά ορισμένους περιορισμούς σε εύρος και λεπτομέρεια, αυτή η μελέτη κατέβαλε σημαντικές προσπάθειες για τη διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης και ακριβούς LCA του Airbus A319, βασιζόμενη σε αξιόπιστες πηγές δεδομένων αποθέματος. Η μελέτη επικεντρώθηκε ιδιαίτερα στον αντίκτυπο των υλικών κατασκευής και του καυσίμου.

Τα αποτελέσματα από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, αλλά και της LCA για το a319 που διενεργήθηκε, υποδεικνύουν ότι οι πιο σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις εντοπίζονται στο στάδιο λειτουργίας, κυρίως λόγω της καύσης καυσίμου, οδηγώντας σε μεγαλύτερη συνεισφορά στην κατηγορία των επιπτώσεων των ορυκτών καυσίμων σε όλο τον κύκλο ζωής του αεροσκάφους. Το θετικό είναι ότι η χρήση σύνθετων υλικών έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την περιβαλλοντική ρύπανση μειώνοντας το δομικό βάρος του αεροσκάφους, συνεπώς και την κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο, η ανακύκλωση των

σύνθετων υλικών παραμένει μια πρόκληση λόγω του σχετικά χαμηλού ρυθμού ανακύκλωσης και της σημαντικής κατανάλωσης ενέργειας κατά τη φάση παράγωγης και ανακύκλωσής τους, με αποτέλεσμα μικρές σχετικά θετικές αποδόσεις από τη διάθεσή τους μέχρι στιγμής.

Προτείνεται περαιτέρω έρευνα στο στάδιο της κατασκευής, καθώς οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από την κατασκευή τιτανίου φαίνεται να είναι πιο σημαντικές από αυτές των σύνθετων υλικών. Η αυξανόμενη χρήση του τιτανίου στη βιομηχανία αεροσκαφών, δεδομένης της υψηλής αντοχής εφελκυσμού και των ιδιοτήτων χαμηλής πυκνότητάς του, υπογραμμίζει τη σημασία της αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεών του.

Η μελέτη αξιολόγησης του κύκλου ζωής του A319 ολοκληρώθηκε με επιτυχία. Επιπλέον, η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη είναι σαφής, επιτυγχάνοντας τον στόχο του έργου και παρέχοντας πολύτιμες γνώσεις για μελλοντική έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

Οι πρωταρχικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αεροσκαφών αποδίδονται κυρίως στην κατανάλωση κηροζίνης και στις αερομεταφερόμενες εκπομπές της κατά τη διαδικασία καύσης καυσίμου. Ως εκ τούτου, η πιο αποτελεσματική προσέγγιση για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης των αερομεταφορών είναι η εστίαση στη βελτίωση των εκπομπών CO₂ του κινητήρα ή στην υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων. Η Boeing, έχει υπολογίσει ότι η ανάμειξη κηροζίνης με καύσιμα φυκιών θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) κατά 60 έως 80%. Επιπλέον, η Διεθνής Ένωση Αερομεταφορών IATA (2021) είχε θέσει ως στόχο τα μέλη της να χρησιμοποιούν 65% εναλλακτικά καύσιμα έως το 2050, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Βιβλιογραφία

- Air BP. (2020). *Handbook of products. Technical report, British Petroleum, 20000.*
- Airbus. (2002a). *Aircraft Maintenance Manual, Customer Services - Technical Data Support and Services, Airbus S.A.S.*
- Airbus. (2002b). *Structural Repair Manual, Customer Services - Technical Data Support and Services, Airbus S.A.S.*
- Airbus. (2002c). *Weight and Balance Manual, Customer Services - Technical Data Support and Services, Airbus S.A.S.*
- Airbus. (2005). *Aircraft recovery manual. Technical report, Airbus.*
- Airbus. (2008a). *Process for Advanced Management of End-of-Life of Aircraft, ECO-EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY.*
- Airbus. (2008b). *Weight and balance manual a330-200. Technical report, Airbus.*
- Airbus. (2012). *Aircraft Characteristics Airport and Maintenance planning, Customer Services - Technical Data Support and Services, Airbus S.A.S.*
- Airbus. (2013a). *A319 Dimensions & key data, available at : <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a319/specifications/> (accessed 12 August 2013).*
- Airbus. (2013b). *A320 Dimensions & key data, available at: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a320/specifications/>*
- Airbus A330 "Aircraft Characteristics airport and maintenance planing" Issue Jan 01/93 rev. Jul. 01/21*
- Airbus A319 "Aircraft Characteristics airport and maintenance planing" Issue Jul 01/95 rev. Dec. 01/20*
- Airbus Annual report (2021) - Connecting and protecting*
- Aircraft Analysis Fleet Planning. (2005). Can the 787 and a350 transform the economics of long-haul services? Aircraft Commerce.*
- Aircraft commerce. (2010). Aircraft Owner's & Operator's Guide: 737NG family, Aircraft commerce.*
- Asmatulu, E., Overcash, M., & Twomey, J. (2013). Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011. *Journal of Industrial Engineering, 2013.*
- Attri, R., & Grover, S. (2015). Production system life cycle: an inside story. *International*

