ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΗΣ eVTOL ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Ελένη Πατσατζή

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Αραβώσης

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2025

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αραβώση, για την άμεση στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.
Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την αγάπη και την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, δεν θα ήμουν ο ίδιος άνθρωπος χωρίς αυτούς.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΗΣ EVTOL ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Πίνακας Περιεχομένων

1 Εισαγωγή *5*

1.1 Η σημασία του υπό μελέτη προβλήματος **5**

1.2 Οικονομικές, περιβαλλοντικές και επιχειρησιακές προκλήσεις και ευκαιρίες **6**
1.2.1 Οικονομικές προκλήσεις και ευκαιρίες 6
1.2.2 Περιβαλλοντικές προκλήσεις και ευκαιρίες 6
1.2.3 Επιχειρησιακές προκλήσεις και ευκαιρίες 7

2 Τεχνολογική ανασκόπηση *8*

2.1 Ιστορία και εξέλιξη των eVTOLs, τρέχουσα τεχνολογία και δυνατότητες **8**

2.2 Παραδοσιακές μέθοδοι μεταφοράς επιβατών **11**

2.3 Μοντέλα eVTOL **13**
2.3.1 Joby Aviation eVTOL[5] 13
2.3.2 Lilium Jet[6] 14
2.3.3 Vertical Aerospace VX4[7] 16
2.3.4 EHang 216[8] 18

2.4 Τεχνικές προκλήσεις **19**

2.5 Υποδομές φόρτισης για τα eVTOLs **21**
2.5.1 Απαιτήσεις υποδομών φόρτισης 21
2.5.2 Είδη υποδομών φόρτισης 21
2.5.3 Λειτουργική συμβατότητα 23

2.6 Κανονισμοί για τη χρήση drones και eVTOL[2] **24**

2.7 Προδιαγραφές ασφαλείας και συμμόρφωση **25**

2.8 Άλλες χρήσεις **28**

3 Τεχνολογικές πτυχές για την μελέτη σκοπιμότητας χρήσης των eVTOL *30*

3.1 Πλεονεκτήματα της χρήσης των eVTOL για την μεταφορά επιβατών **30**
3.1.1 Μείωση λειτουργικού κόστους 30
3.1.2 Εκπομπές ρύπων και ενεργειακό αποτύπωμα 31
3.1.3 Ταχύτερη Μεταφορά Επιβατών 32
3.1.4 Αυξημένη ασφάλεια και αξιοπιστία 32

3.2 Προκλήσεις της χρήσης των eVTOL **33**

3.3 Πιλοτικά προγράμματα: Εφαρμογές σε επιλεγμένες διαδρομές **34**

4 Μεθοδολογία Οικονομικής Ανάλυσης *37*

4.1 Κριτήρια αξιολόγησης και μεθοδολογία της ανάλυσης **37**
4.1.1 Κριτήρια αξιολόγησης 37
4.1.2 Μέθοδος ανάλυσης κόστους-οφέλους 38
4.1.3 Παραδοχές 38

4.2 Ανάλυση αρχικής επένδυσης και υπολογισμός λειτουργικού κόστους eVTOL **39**
4.2.1 Αρχικό κόστος επένδυσης 39
4.2.2 Υπολογισμός λειτουργικών δαπανών 40

4.3 Σύγκριση με συμβατικές μεθόδους μεταφοράς **42**
4.3.1 Ελικόπτερα 42
4.3.2 Σκάφη 42

4.3.3 Υπολογισμός ετήσιας εξοικονόμησης 43
4.4 Απόδοση Επένδυσης 44
4.5 Ανάλυση ευαισθησίας για τη μεταφορά επιβατών με eVTOLs 45
4.5.1 Κύριες μεταβλητές για την ανάλυση ευαισθησίας 45
4.5.2 Σενάρια Ανάλυσης Ευαισθησίας 46
4.6 Μέθοδοι αξιολόγησης της επένδυσης 49
4.6.1 Περίοδος επανάκτησης κεφαλαίου 50
4.6.2 Μέθοδος προεξοφλημένης περιόδου επανάκτησης κεφαλαίου 50
4.6.3 Καθαρά Παρούσα Αξία 51
4.6.4 Δείκτης κερδοφορίας 52
4.6.5 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης 53
4.6.6 Τροποποιημένος εσωτερικός βαθμός απόδοσης 54
4.7 Συμπεράσματα Οικονομικής Ανάλυσης 55
5 Μελέτη περιπτώσεων 56
5.1 Οικονομική αξιολόγηση μέσων μεταφοράς για τη διαδρομή Αθήνα - Θεσσαλονίκη 56
5.2 Οικονομική αξιολόγηση μέσων μεταφοράς για τη διαδρομή Αθήνα - Μύκονος 60
5.3 Τεχνική αξιολόγηση eVTOL Joby Aviation S4-2.0 63
5.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής eVTOL Lilium Jet στις Κυκλάδες 67
5.5 Ανάλυση ευαισθησίας για κρίσιμες τεχνικές παραμέτρους του Joby Aviation S4 68
6 Συμπεράσματα 71
7 Βιβλιογραφία 73
8 Παράρτημα Α 75
8.1 Κώδικας για την οικονομική αξιολόγηση μέσων μεταφοράς για τη διαδρομή Αθήνα - Θεσσαλονίκη 75
8.2 Κώδικας για την οικονομική αξιολόγηση μέσων μεταφοράς για τη διαδρομή Αθήνα – Μύκονος 77
8.3 Κώδικας για την ανάλυση ευαισθησίας κρίσιμων τεχνικών παραμέτρων του Joby Aviation S4 79

1 Εισαγωγή

Τα eVTOLs (electric Vertical Take-Off and Landing) αεροσκάφη είναι μια νέα κατηγορία αερομεταφερόμενων οχημάτων που σχεδιάζονται να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα, χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια ως κύρια πηγή ισχύος. Η ανάπτυξη των eVTOL έχει επιταχυνθεί τα τελευταία χρόνια, χάρη στις προόδους στην τεχνολογία μπαταριών, τους ελαφρύτερους και αποδοτικότερους ηλεκτρικούς κινητήρες, καθώς και την αυξημένη ζήτηση για βιώσιμες λύσεις μεταφοράς.

Η βασική τους χαρακτηριστική ιδιότητα είναι η ικανότητα απογείωσης και προσγείωσης κατακόρυφα, όπως τα ελικόπτερα, χωρίς την ανάγκη για εκτεταμένους διαδρόμους απογείωσης ή προσγείωσης. Αυτό τα καθιστά ιδανικά γιατί μπορούν να λειτουργούν σε περιορισμένους χώρους. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών τους, που θα αναπτυχθούν λεπτομερώς παρακάτω, είναι ιδανικά για τη μεταφορά επιβατών σε διάφορες εφαρμογές, όπως αστικές μετακινήσεις, σύνδεση απομακρυσμένων περιοχών, προσγείωση και απογείωση σε καταστρώματα πλοίων, πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου και μεταφορές σε απομακρυσμένα νησιά χωρίς μεγάλες υποδομές.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση του κατά πόσο τα eVTOLs μπορούν να αποτελέσουν βιώσιμη και αποδοτική λύση για τη μεταφορά επιβατών. Παράλληλα, η εργασία επιδιώκει να εντοπίσει τις πιθανές προκλήσεις, καθώς και τις δυνατότητες βελτιστοποίησης που σχετίζονται με την εφαρμογή τους.

1.1 Η σημασία του υπό μελέτη προβλήματος

Η εφαρμογή των eVTOLs στη μεταφορά των επιβατών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διαμόρφωση των στρατηγικών ανάπτυξης που συνδυάζουν βιωσιμότητα, αποδοτικότητα και τεχνολογική καινοτομία. Η αξιολόγηση μπορεί να καθοδηγήσει τις εταιρείες σε αποφάσεις που θα βελτιώσουν τις επιχειρησιακές τους δυνατότητες, ενώ θα ενισχύσουν τη συμβολή τους σε έναν πιο βιώσιμο κόσμο.

Συγκεκριμένα, τα eVTOLs μπορούν να μειώσουν σημαντικά τον χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά επιβατών, προσφέροντας ταχύτερες λύσεις από τις παραδοσιακές μεθόδους όπως σκάφη ή ελικόπτερα. Κρίνονται κατάλληλα και για την υποστήριξη απομακρυσμένων εγκαταστάσεων. Η δυνατότητα απογείωσης και προσγείωσης σε περιορισμένους χώρους αυξάνει την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια της μετακίνησης. Αυτή η αποδοτικότητα μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα των επιχειρήσεων, ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτείται ταχεία απόκριση.

Επίσης, μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην βιωσιμότητα και πράσινη τεχνολογία. Οι εταιρείες αντιμετωπίζουν αυξανόμενη πίεση για τη μείωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος. Τα eVTOLs, ως ηλεκτροκίνητα μέσα, μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη των στόχων μείωσης εκπομπών άνθρακα. Η χρήση τους ενισχύει την υιοθέτηση πράσινων τεχνολογιών, λειτουργώντας ως παράδειγμα καινοτομίας.

Τέλος, όπως θα παρουσιαστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ανάλυση του κόστους και των πιθανών οικονομιών από τη χρήση eVTOL μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση

πόρων, ειδικά σε ό,τι αφορά τη συντήρηση, τα καύσιμα και τις υποδομές που απαιτούνται για τα παραδοσιακά μέσα μεταφοράς.

1.2 Οικονομικές, περιβαλλοντικές και επιχειρησιακές προκλήσεις και ευκαιρίες

Η χρήση των eVTOLs για τη μεταφορά επιβατών συνοδεύεται από οικονομικές, περιβαλλοντικές και επιχειρησιακές προκλήσεις και ευκαιρίες, οι οποίες μπορούν να διαμορφώσουν την απόφαση για την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας. Με βάση αυτές θα αξιολογηθεί η σκοπιμότητα της χρήσης. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά:

1.2.1 Οικονομικές προκλήσεις και ευκαιρίες

Προκλήσεις:

Είναι γεγονός ότι υπάρχει υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, λεπτομερώς περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.2. Το κόστος αγοράς eVTOL και των απαραίτητων υποδομών (π.χ., σταθμοί φόρτισης) είναι σημαντικό, ιδιαίτερα σε πρώιμα στάδια υιοθέτησης και ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας.
Γι' αυτό το λόγο, στο αρχικό κόστος πρέπει να προστεθεί και το κόστος έρευνας και ανάπτυξης. Τα eVTOLs βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης και αναμένεται να μπουν στην παραγωγή το άμεσο διάστημα. Καθώς η βασική τους χρήση είναι τη μείωση της αστικής εναέριας κινητικότητας (Urban Air Mobility – UAM), είναι πιθανόν να απαιτούνται προσαρμογές για την εκάστοτε εφαρμογή, για τις οποίες το κόστος προσαρμογής μπορεί να αυξήσει την επένδυση. Επιπλέον, η απουσία σαφούς ρυθμιστικού πλαισίου για τα eVTOLs σε πολλές χώρες ενδέχεται να καθυστερήσει την υιοθέτησή τους ή να επιφέρει πρόσθετα κόστη συμμόρφωσης.

Ευκαιρίες:

Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης eVTOL είναι η μείωση του λειτουργικού κόστους. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι πιο οικονομική σε σχέση με τα καύσιμα που χρησιμοποιούν τα ελικόπτερα, ενώ η συντήρηση των ηλεκτρικών συστημάτων είναι απλούστερη και φθηνότερη. Στο άμεσο μέλλον με την αύξηση της παραγωγής eVTOL και τη βελτίωση της τεχνολογίας, το κόστος ανά μονάδα μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Επίσης, η ταχεία και ασφαλής μεταφορά επιβατών μπορεί να μειώσει τις καθυστερήσεις σε επιχειρήσεις, οδηγώντας σε εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων.

1.2.2 Περιβαλλοντικές προκλήσεις και ευκαιρίες

Προκλήσεις:

Μια από τις βασικές περιβαλλοντικές προκλήσεις που συνδέονται με τα eVTOLs είναι η παραγωγή και η απόρριψη των μπαταριών τους. Η εξόρυξη πρώτων υλών, όπως το λίθιο και το κοβάλτιο, έχει σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, καθώς συνδέεται με την υποβάθμιση οικοσυστημάτων και την υπερκατανάλωση φυσικών πόρων, όπως το νερό. Επιπλέον, η ανακύκλωση των μπαταριών αυτών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, που εάν δεν εκτελεστεί σωστά, μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντική ρύπανση.

Μια άλλη πρόκληση αφορά τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αν και τα eVTOLs λειτουργούν αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια, η πλήρης εκμετάλλευση της ηλεκτροκίνησής τους εξαρτάται από τη χρήση πράσινης ενέργειας στους σταθμούς φόρτισης. Εάν η ενέργεια που χρησιμοποιείται προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, η περιβαλλοντική τους

ωφέλεια μειώνεται σημαντικά. Η ανάπτυξη των απαραίτητων υποδομών για την τροφοδοσία με πράσινη ενέργεια παραμένει μια πρόκληση σε πολλές περιοχές.

Ευκαιρίες:

Παρά τις προκλήσεις, τα eVTOLs προσφέρουν σημαντικές ευκαιρίες για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των μεταφορών. Κατά τη χρήση τους, τα eVTOLs δεν παράγουν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κάτι που τα καθιστά ιδανική λύση για τη μείωση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, ιδιαίτερα σε σύγκριση με ελικόπτερα και σκάφη που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα.

Η υιοθέτηση αυτών των οχημάτων μπορεί επίσης να υποστηρίξει την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν τεθεί από διεθνείς οργανισμούς και κυβερνήσεις. Οι εταιρείες, για παράδειγμα, μπορούν να συμμορφωθούν με τις κανονιστικές απαιτήσεις για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ενισχύοντας παράλληλα την εικόνα τους ως πρωτοπόρων σε πράσινες πρακτικές. Μια ακόμη σημαντική ευκαιρία είναι η μείωση της ρύπανσης θορύβου. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ελικόπτερα, τα eVTOLs είναι πολύ πιο αθόρυβα, κάτι που τα καθιστά ιδιαίτερα φιλικά για χρήση σε αστικές περιοχές ή σε θαλάσσιες ζώνες, όπου η ηχορύπανση είναι ένα σημαντικό ζήτημα.

1.2.3 Επιχειρησιακές προκλήσεις και ευκαιρίες

Προκλήσεις:

Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η αυτονομία και η αυτονομία των eVTOLs. Η περιορισμένη διάρκεια πτήσης λόγω της τρέχουσας τεχνολογίας μπαταριών αποτελεί εμπόδιο για τη χρήση τους σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή τους σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως η μεταφορά σε απομακρυσμένα πλοία ή περιοχές.

Επιπλέον, οι καιρικές συνθήκες στη θάλασσα αποτελούν μια σοβαρή τεχνική πρόκληση. Οι ισχυροί άνεμοι, οι καταιγίδες και η απρόβλεπτη φύση των καιρικών φαινομένων μπορούν να επηρεάσουν τη σταθερότητα και την ασφάλεια των πτήσεων, καθιστώντας την επιχειρησιακή χρήση των eVTOLs απαιτητική.

Μια ακόμη πρόκληση είναι οι υποδομές στήριξης που απαιτούνται για τη λειτουργία των eVTOLs. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης και προσγείωσης στα πλοία ή σε λιμενικές εγκαταστάσεις απαιτεί σημαντικές προσαρμογές στις υπάρχουσες υποδομές. Η συντήρηση αυτών των υποδομών ενδέχεται επίσης να προσθέσει επιπλέον κόστος και πολυπλοκότητα στις επιχειρήσεις.

Ευκαιρίες:

Παρά τις προκλήσεις, τα eVTOLs προσφέρουν μοναδικές επιχειρησιακές ευκαιρίες. Η δυνατότητα για ταχεία απόκριση σε έκτακτες ανάγκες είναι από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα. Τα eVTOLs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη γρήγορη μεταφορά επιβατών, ιατρικής βοήθειας ή ανταλλακτικών σε κρίσιμες καταστάσεις, όπου ο χρόνος είναι καθοριστικός.

Η ευελιξία λειτουργιών που παρέχουν τα eVTOLs είναι επίσης αξιοσημείωτη. Η δυνατότητα απογείωσης και προσγείωσης σε περιορισμένους χώρους, τα καθιστά πιο πρακτικά και αποδοτικά από τα παραδοσιακά μέσα μεταφοράς. Αυτό διευκολύνει τις μετακινήσεις σε περιοχές όπου οι υποδομές είναι περιορισμένες ή ανύπαρκτες.

Η χρήση των eVTOLs μπορεί επίσης να ενισχύσει την καινοτομία και την ανταγωνιστικότητα των εταιρειών. Εταιρείες που υιοθετούν τέτοιες τεχνολογίες μπορούν να προσελκύσουν πελάτες και επενδυτές, αναδεικνύοντας την εικόνα τους ως πρωτοπόροι και καινοτόμοι στον κλάδο.

Τέλος, τα eVTOLs μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάβαση σε αυτόνομα συστήματα. Ο συνδυασμός τους με τεχνολογίες αυτόνομης πλοήγησης και τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα των επιχειρήσεων, μειώνοντας παράλληλα τον ανθρώπινο παράγοντα κινδύνου και ενισχύοντας την ασφάλεια των επιχειρήσεων.

2 Τεχνολογική ανασκόπηση

2.1 Ιστορία και εξέλιξη των eVTOLs, τρέχουσα τεχνολογία και δυνατότητες

Η έννοια της κάθετης απογείωσης και προσγείωσης (VTOL) χρονολογείται από τις αρχές του 20ού αιώνα με την εμφάνιση των ελικοπτέρων, τα οποία έθεσαν τη βάση για την κάθετη αεροπορία. Ωστόσο, η μετάβαση στα ηλεκτρικά οχήματα κάθετης απογείωσης και προσγείωσης (eVTOL) ξεκίνησε τον 21ο αιώνα, χάρη στις προόδους στον εξηλεκτρισμό, τα ελαφρά υλικά και τις αυτόνομες τεχνολογίες.

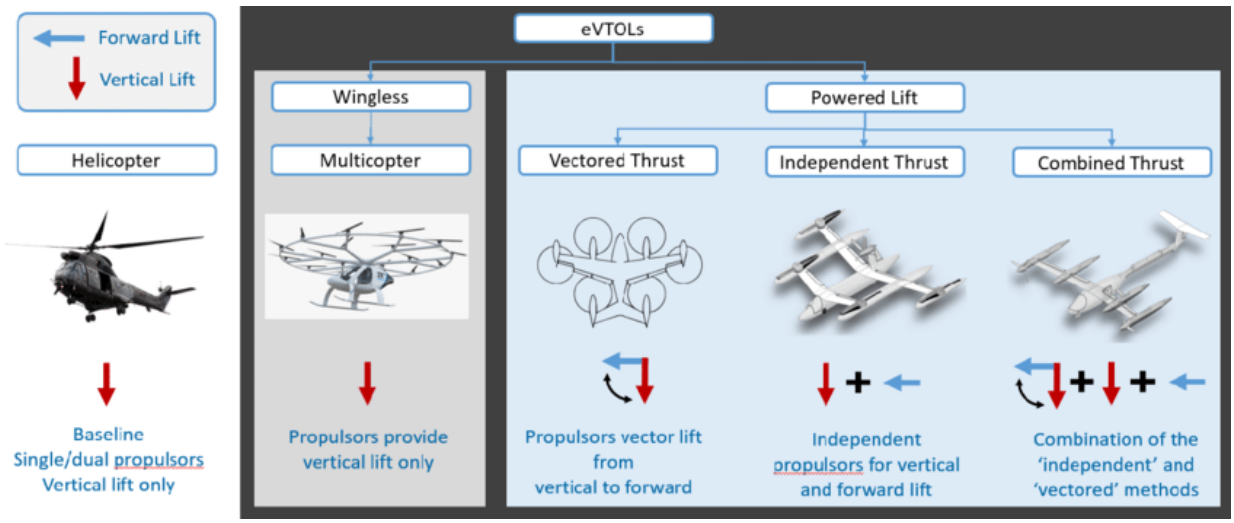
Εξέλιξη των eVTOLs:

1960–1990: Η ιδέα της ηλεκτρικής πρόωσης στην αεροπορία εξετάστηκε σε πειραματικά αεροσκάφη, αλλά η έλλειψη αποδοτικών μπαταριών και ελαφρών υλικών περιόρισε την πρόοδο.
2000: Η εισαγωγή των μπαταριών ιόντων λιθίου και οι εξελίξεις στην απόδοση των ηλεκτρικών κινητήρων παρείχαν τη βάση για τη σύγχρονη ανάπτυξη των eVTOLs.
2010: Η άνοδος της αστικής εναέριας κινητικότητας (Urban Air Mobility - UAM) τόνωσε το ενδιαφέρον για τα eVTOLs ως λύση στην κυκλοφοριακή συμφόρηση. Εταιρείες όπως η Joby Aviation και η Volocopter άρχισαν να αναπτύσσουν πρωτότυπα, με σημαντικές επενδύσεις από ιδιωτικούς και δημόσιους φορείς.
2020: Η βιομηχανία eVTOL εισήλθε σε φάση ταχείας ανάπτυξης. Με σημαντικά ορόσημα που περιλαμβάνουν την πιστοποίηση και τις δοκιμές πρωτοτύπων. Ρυθμιστικές αρχές όπως η FAA και η EASA ξεκίνησαν να συντάσσουν απαιτήσεις πιστοποίησης για τα eVTOLs. Έτσι, εταιρείες δοκίμασαν επιτυχημένα πρωτότυπα, όπως το Lilium Jet, το Vertical Aerospace VX4, Joby Aviation eVTOL κ.α. που αναφέρονται παρακάτω.

Κύρια χαρακτηριστικά των eVTOLs

1. Συστήματα Πρόωσης

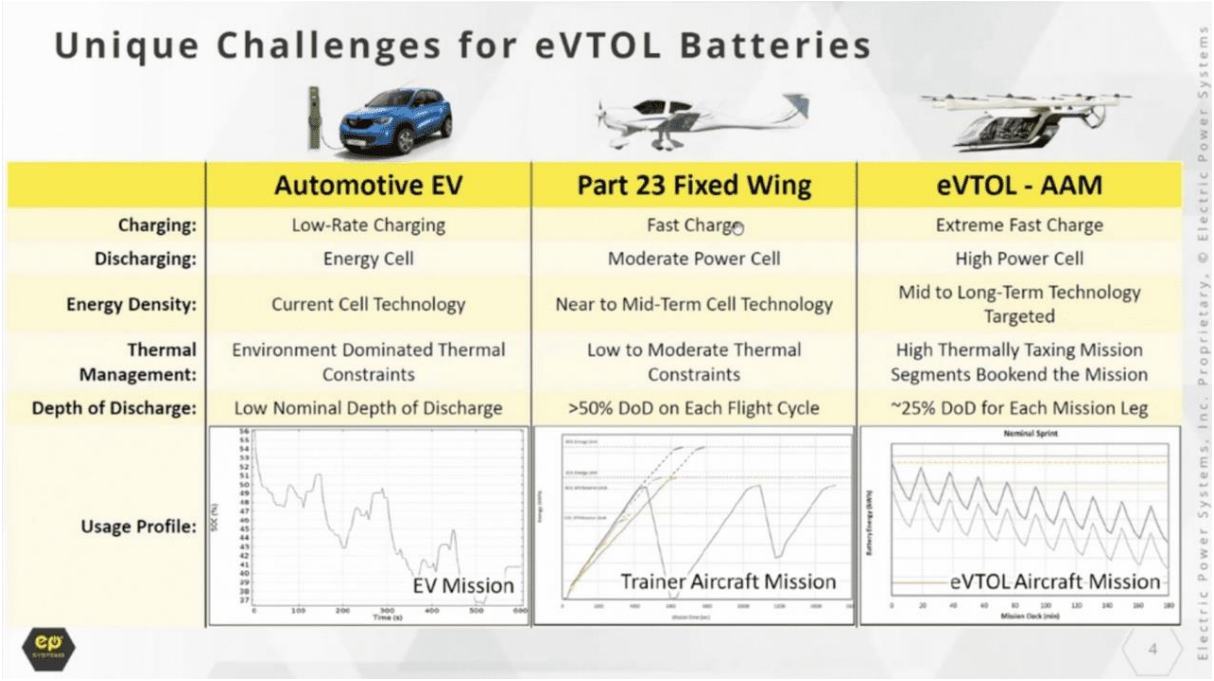
Τα συστήματα πρόωσης αποτελούν τον πυρήνα της λειτουργίας των eVTOLs. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα eVTOLs είναι μια καθαρή και αθόρυβη εναλλακτική έναντι των παραδοσιακών κινητήρων εσωτερικής καύσης, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική είναι Κατανεμημένη Ηλεκτρική Πρόωση (DEP). Η χρήση πολλαπλών ρότορων ή ελίκων, κατανεμημένων στο αεροσκάφος, ενισχύει τη σταθερότητα, την ασφάλεια και την αποδοτικότητα. Ορισμένα μοντέλα ενσωματώνουν παραδοσιακούς κινητήρες σε συνδυασμό με ηλεκτρική πρόωση (υβριδικά συστήματα) για μεγαλύτερη αυτονομία, καθιστώντας τα κατάλληλα για μεγαλύτερες αποστάσεις.



Εικόνα 1: eVTOL Propulsion Configurations [1]

2. Τεχνολογία Μπαταριών

Οι μπαταρίες αποτελούν ζωτικό στοιχείο για την ενεργειακή απόδοση και την αυτονομία των eVTOLs. Η επικρατέστερη τεχνολογία σήμερα είναι μπαταρίες ιόντων λιθίου, προσφέροντας υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και χαμηλό βάρος. Όμως, η έρευνα επικεντρώνεται και σε νέες εναλλακτικές, σε στερεάς κατάστασης μπαταρίες και προηγμένες χημείες, που υπόσχονται αυξημένη ενεργειακή απόδοση, μικρότερους χρόνους φόρτισης και μεγαλύτερη ασφάλεια. Με βάση την υπάρχουσα τεχνολογία η αυτονομία των eVTOLs κυμαίνεται συνήθως από 30 έως 160 χιλιόμετρα, καλύπτοντας τις ανάγκες για αστικές και περιφερειακές πτήσεις.



Εικόνα 2: Σύγκριση μπαταριών eVTOL με ηλεκτρικά αυτοκίνητα και συμβατικά ηλεκτρικά αεροπλάνα [2]

3. Σύστημα Ελέγχου Πτήσης και Αυτονομία

Τα eVTOLs ενσωματώνουν προηγμένα συστήματα ελέγχου για τη βελτίωση της πλοήγησης και της ασφάλειας. Τέτοια είναι τα συστήματα Fly-by-Wire, εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα που επιτρέπουν την ακριβή και αξιόπιστη λειτουργία. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι τα περισσότερα eVTOLs σχεδιάζονται για αυτόνομη ή ημιαυτόνομη λειτουργία, μειώνοντας την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης (πιλότοι) και αυξάνοντας την ασφάλεια. Επίσης, η Τεχνητή Νοημοσύνη (ΤΝ) συμβάλλει στην πλοήγηση, τη διαχείριση κυκλοφορίας και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την ασφάλεια.