- Journal of Industrial and Systems Engineering*, 19(4), 483.
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 10722–10738.
- Bachman, J., Hidalgo, C., Bricout, S. (2017) *Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review* Science China Technological Sciences Vol.60 No.9:1301–1317
- Böckmann, M. G., & Schmitt, R. (2012). ‘Methodology for ecological and economical aircraft life cycle analysis.’ In *Leveraging Technology for a Sustainable World* (pp. 467–472).
- British Standards. (2006). *14040: Environmental management-Life cycle assessment-Principles and Framework, International organization for standardization.*
- de Oliveira, F. L. (2010). *Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft.*
- Buergin, J., Blaettchen, P., Kronenbitter, J., Molzahn, K., Schweizer, Y., Strunz, C., Almagro, M., Bitte, F., Ruehr, S., Urgo, M., Lanza, G. (2019) Robust assignment of customer orders with uncertain configurations in a production network for aircraft manufacturing . *International Journal of Production Research* 57:3, 749-763
- Delogu, M., Del Pero, F., Romoli, F., & Pierini, M. (2015). Life cycle assessment of a plastic air intake manifold. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(10), 1429–1443.
- Ehrenberger, S. (2013). *Life Cycle Assessment of Magnesium Components in Vehicle Construction – Executive Summary, DLR, Stuttgart, Germany.*
- Federal Association of the German Air Transport Industry e. V. (BDL), 2019.
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer, E. (2016) Introduction to LCA with SimaPro
- Klimaschutzim Luftverkehr - Analyse der Instrumente zur CO₂-Reduktion Feldhusen, J., Pollmanns, J., & Heller, J. E. (2011). End of life strategies in the aviation industry. In *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, Springer (pp. 459–464).
- Franz, K., Hörschemeyer, R., Ewert, A., Eisebith, M. F., Böckmann, M. G., Schmitt, R., Petzoldt, K., Schneider, C., Heller, J. E., Feldhusen, J., Buker, K., & Reichmuth, J. (2012). ‘Life cycle engineering in preliminary aircraft design’,. In *Leveraging Technology for a Sustainable World* (pp. 473–478).
- Fuchs, R. (2018). *Airbus company presentation. Technical report, Airbus.*
- Garbie, I. H. (2015). Integrating sustainability assessments in manufacturing enterprises: a framework approach. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*,

- Hischier, R., Weidema, B. (2010) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. *Swiss Center for Life Cycle Inventories*.
- Horvath, A., & Chester, M. (2007). *Environmental Life-cycle Assessment of Passenger Transportation, Final Report to the University of California Transportation Center, models 20071015/rail, 20071211/air, and 20071211/compiled*.
- Howe, S. (2011). *Environmental impact assessment and optimisation of commercial aviation*, Cranfield University.
- Howe, S, Kolios, A.J., Brennan, F.P. (2013). Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners. *Transportation Research Part D* 31-41
- Huijbregts ,M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshou, P.M.F., Stam G., Verones, F., Vieira, M.D.M., Hollander, A., Zijp, M., van Zelm, R. (2016) ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *National Institute for Public Health and the Environment*
- IATA : *Ner- Zero Crbon Emmisions by 2050* (2021)
- Johanning, A., & Scholz, D. (2013). ‘A first step towards the integration of life cycle assessment into conceptual aircraft design’ Document ID: 301347. In *DeutscherLuft- und Raumfahrtkongress* (p. Document ID: 301347.)
- Keiser, D., Schnoor, H., Pupkes, B., Freitag,M. (2023) *Life cycle assessment in aniation: Asystematic literature reviewof applications, methodological approches and challenges. Journal of Air Transport Management* 110 (2023)102418
- Keivanpour, S., Ait-Kadi, D., & Mascle, C. (2013). Toward a Strategic Approach to End-of-Life Aircraft Recycling Projects A Research Agenda in Transdisciplinary Context. *Journal of Management and Sustainability*, 3(3).
- Kilpi, J (2007) Fleet composition of commercial jet aircraft 1952–2005: Developments in uniformity and scale. *Journal of Air Transport Management* 13
- Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., & Moussiopoulos, N. (2010). Life cycle assessment of kerosene used in aviation. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(6), 417–424.
- Lee, M., Li k.b, L., Song, W. (2019) Analysis of direct operating cost of wide-body passenger aircraft: A parametric study based on Hong Kong. *Chinese Journal of Aeronautics* 32(5): 1222-1243