4. Σχεδιασμός και Υλικά

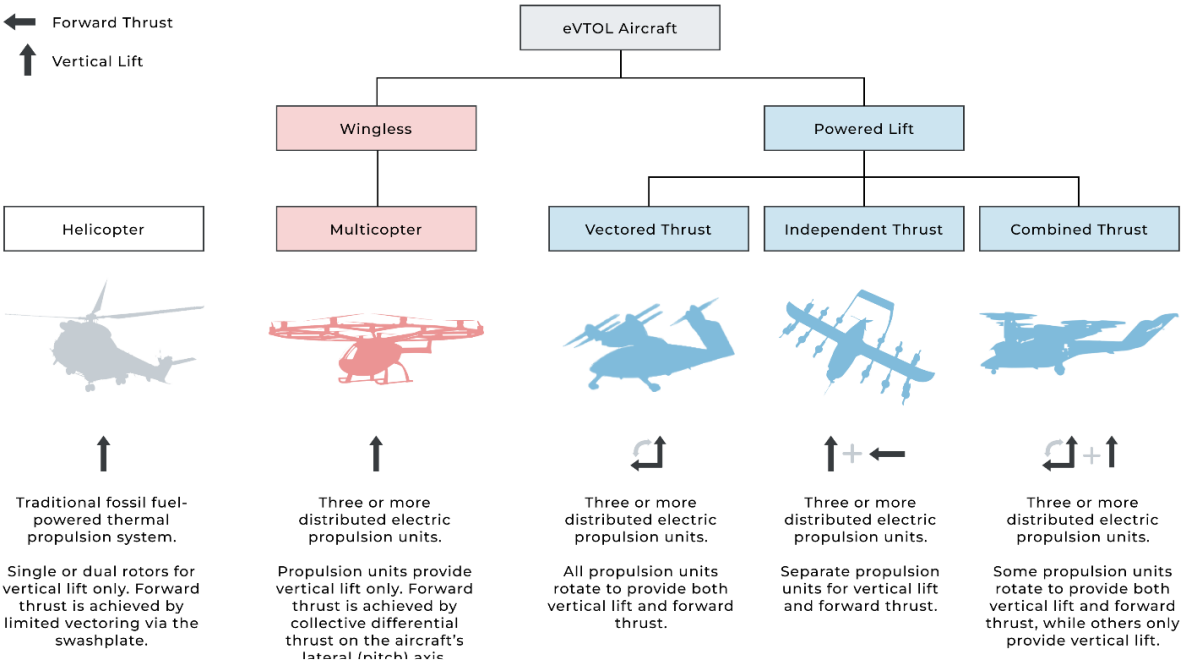
Ο σχεδιασμός και τα υλικά παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποδοτικότητα και την αντοχή των eVTOL. Η χρήση σύνθετων υλικών και προηγμένων κραμάτων μειώνει το βάρος, χωρίς να επηρεάζεται η ανθεκτικότητα. Τα eVTOLs είναι συμπαγείς σχεδιασμοί, βελτιστοποιημένα για χρήση σε αστικά περιβάλλοντα, απαιτώντας ελάχιστο χώρο για απογείωση και προσγείωση.

5. Μείωση Θορύβου

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των eVTOL είναι η χαμηλή στάθμη θορύβου. Η κατανεμημένη πρόωση και οι αθόρυβοι κινητήρες τα καθιστούν ιδανικά για λειτουργία σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, μειώνοντας την ηχορύπανση.

6. Επιχειρησιακές Δυνατότητες

Τα eVTOLs είναι σχεδιασμένα για να καλύπτουν ποικίλες επιχειρησιακές ανάγκες. Η Κάθετη Απογείωση και Προσγείωση επιτρέπουν τη λειτουργία σε περιορισμένους χώρους, όπως στέγες κτιρίων, ελικοδρόμια και χώρους στάθμευσης. Η χωρητικότητα τους κυμαίνεται από 2 έως 6 επιβάτες ή αντίστοιχο φορτίο, καθιστώντας τα κατάλληλα για μεταφορές, logistics και ιατρικές εκκενώσεις. Με ταχύτητες πλεύσης 160–320 χλμ/ώρα, τα eVTOLs προσφέρουν ταχεία μετακίνηση πάνω από κυκλοφοριακές συμφορήσεις. Λεπτομέρειες των χαρακτηριστικών κάθε μοντέλου αναφέρονται παρακάτω.



Εικόνα 3: Διαφορετικά concept eVTOL αεροπλάνα που έχουν παρουσιαστεί ως σήμερα[3]

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι στη Σιγκαπούρη μια εταιρεία έχει αναπτύξει drones μεγάλης κλίμακας (F-drones), ικανά να μεταφέρουν φορτία έως 100 κιλά σε αποστάσεις 100 χιλιομέτρων, εξυπηρετώντας πλοία και υπεράκτιες πλατφόρμες.

Εικόνα 4: Χρήση drones για μεταφορά φορτίων σε πλοία στην Σιγκαπούρη[4]

2.2 Παραδοσιακές μέθοδοι μεταφοράς επιβατών

Οι παραδοσιακές μέθοδοι μεταφοράς επιβατών περιλαμβάνουν μια ποικιλία μέσων που χρησιμοποιούνται τόσο σε χερσαίες, θαλάσσιες όσο και σε αεροπορικές εφαρμογές, ανάλογα με τις γεωγραφικές και επιχειρησιακές απαιτήσεις. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν κυρίως αυτοκίνητα, λεωφορεία, τρένα, πλοία, ferry, αεροπλάνα και ελικόπτερα, κάθε ένα από τα οποία

εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες μεταφοράς επιβατών, από αστικές μετακινήσεις έως σύνδεση απομακρυσμένων περιοχών και ναυτιλιακές εφαρμογές.

Στον τομέα των αστικών μετακινήσεων, τα αυτοκίνητα και τα λεωφορεία αποτελούν βασικές επιλογές λόγω της ευελιξίας και της ευρείας διαθεσιμότητάς τους. Ωστόσο, αυτά τα μέσα συχνά αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως η κυκλοφοριακή συμφόρηση, οι υψηλές εκπομπές ρύπων και η ανάγκη για εκτεταμένες υποδομές, όπως δρόμοι και χώροι στάθμευσης. Τα τρένα, από την άλλη πλευρά, προσφέρουν υψηλή χωρητικότητα και αποδοτικότητα για τη μεταφορά μεγάλου αριθμού επιβατών, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές ή σε διαδρομές μεγάλων αποστάσεων. Παρόλα αυτά, η λειτουργία τους περιορίζεται από την ύπαρξη σιδηροδρομικών δικτύων και σταθμών, καθιστώντας τα λιγότερο ευέλικτα για απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές.

Στη ναυτιλιακή βιομηχανία, η μεταφορά επιβατών, συμπεριλαμβανομένων των πληρωμάτων, βασίζεται κυρίως σε πλοία, ferry και μικρότερα σκάφη. Αυτά τα μέσα χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση παράκτιων περιοχών, νησιών ή για τη μεταφορά πληρωμάτων σε πλοία ανοιχτής θαλάσσης και πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου. Παρά την αξιοπιστία τους, τα σκάφη απαιτούν συχνά σημαντικό χρόνο ταξιδιού, ειδικά σε μεγάλες αποστάσεις ή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, ενώ η κατανάλωση καυσίμων συμβάλλει στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τα ελικόπτερα προσφέρουν μεγαλύτερη ταχύτητα και την ικανότητα προσγείωσης σε περιορισμένους χώρους, όπως καταστρώματα πλοίων. Ωστόσο, τα ελικόπτερα έχουν υψηλό λειτουργικό κόστος, απαιτούν εξειδικευμένη συντήρηση και καταναλώνουν σημαντικές ποσότητες καυσίμων, επηρεάζοντας τη βιωσιμότητά τους. Ομοίως, τα αεροπλάνα προσφέρουν μεγάλη ταχύτητα, αλλά έχουν υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα και λειτουργικό κόστος.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι μεταφοράς, αν και αποτελεσματικές σε πολλές περιπτώσεις, αντιμετωπίζουν περιορισμούς που σχετίζονται με την ταχύτητα, το κόστος, την περιβαλλοντική επιβάρυνση και την ανάγκη για εκτεταμένες υποδομές. Για παράδειγμα, η μεταφορά επιβατών σε απομακρυσμένες περιοχές συχνά περιορίζεται από την έλλειψη κατάλληλων υποδομών, όπως λιμάνια ή αεροδρόμια. Επιπλέον, η εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα για τα περισσότερα από αυτά τα μέσα καθιστά αναγκαία τη μείωση των εκπομπών άνθρακα, καθώς οι διεθνείς κανονισμοί και οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις γίνονται όλο και πιο αυστηροί.

Η εισαγωγή των eVTOLs προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση, συνδυάζοντας την ευελιξία των ελικοπτέρων με τη βιωσιμότητα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους, τα eVTOLs μπορούν να λειτουργήσουν σε περιορισμένους χώρους χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων υποδομών, μειώνοντας ταυτόχρονα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το λειτουργικό κόστος. Η σύγκριση των παραδοσιακών μεθόδων με τα eVTOLs αποτελεί κρίσιμο βήμα για την κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων που σχετίζονται με την υιοθέτησή τους σε διάφορες εφαρμογές, από αστικές μετακινήσεις έως ναυτιλιακές δραστηριότητες.

2.3 Μοντέλα eVTOL

Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση των eVTOLs αναφέρονται παρακάτω:

1) Αυτονομία: Επαρκής αυτονομία για την κάλυψη των ζητούμενων αποστάσεων.
2) Χωρητικότητα: Χώρος για επιβάτες ή φορτία, ανάλογα με τη χρήση.
3) Σταθερότητα και Αντίσταση στον Άνεμο: Αναγκαίο για επιχειρήσεις σε δύσκολες συνθήκες.
4) Μικρό Μέγεθος και Βάρος: Εύκολη αποθήκευση και μεταφορά.
5) Ασφάλεια και Πιστοποίηση: Προτεραιότητα σε μοντέλα που είναι ήδη σε φάση δοκιμών και πιστοποίησης.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια τα μοντέλα που επιλέχθηκαν για μελέτη είναι τα εξής:

2.3.1 Joby Aviation eVTOL[5]

Το eVTOL της Joby Aviation αποτελεί ένα από τα πιο προηγμένα και εμπορικά βιώσιμα eVTOL αεροσκάφη που βρίσκονται σήμερα σε ανάπτυξη. Παρακάτω περιγράφονται τα βασικά τεχνικά του χαρακτηριστικά όπως και το γιατί είναι κατάλληλο για ναυτιλιακή χρήση.

Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά
Αυτονομία: ~150 μίλια (~240 km) με μία φόρτιση.
Μέγιστη Ταχύτητα: ~200 mph (~320 km/h).
Χωρητικότητα: Σχεδιασμένο να μεταφέρει 4 επιβάτες και έναν πιλότο.
Configuration: Έξι περιστρεφόμενοι ηλεκτρικοί έλικες που παρέχουν τόσο ανύψωση όσο και προώθηση. Διαθέτει σταθερή πτέρυγα για αποδοτική πτήση κατά τη διάρκεια μεγάλων αποστάσεων.

Απαιτήσεις Ενέργειας
Χωρητικότητα Μπαταρίας: Εκτιμάται περίπου στις 200-300 kWh, βασισμένο στην αυτονομία του αεροσκάφους (~150 μίλια) και την αποδοτικότητά του.
Ενέργεια ανά Κύκλο Φόρτισης: Για πλήρη φόρτιση της μπαταρίας, απαιτούνται περίπου 200-300 kWh.
Κατανάλωση Ενέργειας: Η ενέργεια που καταναλώνεται ανά μίλι εκτιμάται στις 1-2 kWh, ανάλογα με παράγοντες όπως το φορτίο και οι συνθήκες λειτουργίας.

Χρόνος και υποδομές φόρτισης
Το eVTOL της Joby έχει σχεδιαστεί για συμβατότητα με συστήματα DC γρήγορης φόρτισης. Ο χρόνος φόρτισης εκτιμάται περίπου στα 30-45 λεπτά για πλήρη φόρτιση, με χρήση σταθμών γρήγορης φόρτισης υψηλής ισχύος, συνήθως ισχύος 400-600 kW. Μερική φόρτιση (π.χ. 50%) μπορεί να διαρκέσει μόλις 15-20 λεπτά, εξυπηρετώντας γρήγορες ανατροπές μεταξύ πτήσεων. Οι σταθμοί γρήγορης φόρτισης μπορούν να τοποθετηθούν σε θαλάσσιους κόμβους ή πάνω σε μεγάλα πλοία.
Αντίστοιχα, με τη χρήση σταθμών κανονικής φόρτισης, σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος (π.χ. φορτιστές 50-100 kW), η πλήρης φόρτιση μπορεί να διαρκέσει 2-4 ώρες. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για λιγότερο επείγουσες λειτουργίες ή νυχτερινή φόρτιση.

Πλεονεκτήματα για Θαλάσσια Χρήση
Το Joby Aviation eVTOL διαθέτει ανθεκτικό σχεδιασμός στη διάβρωση, παρόλο που αναπτύχθηκε κυρίως για αστική εναέρια μετακίνηση, τα προηγμένα υλικά και ο σχεδιασμός

του μπορούν να προσαρμοστούν για αντοχή στην έκθεση σε αλμυρό νερό, για παράδειγμα προσθήκη επιπλέον επιστρώσεων.
Επίσης, έχει υψηλή απόδοση σε διάφορες συνθήκες, ο σχεδιασμός με σταθερές πτέρυγες εξασφαλίζει αποδοτική πτήση σε μεγάλες αποστάσεις, καθιστώντας το κατάλληλο για σύνδεση παράκτιων πόλεων ή υπεράκτιων εγκαταστάσεων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η αθόρυβη λειτουργία.
Τα επίπεδα θορύβου είναι εξαιρετικά χαμηλά σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ελικόπτερα, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για ευαίσθητα σε θόρυβο περιβάλλοντα. Κατά τη διάρκεια της προσγείωσης και της απογείωσης σε μια απόσταση 100 m ο θόρυβος είναι 65 dBA, ενώ κατά τη διάρκεια της πτήσης μόλις 40 dBA. Αυτό το καθιστά 100 φορές πιο αθόρυβο από ένα ελικόπτερο.
Τέλος, αν και αρχικά πιλότος θα το χειρίζεται, η Joby σχεδιάζει ημι-αυτόνομες ή πλήρως αυτόνομες λειτουργίες, μειώνοντας το κόστος.

Ασφάλεια και Αξιοπιστία
Το Joby Aviation eVTOL έχει σχεδιαστεί με εφεδρικά συστήματα. Οι πολλαπλοί ηλεκτροκινητήρες εξασφαλίζουν αξιοπιστία. Ακόμα και αν ένας κινητήρας αποτύχει, δεν επηρεάζεται η ασφάλεια. Επίσης, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης είναι σχεδιασμένο με μηχανισμούς ασφαλείας, όπως δυνατότητα ανεμοπορίας σε περίπτωση απώλειας ισχύος. Τέλος είναι κατασκευασμένο για να λειτουργεί σε διάφορες καιρικές συνθήκες.

Πρόοδος πιστοποίησης
Η Joby Aviation προχωρά με τη διαδικασία πιστοποίησης του ηλεκτρικού αεροσκάφους κάθετης απογείωσης και προσγείωσης από την Federal Aviation Administration (FAA). Η διαδικασία περιλαμβάνει πέντε στάδια. Τον Φεβρουάριο του 2024, η Joby έγινε ο πρώτος κατασκευαστής eVTOL που ολοκλήρωσε το τρίτο στάδιο της διαδικασίας πιστοποίησης και στοχεύει να ολοκληρώσει τη διαδικασία και να ξεκινήσει εμπορικές επιχειρήσεις μέσα στο 2025.

Εικόνα 5: Joby Aviation eVTOL

2.3.2 Lilium Jet[6]

Το Lilium Jet αναπτύσσεται από την Lilium GmbH, μια γερμανική αεροπορική εταιρεία. Ξεχωρίζει για τον καινοτόμο σχεδιασμό του με ηλεκτρικούς αεραγωγούς (ducted electric fans), ο οποίος προσφέρει συνδυασμό αποδοτικότητας, ασφάλειας και μείωσης θορύβου.

Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά
Αυτονομία: 155 μίλια (250 km) με μία μόνο φόρτιση
Μέγιστη ταχύτητα: 186 mph (300 km/h),
Χωρητικότητα: Σχεδιασμένο να μεταφέρει έως έξι επιβάτες και έναν πιλότο στην αρχική του έκδοση με χειριστή.
Configuration: Χρησιμοποιεί 36 ηλεκτρικούς αεραγωγούς κατανεμημένους στα φτερά για κάθετη απογείωση και αποδοτική πτήση προς τα εμπρός. Με αποτέλεσμα την ομαλή μετάβαση μεταξύ αιώρησης και πλεύσης.

Απαιτήσεις Ενέργειας
Χωρητικότητα Μπαταρίας: Διαθέτει μπαταρία συνολικής χωρητικότητας 200-250 kWh, προσφέροντας αυτονομία έως 155 μίλια.
Ενέργεια ανά Κύκλο Φόρτισης: Για πλήρη φόρτιση της μπαταρίας, απαιτούνται περίπου 200-250 kWh.
Κατανάλωση Ενέργειας: Η ενέργεια που καταναλώνεται ανά μίλι εκτιμάται στις 1-2 kWh, ανάλογα με παράγοντες όπως το φορτίο και οι συνθήκες λειτουργίας.
Επίσης, οι μπαταρίες του Lilium Jet είναι σχεδιασμένες για 1.500-2.000 πλήρεις κύκλους φόρτισης, που αντιστοιχούν σε αρκετά χρόνια λειτουργίας πριν από την ανάγκη αντικατάστασης.

Χρόνος και υποδομές φόρτισης
Το Lilium Jet χρησιμοποιεί μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας λιθίου-ιόντων οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για γρήγορη φόρτιση (DC Chargers), ώστε να υποστηρίζουν ταχεία ανατροπή στις λειτουργικές ρυθμίσεις. Οι φορτιστές υψηλής ισχύος DC, με ισχύ 350-450 kW, μπορούν να φορτίσουν πλήρως τη μπαταρία σε περίπου 30-60 λεπτά. Η μερική φόρτιση (π.χ. 50-75%) μπορεί να διαρκέσει μόλις 15-30 λεπτά, εξυπηρετώντας τις ανάγκες ταχείας ανατροπής. Για κανονική φόρτιση, με φορτιστές ισχύος 50-100 kW, η πλήρης φόρτιση μπορεί να διαρκέσει 2-5 ώρες. Ενδεικτικά, για μια τυπική πτήση 100-150 μιλίων, απαιτούνται περίπου 150-200 kWh ενέργειας, καθιστώντας τη γρήγορη φόρτιση απαραίτητη για την αποδοτικότητα.

Πλεονεκτήματα για Θαλάσσια Χρήση
Το Lilium Jet μειώνει σημαντικά τον χρόνο ταξιδιού σε σύγκριση με τα πλοία ή τα παραδοσιακά ελικόπτερα και σε συνδυασμό με τους σύντομους χρόνους φόρτισης (30–60 λεπτά για πλήρη φόρτιση) επιτρέπουν γρήγορα ‹‹πηγαινέλα››, καθιστώντας το βιώσιμο για συχνές και απαιτητικές επιχειρήσεις. Επιπλέον, Η πλήρως ηλεκτρική πρόωση εξασφαλίζει μηδενικές άμεσες εκπομπές, μειώνοντας τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, όπως και ο σχεδιασμός με αεραγωγούς (ducted fans) μειώνει τη ρύπανση από θόρυβο, κάτι που ωφελεί περιοχές κοντά σε λιμάνια.

Ασφάλεια και Αξιοπιστία
Για να εξασφαλίσει την ασφάλεια η Lilium έχει σχεδιάσει το jet με πολλαπλούς αεραγωγούς που παρέχουν πλεονασμό. Η αποτυχία ενός μόνο αεραγωγού δεν επηρεάζει την ασφάλεια της πτήσης. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι η ηλεκτρική πρόωση επιτρέπει ακριβή έλεγχο, ακόμα και σε θυελλώδεις ή ασταθείς θαλάσσιες συνθήκες. Επίσης, διαθέτει προηγμένο έλεγχος πτήσης με εξελιγμένο σύστημα fly-by-wire που εξασφαλίζει σταθερότητα και ακριβή έλεγχο σε όλες τις φάσεις της πτήσης. Τέλος, σε κατάσταση ανάγκης είναι εξοπλισμένο με εφεδρική ισχύ και δυνατότητα ανεμοπορίας (ικανότητά του να διατηρεί ελεγχόμενη πτήση χωρίς ισχύ) σε περίπτωση απώλειας ισχύος.

Πρόοδος πιστοποίησης
Η Lilium επιδιώκει ενεργά πιστοποίηση από την EASA (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Ασφάλειας της Αεροπορίας) και την FAA. Συγκεκριμένα, σχεδιάζει να πληροί τα πρότυπα της SC-VTOL (Ειδική Συνθήκη για VTOL Αεροσκάφη) της EASA. Η εμπορική υπηρεσία έχει στόχο να ξεκινήσει το 2025, ανάλογα με την πρόοδο της πιστοποίησης. Μέσα στους επόμενους μήνες θα ξεκινήσουν οι δοκιμές πτήσης για το πρωτότυπο αεροσκάφος που έχει παραχθεί.

Εικόνα 6: Lilium Jet eVTOL

2.3.3 Vertical Aerospace VX4[7]

Το Vertical Aerospace VX4 αναπτύχθηκε από την εταιρεία Vertical Aerospace με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο και αποτελεί ένα πλήρως ηλεκτρικό αεροσκάφος μηδενικών εκπομπών που στοχεύει να προσφέρει αποδοτική, αθόρυβη και οικονομική μετακίνηση.

Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά
Αυτονομία: έως 100 μίλια (161 km) με μία μόνο φόρτιση.
Μέγιστη ταχύτητα: περίπου 150 mph (241 km/h).
Χωρητικότητα Επιβατών: Σχεδιασμένο να μεταφέρει έως 4 επιβάτες και έναν πιλότο.
Configuration: Εξοπλισμένο με οκτώ έλικες που τροφοδοτούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες. Σχεδιασμένο με σταθερά φτερά (fixed-wing) για αποδοτική πτήση προς τα εμπρός και ομαλή μετάβαση μεταξύ αιώρησης και πλεύσης.

Απαιτήσεις Ενέργειας
Χωρητικότητα Μπαταρίας: Εκτιμάται στις 100–120 kWh για αυτονομία 100 μιλίων (160 km).
Ενέργεια ανά Κύκλο Φόρτισης: Για πλήρη φόρτιση της μπαταρίας το αεροσκάφος καταναλώνει περίπου 100–120 kWh ενέργειας.
Κατανάλωση Ενέργειας: Μέση κατανάλωση ενέργειας περίπου 0.8–1.2 kWh ανά μίλι, ανάλογα με το φορτίο και τις συνθήκες πτήσης.

Χρόνος και υποδομές φόρτισης
Το VX4 είναι εξοπλισμένο με προηγμένη τεχνολογία μπαταριών που υποστηρίζει ταχεία φόρτιση, μειώνοντας στο ελάχιστο τον χρόνο αδράνειας μεταξύ πτήσεων. Για σημαντική φόρτιση (π.χ. 80%), ο χρόνος φόρτισης μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 30 λεπτών και 1 ώρας, ανάλογα με την υποδομή και την ισχύ εξόδου των σταθμών φόρτισης. Για πλήρη φόρτιση στο

100%, απαιτούνται 1 έως 2 ώρες, ανάλογα με τις δυνατότητες του συστήματος φόρτισης και τη διαχείριση της ενέργειας.

Πλεονεκτήματα για Θαλάσσια Χρήση

Το VX4 έχει σχεδιαστεί κυρίως για αστική αερομεταφορά, ωστόσο ορισμένες δυνατότητές του υποδεικνύουν πιθανή προσαρμογή για ναυτική χρήση. Ένα από τα πλεονεκτήματα είναι ότι διαθέτει αθόρυβο σύστημα πρόωσης, εκτιμάται ότι παράγει <45 dBA κατά την πτήση, σημαντικά πιο αθόρυβο από τα παραδοσιακά ελικόπτερα. Όπως και παράγει μηδενικές εκπομπές με την χρήση πλήρως ηλεκτρικού σχεδιασμού, αυτό ταιριάζει με τους στόχους βιωσιμότητας πολλών ναυτικών επιχειρήσεων, ειδικά σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες ζώνες. Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει περιορισμός στην αυτονομία, με περίπου 161 km (100 μίλια), το VX4 είναι κατάλληλο για μικρές αποστάσεις.

Ασφάλεια και Αξιοπιστία

Το VX4 ενσωματώνει μια σειρά από προηγμένα χαρακτηριστικά ασφάλειας για την εξασφάλιση ασφαλών και αξιόπιστων πτήσεων. Συγκεκριμένα, με την αρχή της Διανεμημένης Ηλεκτρικής Πρόωσης (DEP) χρησιμοποιεί οκτώ ηλεκτρικούς έλικες που του παρέχουν πλεονασμό. Σε περίπτωση βλάβης ενός ή περισσοτέρων ελίκων ή κινητήρων, οι υπόλοιποι μπορούν να προσγειώσουν με ασφάλεια το αεροσκάφος. Επίσης, διαθέτει πολλές μπαταρίες που διασφαλίζουν συνεχή παροχή ισχύος ακόμη και σε περίπτωση βλάβης ενός από αυτά. Τέλος, σε περίπτωση ανάγκης υπάρχει η δυνατότητα ανεμοπορίας για ασφαλείς προσγειώσεις σε περίπτωση απώλειας ισχύος και είναι εξοπλισμένο με προηγμένους αισθητήρες και συστήματα αυτόματου πιλότου από την Honeywell που βοηθούν σε τέτοιες καταστάσεις.

Πρόοδος πιστοποίησης

Η Vertical Aerospace στοχεύει σε πλήρη πιστοποίηση του VX4 μέχρι το τέλος του 2026. Τον Μάρτιο του 2023, έγινε ο πρώτος κατασκευαστής eVTOL που έλαβε DOA (Design Organisation Approval) από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας του Ηνωμένου Βασιλείου (CAA). Επιτυχημένες αρχικές δοκιμές πτήσης έχουν ήδη πραγματοποιηθεί, επικυρώνοντας τον σχεδιασμό και την απόδοση του αεροσκάφους. Από τον Νοέμβριο του 2024, το VX4 έχει ξεκινήσει τη δεύτερη φάση των δοκιμών πτήσης με πιλότο, πραγματοποιώντας επιτυχώς κάθετες απογειώσεις και προσγειώσεις.

Εικόνα 7: Vertical Aerospace VX4 eVTOL

2.3.4 EHang 216[8]

Το EHang 216 έχει αναπτυχθεί από την κινεζική εταιρεία EHang και προσφέρει μια βιώσιμη και αποδοτική εναλλακτική λύση για μετακινήσεις μικρών αποστάσεων.

Βασικά Τεχνικά Χαρακτηριστικά
Αυτονομία: Έχει αυτονομία 35 km (21.7 μίλια) με διάρκεια πτήσης περίπου 21 λεπτά.
Μέγιστη ταχύτητα: Έως 130 km/h (81 mph).
Χωρητικότητα: Σχεδιασμένο για 2 επιβάτες και έξτρα φορτίο έως 220 κιλά.
Μέγιστο Υψόμετρο: Μπορεί να επιχειρεί σε υψόμετρα έως 3.000 m (9.843 ft).
Configuration: Εξοπλισμένο με 16 ηλεκτρικούς κινητήρες που κινούν 16 έλικες σε διάταξη διπλών λεπίδων (coaxial).