- Lee, J. J., Lukachko, S. P., Waitz, I. A., & Schafer, A. (2001). Historical and Future Trends in Aircraft Performance, Cost, and Emissions. *Annual Review of Energy & the Environment*, 26(1), 167.
- Lewis, T. A. (2013). *Life Cycle Assessment of the Passenger Air Transport System Using Three Flight Scenarios*, Norwegian University of Science and Technology Department of Energy and Process Engineering, Supervisor, Anders Hammer Strømman, EPT, Trondheim, Norway.
- Liu, Z. (2013a). *Life Cycle Assessment of Composites and Aluminium Use in Aircraft Systems*, Cranfield University School of Engineering, MSc Thesis, Academic Year: 2012–2013.
- Liu, Z. (2013b). *Life cycle assessment of composites and aluminium use in aircraft systems*.
- Lokesh, K., Sethi, V., Nikolaidis, T., Goodger, E., & Nalianda, D. (2015). Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance. *Biomass and Bioenergy*, 77, 26–44.
- Lopes, J. V. D. O. F. (2010). *Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft*.
- Maxineasa, S. G., Taranu, N., Bejan, L., Isopescu, D., & Banu, O. M. (2015). Environmental impact of carbon fibre-reinforced polymer flexural strengthening solutions of reinforced concrete beams. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(10), 1343–1358.
- McKenzie, E. C., & Durango-Cohen, P. L. (2012). Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1), 39–47.
- Milani, A. S., Eskicioglu, C., Robles, K., Bujun, K., & Hosseini-Nasab, H. (2011). Multiple criteria decision making with life cycle assessment for material selection of composites. *Express Polymer Letters*, 5(12), 1062–1074.
- Oxford University press. (2013). *Carbon-footprint*, available at: <http://oxforddictionaries.com/definition/english/carbon-footprint>.
- Pinheiro Melo, S., Barke, A., Cerdas, F., Thies, C., Mennenga, M., Spengler, T. S., & Herrmann, C. (2020). Sustainability Assessment and Engineering of Emerging Aircraft Technologies—Challenges, Methods and Tools. *Sustainability*, 12(14), 5663.
- ReCiPe (2016) v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *National Institute for Public Health and the Environment - The*

- Saksorn, F., Galpin, D., & Stevens, J. (2006). *A500 collarios: Design project. Technical report, Airbus.*
- Scelsi, L., Bonner, M., Hodzic, A., Soutis, C., Wilson, C., Scaife, R., & Ridgway, K. (2011). Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment. *Express Polymer Letters*, 5(3), 209–217.
- Song, Y. S., Youn, J. R., & Gutowski, T. G. (2009). Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(8), 1257–1265.
- Su-ungkavitan, P., Tiruta-Barna, L., Hamelin, L., (2023) Methodological framework for Life Cycle Assessment of sustainable aviation (SA) systems. *Science of the total Environment* 885 (2023) 163881
- Subic, A., Schiavone, F., Leary, M., & Manning, J. (2010). Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of passenger seats and their impact on different vehicle models. *International Journal of Vehicle Design*, 53(1/2), 89.
- Timmis, A. J., Hodzic, A., Koh, L., Bonner, M., Soutis, C., Schäfer, A. W., & Dray, L. (2015). Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(2), 233–243.
- R. Veeramanikandan, S. Nithish, G. Sivaraj (2017) Life cycle assessment of an aircraft component: a case study *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, Vol. 27, No. 4,
- Wang, Z., Osseweijer, P., & Duque, J. P. (2017). Assessing social sustainability for biofuel supply chains: The case of aviation biofuel in Brazil. *2017 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 1–5.
- Wilson, J. M., Piya, C., Shin, Y. C., Zhao, F., & Ramani, K. (2014). Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*, 80, 170–178.
- Winther, M. (2006). Emission Inventory Guidebook. *The National Environmental Research Institute, Denmark*

Software

SimaPro (Software for LCA Study).
Green Delta database (Ecoinvent 3.2, Ecoinvent 3.9)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.