Απαιτήσεις Ενέργειας
Χωρητικότητα Μπαταρίας: Τροφοδοτείται από σύστημα μπαταρίας 17 kWh λιθίου-ιόντων.
Ενέργεια ανά Κύκλο Φόρτισης: Για μια τυπική πτήση 35 χλμ (22 μιλίων), η κατανάλωση ενέργειας είναι περίπου 14–17 kWh, που αντιστοιχεί σχεδόν στην πλήρη χωρητικότητα της μπαταρίας.
Κατανάλωση Ενέργειας: Απαιτεί περίπου 0.8–1 kWh ανά χιλιόμετρο, ανάλογα με το φορτίο, τις συνθήκες ανέμου και το υψόμετρο πτήσης.

Χρόνος και υποδομές φόρτισης
Η τρέχουσα έκδοση του EHang 216 απαιτεί περίπου 2 ώρες για πλήρη φόρτιση της μπαταρίας του, 17 kWh. Με διάφορες συνεργασίες για την ανάπτυξη υπερταχείας φόρτισης έχει στόχο τη μείωση του χρόνου φόρτισης από 30% σε 80% της φόρτισης σε λιγότερο από 10 λεπτά. Ταυτόχρονα, μέσα στο 2025 η EHang στοχεύει στην ενσωμάτωση μπαταριών στερεάς κατάστασης υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, οι οποίες θα μπορούσαν να αυξήσουν τον χρόνο πτήσης από 21 λεπτά σε 48 λεπτά.

Πλεονεκτήματα για Θαλάσσια Χρήση
Το EHang 216 έχει δυνατότητες για ναυτική χρήση χάρη στον συμπαγή σχεδιασμό του, το ελαφρύ του σχέδιο και το μικρό του αποτύπωμα το καθιστούν πρακτικό για λειτουργία πάνω σε πλοία ή άλλες υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Το πλήρως ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης του παράγει μηδενικές εκπομπές έτσι ευθυγραμμίζεται με τους στόχους βιωσιμότητας στη ναυτιλία, ειδικά για οικολογικά ευαίσθητες λειτουργίες. Επίσης, το αυτόνομο σύστημα μειώνει την ανάγκη για εξειδικευμένους πιλότους, διευκολύνοντας την ανάπτυξή του σε ναυτικά περιβάλλοντα.

Ασφάλεια και Αξιοπιστία
Το EHang 216 διαθέτει πολλαπλά συστήματα πρόωσης και ελέγχου πτήσης, που διασφαλίζουν τη συνέχιση της πτήσης ακόμα και σε περίπτωση βλάβης. Επίσης, είναι εξοπλισμένο με μηχανισμούς ασφαλείας που διαχειρίζονται αποτελεσματικά πιθανές βλάβες. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι λειτουργεί αυτόνομα, μειώνοντας τα περιθώρια ανθρώπινου λάθους και εξασφαλίζοντας ακρίβεια στις πτητικές επιχειρήσεις.

Πρόοδος πιστοποίησης
Το EHang 216 έχει επιτύχει σημαντικά ορόσημα όσον αφορά την πιστοποίηση, ιδιαίτερα στην Κίνα. Τον Οκτωβρίου του 2023 έλαβε την πρώτη πιστοποίηση τύπου για μη επανδρωμένα eVTOL από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας της Κίνας (CAAC). Τον Απρίλιο του 2024 έλαβε από την ίδια υπηρεσία πιστοποιητικό παραγωγής ώστε να ξεκινήσει μαζική παραγωγή του αεροσκάφους. Πρόκειται για το πρώτο επιβατηγό, μη επανδρωμένο eVTOL αεροσκάφος παγκοσμίως που έχει λάβει τέτοιες εγκρίσεις.

Εικόνα 8: EHang 216 eVTOL

Βασικές Βελτιώσεις για Θαλάσσια Χρήση που Πρέπει να Ληφθούν Υπόψη:

Σε όλα τα παραπάνω μοντέλα που εξετάστηκαν είναι απαραίτητες κάποιες τροποποιήσεις για να κριθούν κατάλληλα για θαλάσσια χρήση, ώστε να καταστεί εφικτή η χρήση τους στην Ελλάδα και ειδικά στην νησιωτική. Μερικές βελτιώσεις προτείνονται παρακάτω και θα ληφθούν υπόψη στο κόστος της παρούσας μελέτης.

- Αντοχή στη Διάβρωση: Ειδικά υλικά ή επιχρίσματα για να αντέχουν στην έκθεση σε αλμυρό νερό.
- Αδιαβροχοποίηση: Σφράγιση κρίσιμων εξαρτημάτων για την αποφυγή εισροής νερού σε υγρές ή βροχερές συνθήκες.
- Δυνατότητα Ελλιμενισμού: Συμβατότητα με ελικοδρόμια ή προσαρμοσμένους σταθμούς ελλιμενισμού σε πλοία και λιμάνια.
- Ναυτική Καταλληλόλητα: Ικανότητα αντιμετώπισης ισχυρών ανέμων, υγρασίας και ταχέων αλλαγών του καιρού.
- Χαρακτηριστικά Έκτακτης Ανάγκης: Συσκευές πλευστότητας ή δυνατότητες έκτακτης προσγείωσης πάνω από το νερό.

2.4 Τεχνικές προκλήσεις

Η χρήση αεροσκαφών eVTOL αντιμετωπίζει πολλές τεχνικές προκλήσεις λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών και απαιτήσεων. Ακολουθεί μια ανάλυση των βασικών προκλήσεων που πρέπει να αντιμετωπιστούν, κατηγοριοποιούνται σε περιβαλλοντικές, λειτουργικές, υποδομών και έλλειψης κανονισμών.

Περιβαλλοντικές Προκλήσεις

Η συνεχής έκθεση στο αλμυρό νερό και τον υγρό αέρα μπορεί να επιταχύνει τη διάβρωση μεταλλικών εξαρτημάτων, ηλεκτρικών συστημάτων και συνδέσεων. Γι' αυτό το λόγο απαιτούνται προστατευτικές επιστρώσεις/βαφές, ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά και σφράγιση των κρίσιμων εξαρτημάτων.

Ακόμη, το θαλάσσιο περιβάλλον έχει υψηλή υγρασία, εισχώρηση της υγρασίας μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία των ευαίσθητων ηλεκτρονικών και συστημάτων πρόωσης, καθιστώντας απαραίτητη την προηγμένη αδιαβροχοποίηση.

Τέλος, τα ναυτικά περιβάλλοντα συχνά χαρακτηρίζονται από απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες, όπως ισχυροί άνεμοι, ξαφνικές ριπές και αναταράξεις που επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία και τη διάρκεια ζωής των οχημάτων. Τα eVTOL χρειάζονται βελτιωμένα συστήματα σταθερότητας και ελέγχου για ασφαλείς πτήσεις.

Λειτουργικές Προκλήσεις

Οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα eVTOLs είναι αυτές σχετικά με τη λειτουργία τους. Πρέπει να προσγειώνονται σε κινούμενες ή ασταθείς πλατφόρμες, όπως καταστρώματα πλοίων ή υπεράκτιες πλατφόρμες, γι' αυτό το λόγο απαιτούνται ακριβή συστήματα πλοήγησης και προσγείωσης, όπως προηγμένοι αισθητήρες και συστήματα υπολογιστικής όρασης. Για παράδειγμα, αυτόματα συστήματα σταθεροποίησης για την αντιμετώπιση της κίνησης του καταστρώματος λόγω κυμάτων.

Ακόμη, τα πλοία ή οι ναυτικές πλατφόρμες προσφέρουν περιορισμένο χώρο για απογείωση, προσγείωση και αποθήκευση, για αυτό τα eVTOLs πρέπει να προσαρμοστούν σε αυτές τις προκλήσεις, δηλαδή να είναι συμπαγή και να μπορούν να λειτουργούν σε στενούς χώρους χωρίς να διακινδυνεύουν την ασφάλεια.

Προκλήσεις συντήρησης

Η τεχνολογία των μπαταριών χρειάζεται σωστή συντήρηση ώστε να αυξάνεται η αποτελεσματικότητα στη φόρτιση και ο χρόνος ζωής της μπαταρίας. Λύση στις απαιτήσεις συντήρησης θα μπορούσε να είναι ο μοναδιαίος σχεδιασμός (modular design) για ευκολότερη αντικατάσταση εξαρτημάτων αλλά και η ανάπτυξη προγνωστικών συστημάτων συντήρησης με χρήση τηλεμετρίας και μηχανικής μάθησης.

Προκλήσεις επικοινωνίας και πλοήγησης

Τα ανοιχτά ύδατα μπορεί να προκαλέσουν προκλήσεις για τα συστήματα GPS και επικοινωνίας λόγω της έλλειψης κοντινών σταθμών βάσης ή των παρεμβολών από το περιβάλλον.

Ακόμη για τα πλήρως αυτόνομα eVTOLs, απαιτούνται προηγμένα συστήματα πλοήγησης για τη διαχείριση των δυναμικών συνθηκών και την ασφαλή προσγείωση σε κινούμενες πλατφόρμες.

Σταθμοί φόρτισης και τεχνολογία μπαταριών

Η ανάγκη για την κατασκευή ειδικών σταθμών φόρτισης αναπτύσσεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Μια άλλη σημαντική πρόκληση που υπάρχει είναι η τρέχουσα τεχνολογία των μπαταριών, καθώς δεν επιτρέπει μεγάλες αποστάσεις πτήσης, κάτι που περιορίζει τη χρησιμότητά τους. Παρόλ' αυτά, η ανάπτυξη των μπαταριών είναι πολλά υποσχόμενη και αναμένεται μεγάλη πρόοδος τα επόμενα χρόνια.

Κανονιστικές προκλήσεις

Τα eVTOLs πρέπει να συμμορφώνονται τόσο με τους κανονισμούς αεροπλοΐας (π.χ. πρότυπα αξιοπλοΐας) όσο και με τους κανονισμούς ασφάλειας της ναυτιλίας, δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή ενοποιημένο πλαίσιο για την πιστοποίηση διπλής χρήσης. Στο κεφάλαιο 2.7 αναπτύσσονται λεπτομερώς οι υπάρχοντες κανονισμοί και παρουσιάζονται πλευρές που οι κανονισμοί δεν είναι ακόμη αρκετά ανεπτυγμένοι ώστε να καλύπτουν όλες τις ανάγκες των eVTOL, όπως για παράδειγμα η έλλειψη πρωτοκόλλων Έκτακτης Ανάγκης σε περίπτωση έκτακτης προσγείωσης εκκένωσης ή ανάκτησης.

2.5 Υποδομές φόρτισης για τα eVTOLs

Η εγκατάσταση υποδομών φόρτισης για τα eVTOLs είναι ζωτικής σημασίας για την υιοθέτηση της τεχνολογίας. Υπάρχουν διάφορες επιλογές που περιλαμβάνουν ενσωματωμένες υποδομές στο κατάστρωμα ή φορητούς φορτιστές, με κάθε επιλογή να έχει πλεονεκτήματα και προκλήσεις. Επίσης, σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί η καταλληλότητα των πλοίων για αυτήν την εφαρμογή πράγμα που εξαρτάται από το μέγεθος, τον τύπο και τη χρήση τους.

2.5.1 Απαιτήσεις υποδομών φόρτισης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.3 με την περιγραφή των μοντέλων eVTOL, τα περισσότερα από αυτά είναι συμβατά με φορτιστές υψηλής ισχύος (DC). Έτσι, τα θαλάσσια κέντρα ή πλοία θα χρειαστούν εγκατάσταση σταθμών DC υψηλής ισχύος για υποστήριξη ταχείας φόρτισης ώστε να επιτυγχάνεται αποδοτική λειτουργία και ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής. Οι φορτιστές αυτοί πρέπει να παρέχουν τουλάχιστον 400 kW, με βάση τις απαιτήσεις ενέργειας των υπό μελέτη μοντέλων, ώστε οι χρόνοι φόρτισης να παραμένουν διαχειρίσιμοι. Τα κέντρα φόρτισης πρέπει να διαθέτουν πολλαπλούς φορτιστές για να αποφεύγεται η διακοπή λειτουργίας σε περίπτωση βλάβης και να διαχειρίζονται ταυτόχρονη φόρτιση πολλών αεροσκαφών, αν χρειαστεί. Τέλος, τα συστήματα φόρτισης πρέπει να ελαχιστοποιούν τις απώλειες κατά τη μεταφορά ενέργειας.

Ταυτόχρονα, απαιτείται επαρκής παροχή ενέργειας από το δίκτυο. Κάθε φορτιστής χρειάζεται σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση που να μπορεί να χειριστεί υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Είναι σημαντική η σταθερή παροχή ενέργειας για να αποφεύγονται διακυμάνσεις που μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στις μπαταρίες. Σε απομακρυσμένες περιοχές, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ηλιακή ή αιολική) σε συνδυασμό με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες φόρτισης. Γι' αυτό σημαντικό πλεονέκτημα έχουν τα πλοία που διαθέτουν φωτοβολταϊκά ή υβριδικά συστήματα, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα πλοία για τη φόρτιση των σταθμών ενισχύει την ενεργειακή αυτάρκεια και μειώνει το κόστος και τις εκπομπές.

Οι φορτιστές και οι συνδέσεις πρέπει να έχουν αντοχή στις εκάστοτε συνθήκες, να είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση και στην υγρασία. Χρειάζονται υποδομές με προδιαγραφές IP65 (στεγανότητα) ή ανώτερες για προστασία από νερό, σκόνη και έντονες καιρικές συνθήκες. Απαραίτητη είναι και η αντοχή σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες, τα συστήματα πρέπει να λειτουργούν σε εύρος θερμοκρασιών που καλύπτει από -20°C έως +50°C ή περισσότερο.

Ακόμη, ένα προηγμένο σύστημα διαχείρισης του κύκλου ζωής των μπαταριών θα διασφαλίσει βέλτιστους κύκλους φόρτισης, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και διατηρώντας την απόδοση.

Συνολικά, οι υποδομές φόρτισης eVTOL πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικές, ανθεκτικές στις θαλάσσιες συνθήκες, ασφαλείς και συμβατές με διάφορους τύπους eVTOL. Ο σωστός σχεδιασμός και η συμμόρφωση με κανονισμούς διασφαλίζουν τη βιώσιμη και αποτελεσματική λειτουργία τους.

2.5.2 Είδη υποδομών φόρτισης

Οι υποδομές φόρτισης μπορεί να είναι δυο ειδών, σταθερές και φορητές, παρακάτω αναπτύσσονται τα βασικά χαρακτηριστικά για κάθε είδος.

2.5.2.α Σταθερές υποδομές φόρτισης

Οι σταθερές υποδομές είναι ενσωματωμένοι σταθμοί φόρτισης που εγκαθίστανται μόνιμα. Περιλαμβάνουν φορτιστές υψηλής ισχύος για γρήγορη φόρτιση, σταθμούς φόρτισης με αποθήκευση ενέργειας.

Συγκεκριμένα, οι σταθεροί φορτιστές υψηλής ισχύος διαθέτουν ικανότητα υψηλής απόδοσης, προσφέροντας υψηλή ισχύ (π.χ. σε επίπεδα εκατοντάδων κιλοβάτ ή ακόμα και μεγαβάτ), που επιτρέπει τη γρήγορη φόρτιση των eVTOL για τη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητάς τους. Ακόμη, οι φορτιστές μπορούν να προσαρμοστούν για να καλύψουν διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος ανάλογα με τον τύπο του eVTOL. Για παράδειγμα με τη χρήση φορτιστών ταχείας φόρτισης, μειώνεται ο χρόνος που απαιτείται για τη φόρτιση, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα των επιχειρήσεων.
Οι σταθμοί φόρτισης με αποθήκευση ενέργειας μπορούν να συνδυάζουν την ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ του πλοίου ή άλλες πηγές, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές. Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται με ενσωματωμένα συστήματα αποθήκευσης (μπαταρίες) που επιτρέπουν τη φόρτιση των eVTOL ακόμα και όταν η γεννήτρια του πλοίου δεν λειτουργεί σε πλήρη ισχύ, εξομαλύνοντας τις αιχμές στη ζήτηση ισχύος. Οι σταθμοί αυτοί είναι ενεργειακά πιο αποδοτικοί καθώς επιτρέπουν την καλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες.
Οι σταθερές υποδομές χρησιμοποιούν ειδικά σχεδιασμένους συνδέσμους και καλώδια, ανθεκτικά στην υγρασία και σε απαιτητικά περιβάλλοντα, εξασφαλίζοντας μακροχρόνια απόδοση. Τα υλικά των συνδέσμων είναι αντιδιαβρωτικά και ειδικά επιλεγμένα για να αντέχουν στις σκληρές συνθήκες. Ταυτόχρονα, διαθέτουν την δυνατότητα αυτοματοποιημένης σύνδεσης, καθώς μπορούν να ενσωματώσουν συστήματα που επιτρέπουν τη σύνδεση του eVTOL με το σταθμό φόρτισης χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, βελτιώνοντας την ασφάλεια.
Βασικά πλεονέκτημα των σταθερών υποδομών είναι η συνεχής διαθεσιμότητα, η αυξημένη ισχύς και η ασφάλεια που παρέχουν. Δηλαδή, τα eVTOLs μπορούν να φορτίζονται αμέσως μόλις προσγειώνονται. Οι σταθερές εγκαταστάσεις μπορούν να υποστηρίξουν υψηλής ισχύος φόρτιση, επιτρέποντας ταχύτερη φόρτιση για μεγάλες μπαταρίες eVTOL, όπως και υποστήριξη γρήγορης φόρτισης για μικρότερους χρόνους αναμονής. Οι μόνιμα εγκατεστημένες υποδομές είναι γενικά πιο ανθεκτικές και λιγότερο επιρρεπείς σε βλάβες λόγω της σταθερής θέσης και της ενσωμάτωσης με το ηλεκτρικό δίκτυο και μειώνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων κατά τη φόρτιση. Τέλος, είναι πολύ σημαντικό ότι μπορούν να ενσωματωθούν πλήρως με τα ηλεκτρικά συστήματα της εγκατάστασης, εξασφαλίζοντας βελτιστοποιημένη διαχείριση ισχύος και εφεδρεία.
Οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν είναι ο χώρος, η συντήρηση και το κόστος της εγκατάστασης. Τα καταστρώματα πρέπει να διαθέτουν επαρκή χώρο για την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης και απαιτούνται εξειδικευμένοι τεχνικοί για τη συντήρηση και την αναβάθμιση τους. Το βασικό είναι ότι η εγκατάσταση σταθερής υποδομής είναι δαπανηρή και μπορεί να απαιτήσει σημαντική αναβάθμιση της εγκατάστασης.

2.5.2.β Φορητοί φορτιστές

Πρόκειται για φορητές μονάδες φόρτισης που μπορούν να τοποθετηθούν ή να μεταφερθούν, χωρίς μόνιμη εγκατάσταση. Αποτελούνται από ψηλής ενεργειακής πυκνότητας μπαταρίες συνήθως λιθίου ή άλλων τεχνολογιών που μπορούν να φορτιστούν προκαταβολικά. Έχουν δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο ή με άλλες πηγές ενέργειας (π.χ. γεννήτριες, φωτοβολταϊκά), καθώς διαθέτουν εύκαμπτα συστήματα σύνδεσης που συνδέονται προσωρινά με την κύρια παροχή της εγκατάστασης.
Η ισχύς που μπορούν να παρέχουν εξαρτάται από το μέγεθος και τη σχεδίαση του φορητού φορτιστή, αλλά γενικά κυμαίνεται στα εξής:

- Μικρής Ισχύος (10-50 kW)
- Μεσαίας Ισχύος (50-150 kW)
- Υψηλής Ισχύος (150-300 kW ή περισσότερο)

Για παράδειγμα μια τυπική μπαταρία eVTOL 200 kWh θα χρειαζόταν περίπου 4 ώρες για πλήρη φόρτιση με φορτιστή των 50 kW, περίπου 1,5 ώρα για πλήρη φόρτιση με φορτιστή των 150 kW και περίπου 40 λεπτά για πλήρη φόρτιση με φορτιστή των 300 kW.
Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η ευελιξία τους, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά σημεία της εγκατάστασης. Λόγω της έλλειψης σταθερής υποδομής το κόστος είναι σημαντικά χαμηλότερο σε σύγκριση με τις μόνιμες εγκαταστάσεις. Η εγκατάσταση τους είναι γρήγορη χωρίς την ανάγκη σημαντικών μετατροπών στο πλοίο. Τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εγκαταστάσεις ή να μεταφερθούν σε άλλες περιοχές λειτουργίας (π.χ. ξηρά), καθιστώντας τους οικονομικά αποδοτικούς για στόλους με ποικίλες ανάγκες.
Οι βασική πρόκληση που αντιμετωπίζουν είναι η περιορισμένη ισχύς, μπορεί να μην υποστηρίζουν τις υψηλές απαιτήσεις ισχύος ορισμένων eVTOL, οδηγώντας σε μεγαλύτερους χρόνους φόρτισης. Επίσης, οι φορητοί φορτιστές χρειάζονται περιοδική επαναφόρτιση ή αντικατάσταση μπαταριών και πρέπει να αποθηκεύονται με ασφάλεια όταν δεν χρησιμοποιούνται.

Εικόνα 9: eVTOL συνδεδεμένο στον φορητό φορτιστή του

Συμπερασματικά, η σταθερή υποδομή φόρτισης είναι κατάλληλη για εγκαταστάσεις με προβλέψιμες, συχνές λειτουργίες eVTOL, όπου η ταχύτητα και η κλιμάκωση είναι κρίσιμες. Από την άλλη, οι φορητοί φορτιστές είναι ιδανικοί για λειτουργίες χαμηλής συχνότητας ή ευέλικτες εφαρμογές ή όταν υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί στον προϋπολογισμό. Μια υβριδική προσέγγιση, που συνδυάζει και τις δύο λύσεις, μπορεί να προσφέρει τον καλύτερο συνδυασμό ευελιξίας, αξιοπιστίας και δυνατότητας φόρτισης υψηλής απόδοσης, έχει βέβαια μεγαλύτερο κόστος.

2.5.3 Λειτουργική συμβατότητα

Οι εγκαταστάσεις πρέπει να διαθέτουν επαρκή ηλεκτρική ισχύ για να υποστηρίξουν τη λειτουργία των φορτιστών, ειδικά για σταθερές υποδομές υψηλής ισχύος. Οι εγκαταστάσεις με σύγχρονες γεννήτριες ή συστήματα υβριδικής ενέργειας είναι πιο συμβατά. Επίσης, απαιτείται ένα προηγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας που να κατανέμει την ισχύ μεταξύ των φορτιστών και των υπόλοιπων λειτουργιών της εγκατάστασης. Για τη διασφάλιση της

απρόσκοπτης λειτουργίας, είναι σημαντική η ύπαρξη εφεδρικών συστημάτων ισχύος, ειδικά σε πλοία που εξυπηρετούν κρίσιμες λειτουργίες. Οι εγκαταστάσεις που διαθέτουν φωτοβολταϊκά ή υβριδικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούν ανανεώσιμη ενέργεια για τη φόρτιση των eVTOL, μειώνοντας τις εκπομπές και το λειτουργικό κόστος.

2.6 <u>Κανονισμοί για τη χρήση drones και eVTOL[2]</u>

Στην Ελλάδα, η χρήση των αεροσκαφών ηλεκτρικής κάθετης απογείωσης και προσγείωσης βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης, με προγραμματισμένες εμπορικές λειτουργίες να αναμένονται τα επόμενα χρόνια. Η ρύθμιση και η ενσωμάτωση αυτών των αεροσκαφών στο ελληνικό εναέριο χώρο θα βασιστεί κυρίως στο ευρωπαϊκό ρυθμιστικό πλαίσιο που καθορίζεται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Ασφάλειας της Αεροπορίας (EASA). Η Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ) είναι υπεύθυνη για την εφαρμογή και την εποπτεία των αεροπορικών κανονισμών στην Ελλάδα. Με την εισαγωγή των eVTOLs, η ΥΠΑ θα συνεργαστεί με την EASA για την προσαρμογή των ευρωπαϊκών κανονισμών στις ελληνικές συνθήκες, διασφαλίζοντας την ασφαλή ενσωμάτωση αυτών των αεροσκαφών στον εναέριο χώρο της χώρας.
Το υπάρχον ευρωπαϊκό ρυθμιστικό πλαίσιο, που έχει αναπτυχθεί από την EASA[9], καλύπτει τους παρακάτω κανονισμούς.

- Πιστοποίηση αξιοπλοΐας

Η EASA εισήγαγε την Ειδική Συνθήκη VTOL(SC-VTOL), η οποία καθορίζει τα πρότυπα αξιοπλοΐας για τα eVTOLs. Αυτή η συνθήκη περιλαμβάνει πρότυπα ασφάλειας αντίστοιχα με την εμπορική αεροπορία αλλά και απαιτήσεις για ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης και εφεδρικά συστήματα ασφαλείας για την αντιμετώπιση βλαβών. Οι κατασκευαστές των eVTOLs πρέπει να λάβουν πιστοποίηση τύπου από την EASA, αποδεικνύοντας τη συμμόρφωση με την Ειδική Συνθήκη VTOL. Η πιστοποίηση περιλαμβάνει αυστηρές δοκιμές για την αντοχή, την απόδοση και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

- Πιστοποίηση χειριστών

Οι χειριστές eVTOL πρέπει να διαθέτουν εξειδικευμένες άδειες πιλότου, ανάλογα με τον τύπο και την λειτουργία του αεροσκάφους. Για χειροκίνητα eVTOLs απαιτείται Ιδιωτική Άδεια Πιλότου (PPL) ή Εμπορική Άδεια Πιλότου (CPL), ανάλογα με τη λειτουργία, και επιπλέον εκπαίδευση ειδικά για τις λειτουργίες των eVTOLs, όπως την κάθετη πτήση και τις διαδικασίες έκτακτης ανάγκης. Για αυτόνομα eVTOLs οι χειριστές θα πρέπει να διαθέτουν Πιστοποιητικό Χειριστή από Απόσταση, αντίστοιχο με εκείνο των drones. Ακόμη, οι εταιρείες που παρέχουν υπηρεσίες eVTOL (π.χ. urban air mobility) πρέπει να αποκτήσουν Πιστοποιητικό Αεροπορικού Χειριστή (AOC), διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα πρότυπα λειτουργικής ασφάλειας.

- Ενσωμάτωση στον εναέριο χώρο

Ο EASA αναπτύσσει την έννοια του U-Space, ένα πλαίσιο για τη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας χαμηλού υψομέτρου (κάτω από 500 πόδια). Το U-Space προορίζεται να ενσωματώσει επανδρωμένα και μη επανδρωμένα αεροσκάφη, συμπεριλαμβανομένων των eVTOLs, στα υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης εναέριας κυκλοφορίας. Τα χαρακτηριστικά του U-Space είναι οι ψηφιακές υπηρεσίες εναέριας κυκλοφορίας για αυτοματοποιημένη διαχείριση της κυκλοφορίας με στόχο ασφαλείς και αποτελεσματικές λειτουργίες, το Geofencing για τον περιορισμός της πρόσβασης σε ευαίσθητες ή απαγορευμένες περιοχές και οι δυναμικές εξουσιοδοτήσεις πτήσης για ρυθμίσεις πτήσεων σε πραγματικό χρόνο με σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων.

- Περιβαλλοντικοί κανονισμοί και πρότυπα θορύβου

Η EASA απαιτεί τα eVTOL να συμμορφώνονται με αυστηρά πρότυπα θορύβου, ειδικά για λειτουργίες σε αστικές περιοχές. Η Ειδική Συνθήκη VTOL περιλαμβάνει απαιτήσεις για τη μέτρηση και τον περιορισμό του θορύβου κατά την απογείωση, την πτήση και την προσγείωση. Ακόμη, οι λειτουργίες των eVTOL πρέπει να ευθυγραμμίζονται με τους στόχους του Ευρωπαϊκού Πράσινου Συμφώνου για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, έτσι οι κατασκευαστές πρέπει να διασφαλίζουν τη βιωσιμότητα των μπαταριών και των συστημάτων πρόωσης, περιλαμβάνοντας την αξιολόγηση του κύκλου ζωής των εξαρτημάτων.

- Πρότυπα ασφάλειας και λειτουργίας

Για λόγους ασφαλείας, οι χειριστές απαιτείται να εφαρμόζουν το Σύστημα Διαχείρισης Ασφάλειας (Safety Management System - SMS) για την παρακολούθηση και την αντιμετώπιση κινδύνων. Επίσης, για τους κατασκευαστές είναι υποχρεωτική η εφεδρεία σε κρίσιμες λειτουργίες, όπως πρόωση, έλεγχος πτήσης και επικοινωνία, ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια σε περίπτωση βλάβης.

- Ρυθμίσεις για την Αστική Εναέρια Κινητικότητα (UAM)

Οι κανονισμοί της EASA υποστηρίζουν την ανάπτυξη οικοσυστημάτων Αστικής Εναέριας Κινητικότητας (urban air mobility - UAM), συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών εναέριων ταξί. Οι πόλεις και οι περιφέρειες πρέπει να συνεργαστούν με τους χειριστές για την ανάπτυξη υποδομών που συμμορφώνονται με τα πρότυπα του EASA. Κατευθυντήριες γραμμές για την σχεδίαση αυτών των υποδομών είναι οι ζώνες ασφαλείας για απογείωση και προσγείωση και οι εγκαταστάσεις φόρτισης και συντήρησης για τα eVTOLs.

- Αυτόνομες λειτουργίες και ρυθμίσεις χειριστών από απόσταση

Η EASA παρέχει πλαίσιο για την πιστοποίηση και τη λειτουργία αυτόνομων και ημιαυτόνομων eVTOL. Τα αυτόνομα συστήματα πρέπει να αποδεικνύουν αξιοπιστία και εφεδρεία στα συστήματα λήψης αποφάσεων, ασφαλή επικοινωνία με το έδαφος ή τα συστήματα U-Space και συμμόρφωση με πρότυπα κυβερνοασφάλειας για την αποφυγή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης.

- Ευθύνη και ασφάλιση

Οι χειριστές και οι κατασκευαστές πρέπει να συμμορφώνονται με κανονισμούς ευθύνης και ασφάλισης. Η EASA απαιτεί εκτεταμένη ασφαλιστική κάλυψη για ευθύνη έναντι τρίτων, ασφάλεια επιβατών και ζημιές σε περιουσίες ή υποδομές.

- Διασυνοριακές λειτουργίες

Τα eVTOL που λειτουργούν μεταξύ κρατών-μελών της ΕΕ πρέπει να συμμορφώνονται με την πρωτοβουλία Single European Sky, που διασφαλίζει εναρμονισμένη διαχείριση εναέριας κυκλοφορίας. Οι διασυνοριακές υπηρεσίες eVTOL πρέπει να πληρούν συμφωνίες αμοιβαίας αναγνώρισης υπό τη δικαιοδοσία της EASA.

2.7 <u>Προδιαγραφές ασφαλείας και συμμόρφωση</u>

Οι προδιαγραφές ασφαλείας και η συμμόρφωση είναι κρίσιμες για την επιτυχή υιοθέτηση των eVTOLs. Τα eVTOL πρέπει να λειτουργούν σε περίπλοκα περιβάλλοντα, ενώ ταυτόχρονα να διασφαλίζουν την ασφάλεια των επιβατών και των φορτίων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες προδιαγραφές ασφαλείας και τα ζητήματα συμμόρφωσης που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Αεροπορική πιστοποίηση

Τα eVTOL πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις ασφαλείας που καθορίζονται από τους διεθνείς οργανισμούς αεροπορίας. Αυτές οι πιστοποιήσεις είναι το Part 23 (μικρά αεροσκάφη) της FAA (Federal Aviation Administration) ή το πλαίσιο Special Condition VTOL της EASA (European Union Aviation Safety Agency). Στόχος των οργανισμών αυτών είναι η διασφάλιση της αξιοπιστίας και του πλεονασμού σε κρίσιμα συστήματα (π.χ., σύστημα πρόωσης, συστήματα ελέγχου πτήσης), η συμμόρφωση με συγκεκριμένες συνθήκες φορτίου για κάθετη και οριζόντια λειτουργία πτήσης. Με τις δοκιμές πτήσης που είναι μέρος της πιστοποίησης ελέγχεται ο κύκλος ζωής για μηχανικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα και γίνονται δοκιμές δονήσεων, κόπωσης, περιβαλλοντικής ανθεκτικότητας και αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

Συμμόρφωση με ναυτικούς κανονισμούς

Τα eVTOLs πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις ασφαλείας όχι μόνο των αεροπορικών οργανισμών αλλά και των ναυτικών. Δηλαδή, την τήρηση των κατευθυντήριων γραμμών διεθνών οργανισμών για αεροπορικές λειτουργίες σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Η λειτουργία των eVTOLs απαιτεί συμμόρφωση με κανόνες που διέπουν τις θαλάσσιες μεταφορές, όπως πρότυπα έρευνας και διάσωσης, συμμόρφωση με συμφωνίες SAR (π.χ., ICAO/IMO Annex 12) και συμβατότητα με συστήματα αυτόματης αναγνώρισης (AIS) που χρησιμοποιούνται σε πλοία και ναυτικό έλεγχο κυκλοφορίας. Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι τα eVTOLs δεν παρεμποδίζουν με κανέναν τρόπο τη λειτουργία του πλοίου.

Εκπαίδευση και λειτουργικά πρωτόκολλα

Είναι απαραίτητη η εκπαίδευση πιλότων που θα περιλαμβάνει τις εξειδικευμένες λειτουργίες των eVTOLs για μεταφορά επιβατών, για παράδειγμα για την διεξαγωγή εκτάκτων προσθαλασσωτικών διαδικασιών και την προσγείωση σε κινούμενα πλοία.

Ακόμη, χρειάζεται εκπαίδευση του προσωπικού συντήρησης ώστε να διεξάγονται διαδικασίες για την επιθεώρηση και τη μείωση της φθοράς λόγω του θαλασσινού νερού.

Τέλος, το προσωπικό πρέπει να είναι εκπαιδευμένο σε διαδικασίες έκτακτης ανάγκης με ολοκληρωμένα πρωτόκολλα για θαλάσσιες διασώσεις, περιλαμβανομένων συντονισμένων προσπαθειών με ομάδες SAR.

Αντοχή στις θαλάσσιες συνθήκες

Τα eVTOLs πρέπει να είναι σχεδιασμένα για να αντέχουν τις δύσκολες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η χρήση υλικών ανθεκτικών στη διάβρωση, όπως αλουμίνιο θαλάσσιας ποιότητας, ανοξείδωτο χάλυβα και εξειδικευμένων επιστρώσεων θα βοηθήσει στην αντοχή στις θαλάσσιες συνθήκες. Επίσης, είναι απαραίτητη η στεγανοποίηση και αδιαβροχοποίηση ηλεκτρικών εξαρτημάτων από το αλάτι και την υγρασία. Για παράδειγμα, κατασκευή υδατοστεγών διαμερισμάτων για ευαίσθητα συστήματα αεροηλεκτρονικής και μπαταριών, προσθήκη ειδικών επιστρώσεων σε πλακέτες κυκλωμάτων για την αποτροπή εισχώρησης αλμυρού νερού και κατασκευή αδιάβροχων και ανθεκτικών στο αλάτι θηκών μπαταριών για την αποτροπή βραχυκυκλωμάτων και θερμικών ατυχημάτων.

Τέλος, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη στις προδιαγραφές η δυνατότητα λειτουργίας σε ισχυρούς ανέμους και βροχή όπως και η ύπαρξη συστημάτων που διασφαλίζουν τη σταθερότητα κατά την απογείωση και την προσγείωση σε κινούμενα πλοία.

Ικανότητα λειτουργίας στο νερό

Σημαντική προϋπόθεση είναι η ικανότητα λειτουργίας στο νερό που σημαίνει ότι από το σχεδιασμό τους θα πρέπει να εξασφαλίζεται η πλευστότητα και η σταθερότητα. Δηλαδή, θα πρέπει να ενσωματωθούν συστήματα έκτακτης πλευστότητας που ενεργοποιούνται σε περίπτωση προσθαλάσσωσης και να υπάρχουν χαρακτηριστικά σταθερότητας για να διασφαλιστεί η όρθια θέση μετά την προσθαλάσσωση. Για παράδειγμα, η χρήση υδρόφοβων

επιστρώσεων σε βασικές επιφάνειες θα βοηθούσε στην ελαχιστοποίηση της πρόσφυσης του νερού και στην βελτίωση της απόδοσης κατά την απογείωση.
Εάν απαιτείται μπορούν να σχεδιαστούν με αμφίβια χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα ο σχεδιασμός της ατράκτου ώστε να μειώνει την αντίσταση στο νερό κατά την προσθαλάσσωση, κάτι αντίστοιχο με τα υδροπλάνα.

Συστήματα έκτακτης ανάγκης και ασφάλειας για λειτουργία πάνω από τη θάλασσα
Η ασφάλεια των πτήσεων είναι απαραίτητη, ειδικά σε περιοχές όπου η διακοπή λειτουργίας ή η πτώση θα ήταν καταστροφική. Για αυτό το λόγο υπάρχει απαίτηση για πολλαπλά εφεδρικά συστήματα μπαταριών και κινητήρων, για αυτόνομα συστήματα πλοήγησης που μπορούν να λειτουργούν ακόμη και χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, για την ενσωμάτωση αισθητήρων και τεχνολογιών αποφυγής σύγκρουσης (collision avoidance) και για συστήματα αυτόματης ασφαλούς προσθαλάσσωσης σε περίπτωση βλάβης.
Επίσης, για την ασφάλεια επιβατών και πληρώματος χρειάζεται ο απαραίτητος εξοπλισμός διάσωσης στο νερό. Ο εξοπλισμός αυτός θα μπορούσε να είναι ενσωματωμένες σωσίβιες σχεδίες ή προσωπικές συσκευές πλευστότητας για επιβάτες, φάροι έκτακτης ανάγκης (π.χ., ELT) με κάλυψη πάνω από τη θάλασσα, σύγχρονα συστήματα ζωνών ασφαλείας για επιβάτες και η εγκατάσταση αλεξίπτωτων για ολόκληρο το eVTOL ή για μεμονωμένους τους επιβάτες. Ακόμη, θα πρέπει να προβλεφθεί η αντοχή σε θαλάσσια σύγκρουση με ενισχυμένες κατασκευές, σχεδιασμένες να αντέχουν την πρόσκρουση στο νερό με υψηλές ταχύτητες, όπως και να προβλεφθεί ανθεκτικότητα της καμπίνας σε περιπτώσεις πρόσκρουσης ή ακραίων καιρικών συνθηκών.
Τέλος, τα eVTOL πρέπει να είναι εξοπλισμένα για να αντιμετωπίσουν απρόβλεπτες καταστάσεις, δηλαδή να διαθέτουν αυτόματα συστήματα ειδοποίησης και επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου, να διαθέτουν ενσωματωμένα GPS και συστήματα αναγνώρισης θέσης για εύρεση σε περίπτωση απώλειας, να υπάρχει δυνατότητα λειτουργίας αυτόνομης πτήσης για ασφαλή επιστροφή ή προσθαλάσσωση και να διαθέτουν επιπλέον ενεργειακά αποθέματα για απρόβλεπτες συνθήκες ανέμων ή καθυστερήσεις σε διάσωση ή προσγείωση. Σημαντική είναι και η εγκατάσταση εξοπλισμού πρώτων βοηθειών για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η δημιουργία σαφών διαδικασιών έκτακτης ανάγκης, συμπεριλαμβανομένων λειτουργιών αυτόματης αιώρησης, επιστροφής και ελεγχόμενης καθόδου είναι απαραίτητη.

Ειδικές υποδομές φόρτισης
Τα συστήματα φόρτισης για τα eVTOLs θα πρέπει να είναι ασφαλή, ακόμη και σε κινούμενα πλοία. Αυτό απαιτεί οι σταθμοί φόρτισης να είναι ανθεκτικοί σε υγρασία, αλάτι και κραδασμούς, να είναι δυνατή η αυτόματη αποσύνδεση σε περίπτωση κακοκαιρίας ή διακοπής ρεύματος και να υπάρχουν εφεδρικές πηγές ενέργειας, όπως γεννήτριες στο πλοίο, για φόρτιση σε έκτακτες περιπτώσεις. Τα συστήματα φόρτισης θα πρέπει να ακολουθούν και αυτά τους κανονισμούς και η εγκατάσταση τους θα υπόκειται στον έλεγχο των αρμόδιων αρχών.

Πλοήγηση και επικοινωνία
Στα eVTOLs θα πρέπει να προβλεφθεί η ναυτική πλοήγηση, δηλαδή όλα τα συστήματα να είναι εξοπλισμένα με ναυτικούς χάρτες πλοήγησης και να υπάρχουν εφεδρικά συστήματα GPS με παράκτια βοηθήματα πλοήγησης για ακριβείς προσγειώσεις σε πλωτές πλατφόρμες.
Επίσης, είναι απαραίτητη η ραδιοεπικοινωνία και δορυφορική επικοινωνία. Τα eVTOLs πρέπει να είναι συμβατά με ραδιόφωνα VHF για επικοινωνία με πλοία και υπεράκτιες εγκαταστάσεις και να διαθέτουν δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας για λειτουργίες πέρα από την κάλυψη επίγειων δικτύων. Η ασφαλής και συνεχής επικοινωνία είναι κρίσιμη για τη λειτουργία eVTOL.
Τέλος, χρειάζεται να διαθέτουν βελτιωμένα Συστήματα Ανίχνευσης και Αποφυγής (DAA), σχεδιασμένα για θαλάσσια περιβάλλοντα ώστε να αποφεύγονται άλλα αεροσκάφη, πλοία και θαλάσσια εμπόδια.

Κανονισμοί θορύβου και περιβαλλοντικές προδιαγραφές

Τα eVTOLs πρέπει να πληρούν τα πρότυπα χαμηλού θορύβου και συστημάτων πρόωσης μηδενικών εκπομπών ώστε να ευθυγραμμίζονται με τους στόχους βιωσιμότητας του IMO, ειδικά εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε πυκνοκατοικημένα λιμάνια ή περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, ώστε να μην διαταράσσεται η θαλάσσια ζωή. Επίσης, η διαχείριση των αποβλήτων και η ανακύκλωση ή σωστή απόρριψη των μπαταριών πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τις ναυτιλιακές και αεροπορικές κατευθυντήριες γραμμές. Πρέπει να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει χημική διαρροή ή εκπομπή που θα μπορούσε να βλάψει το θαλάσσιο περιβάλλον, για παράδειγμα ένα μέτρο θα μπορούσε να είναι η προστασία της μπαταρίας σε περίπτωση πρόσκρουσης στο νερό.

2.8 Άλλες χρήσεις

Τα eVTOLs έχουν τη δυνατότητα να μεταμορφώσουν τις αερομεταφορές, βελτιώνοντας τη μεταφορά φορτίων, την ασφάλεια και την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα. Παρακάτω περιγράφονται διάφορες σημαντικές εφαρμογές, οι οποίες καθιστούν το κόστος της επένδυσης επιπλέον αποδοτικό.

Παράδοση φορτίου και εφοδιαστική αλυσίδα

Τα eVTOLs μπορούν να μεταφέρουν επείγοντα φορτία ή δέματα από αγκυροβολημένα πλοία προς τα λιμάνια (Ship-to-Shore παραδόσεις). Τέτοια φορτία μπορεί να είναι για παράδειγμα, ανταλλακτικά ή κρίσιμος εξοπλισμός, έγγραφα ή ευπαθή προϊόντα χωρίς την ανάγκη χρήσης λέμβων ή ελλιμενισμού, κερδίζοντας, έτσι, ταχύτητα, μείωση λειτουργικού κόστους και αποφυγή καθυστερήσεων λόγω συμφόρησης στα λιμάνια. Είναι ιδανικά για επείγουσες παραδόσεις που δεν μπορούν να περιμένουν το επόμενο λιμάνι, για παράδειγμα εξαρτήματα για επιδιορθώσεις. Επίσης, μπορούν να στηρίξουν την εφοδιαστική αλυσίδα με παροχή προμηθειών σε πλοία που παραμένουν σε ανοιχτή θάλασσα για μεγάλα χρονικά διαστήματα ή για τις πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Μπορούν γρήγορα να βοηθήσουν στην αναπλήρωση αποθεμάτων και στην παράδοση φρέσκων τροφίμων ή φαρμάκων σε εμπορικά πλοία.

Μεγαλύτερα eVTOLs είναι κατάλληλα για τη μεταφορά βαρέων φορτίων μεταξύ πλοίων, υπεράκτιων πλατφορμών και παράκτιων εγκαταστάσεων, γι' αυτό απαιτούνται μοντέλα με μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς και ισχυρά συστήματα στερέωσης φορτίων.

Επείγουσες παροχές και επιχειρήσεις έκτακτης ανάγκης και ασφάλειας

Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης (π.χ. ιατρικές προμήθειες ή εξειδικευμένα εργαλεία), τα eVTOL μπορούν να λειτουργήσουν ως ταχεία απόκριση. Για παράδειγμα, στην παράδοση ανταλλακτικών για την ελαχιστοποίηση της διακοπής λειτουργίας σε μια πλατφόρμα. Επίσης, μπορούν να συνδράμουν σε επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης(SAR), σαρώνοντας γρήγορα μεγάλες θαλάσσιες περιοχές, καθώς μπορούν να εξοπλιστούν με θερμικές κάμερες και GPS για τον εντοπισμό αγνοούμενων ατόμων ή σκαφών. Ακόμα και μεταφορά σωσιβίων, τροφίμων και άλλων προμηθειών σε ναυαγούς.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ιατρική διακομιδή, ως εναέρια ασθενοφόρα για τη μεταφορά τραυματιών από πλοία στην πλησιέστερη ιατρική εγκατάσταση, για τη μεταφορά ιατρικού προσωπικού ή εξοπλισμού σε πλοία και μπορούν να εξοπλιστούν τα ίδια με αυτόνομες μονάδες πρώτων βοηθειών για χρήση σε κρίσιμες καταστάσεις.

Τέλος, σε περιπτώσεις πυρκαγιών σε πλοία, τα eVTOLs μπορούν να παραδώσουν πυροσβεστικό εξοπλισμό ή να ρίξουν κατασβεστικά υλικά.

Επιθεώρηση και συντήρηση

Τα eVTOL, εξοπλισμένα με κάμερες και αισθητήρες, μπορούν να εκτελούν εξωτερικές επιθεωρήσεις πλοίων εν πλω ή σε αγκυροβόλια, να ελέγξουν για ζημιές στο κύτος, σκουριά ή οργανική επικάλυψη χωρίς την ανάγκη δυτών ή δεξαμενισμού. Ακόμη, στην επιθεώρηση λιμενικών εγκαταστάσεων μπορούν να χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση γερανών, αποβάθρων και αποθηκευτικών χώρων στα λιμάνια. Αλλά και στην παρακολούθηση υπεράκτιων υποδομών επιθεωρώντας υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, εξέδρες πετρελαίου και υποθαλάσσια καλώδια για φθορές και ζημιές.

Με τον κατάλληλο εξοπλισμό όπως LiDAR, υπέρυθρες κάμερες ή θερμικούς αισθητήρες για αναλυτική εξέταση μπορούν να συνεισφέρουν σε επιθεωρήσεις.

Εναέρια επιτήρηση και ασφάλεια

Τα eVTOLs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περιβαλλοντική παρακολούθηση, για να ανιχνεύουν πετρελαιοκηλίδες, εκπομπές ή παράνομες απορρίψεις από πλοία ή πλατφόρμες. Μπορούν να υποστηρίξουν την επιτήρηση της θαλάσσιας ρύπανσης και την επιβολή περιβαλλοντικών κανονισμών κατά τη συντήρηση πλοίων, λιμανιών ή θαλάσσιων περιοχών.

Επιπλέον, μπορούν να υποστηρίξουν την ασφάλεια, ως εργαλεία επιτήρησης για την παρακολούθηση περιοχών υψηλού κινδύνου για πειρατικές επιθέσεις, μεταδίδοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε ομάδες ασφαλείας σε πλοία ή παράκτιες βάσεις, καθώς και στην ασφάλεια των λιμένων, παρακολουθώντας για παράνομη πρόσβαση, κλοπή ή λαθρεμπόριο, με πλεονέκτημα την αθόρυβη λειτουργία τους που τους επιτρέπει διακριτική επιτήρηση.

Ενίσχυση επικοινωνίας στη θάλασσα

Τα eVTOLs μπορούν να λειτουργούν ως εναέριοι κινητοί κόμβοι επικοινωνίας για πλοία σε απομακρυσμένες περιοχές, διασφαλίζοντας τη συνδεσιμότητα σε ζώνες με περιορισμένη κάλυψη δορυφόρου, ειδικά σε έκτακτες καταστάσεις.

Ακόμη, μπορούν να υποστηρίξουν μη επανδρωμένα πλοία, για τη συλλογή και τη μετάδοση δεδομένων πλοήγησης ή καιρού, ενισχύοντας την επίγνωση της κατάστασης τους.

Ειδικές εφαρμογές

Τέλος, τα eVTOLs μπορούν να υποστηρίξουν τη θαλάσσια έρευνας, μεταφέροντας επιστημονικό εξοπλισμό, ερευνητές ή δείγματα μεταξύ ερευνητικών σκαφών και παράκτιων εργαστηρίων. Για παράδειγμα στην υποστήριξη σε μελέτες θαλάσσιας βιολογίας, εξερεύνησης βαθέων υδάτων ή παρακολούθησης κλιματικών αλλαγών.

3 Τεχνολογικές πτυχές για την μελέτη σκοπιμότητας χρήσης των eVTOL

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν πτυχές για την μελέτη σκοπιμότητας χρήσης των eVTOLs και συγκεκριμένα την ανάπτυξη των κριτηρίων που θα αξιολογηθεί η μελέτη. Αρχικά, θα γίνει μια ανάλυση των οφελών και εκτίμηση των περιορισμών με βάση όσα έχουν παρουσιαστεί στα παραπάνω κεφάλαια αλλά σε αυτό το σημείο με σκοπό να αξιολογηθεί πως θα επηρεάσουν κοστολογικά την επένδυση. Στην συνέχεια θα γίνει περιγραφή ενός πιλοτικού προγράμματος χρήσης των eVTOLs που θα βοηθήσει στον έλεγχο της βιωσιμότητας της επένδυσης και στην εισαγωγή των eVTOLs στην αγορά. Τέλος, γίνεται μια πρώτη σύγκριση της χρήσης eVTOL με την χρήση ελικοπτέρων για μεταφορά επιβατών σε πλοία ώστε να αξιολογηθεί στη συνέχεια της μελέτης.

3.1 Πλεονεκτήματα της χρήσης των eVTOL για την μεταφορά επιβατών

Η χρήση των eVTOL για τη μεταφορά επιβατών προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη, όπως χαμηλότερο λειτουργικό κόστος, αυξημένη αποτελεσματικότητα, μείωση εκπομπών και βελτιωμένη ασφάλεια. Παρόλο που η αρχική επένδυση μπορεί να είναι υψηλή, το μακροπρόθεσμο όφελος από τη μείωση των εξόδων λειτουργίας και συντήρησης καθιστά τα eVTOL μια ελκυστική λύση.
Επιγραμματικά τα πλεονεκτήματα των eVTOL παρουσιάζονται παρακάτω και θα αναλυθούν στις επόμενες υποενότητες, υπολογίζοντας και το οικονομικό όφελος κάθε πλεονεκτήματος.

- Λειτουργία: Χαμηλότερο κόστος λειτουργίας από τα παραδοσιακά μέσα μεταφοράς.
- Περιβαλλοντικό αποτύπωμα: Μηδενικές εκπομπές ρύπων λόγω ηλεκτρικής πρόωσης.
- Ταχύτητα: Εξοικονόμηση χρόνου σε κρίσιμες αποστολές.
- Ευελιξία: Δυνατότητα χρήσης σε δυσπρόσιτες περιοχές.
- Ασφάλεια: Μειωμένο ρίσκο σε επικίνδυνες συνθήκες λόγω αυτόνομης ή ημιαυτόνομης λειτουργίας.

3.1.1 Μείωση λειτουργικού κόστους

Η υιοθέτηση των eVTOLs μπορεί να προσφέρει σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους, με πολλαπλά οικονομικά οφέλη, καθώς έχουν χαμηλότερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ελικόπτερα και πλοία.
Αρχικά, το κόστος ενέργειας των eVTOLs είναι χαμηλότερο σε σχέση με τα συμβατικά μέσα μεταφοράς. Για παράδειγμα τα παραδοσιακά ελικόπτερα (π.χ. Sikorsky S-92 ή AW139) καταναλώνουν 400-600 λίτρα καυσίμου ανά ώρα, με κόστος περίπου 500-1.000 δολάρια ανά ώρα πτήσης. Τα eVTOLs, που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια, εκτιμάται ότι κοστίζουν 200-500 δολάρια ανά ώρα πτήσης, εξοικονομώντας 50-80% σε λειτουργικά κόστη.
Επίσης, έχουν χαμηλότερο κόστος συντήρησης από τα συμβατικά ελικόπτερα καθώς διαθέτουν μειωμένη πολυπλοκότητα εξαρτημάτων. Τα eVTOLs έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη, καθώς χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες που δεν απαιτούν πολύπλοκα κιβώτια ταχυτήτων ή συστήματα ρότορα. Τα ελικόπτερα, από την άλλη μεριά, απαιτούν συχνές επιθεωρήσεις, αντικαταστάσεις εξαρτημάτων και προγραμματισμένες επισκευές, με κόστος συντήρησης που φτάνει τα 500.000 με 1 εκατομμύριο δολάρια ετησίως. Ακόμη, οι ηλεκτρικοί κινητήρες των eVTOLs υπόκεινται σε μικρότερη φθορά, μειώνοντας τον απρόβλεπτο χρόνο εκτός λειτουργίας.
Η αναμενόμενη εξοικονόμηση στη συντήρηση είναι περίπου 30-50% σε σύγκριση με τα ελικόπτερα.
Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι τα eVTOLs έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με έναν πιλότο, σε αντίθεση με τα ελικόπτερα που απαιτούν δύο πιλότους και επιπλέον υποστήριξη.

Ταυτόχρονα, γίνεται προσπάθεια για δημιουργία αυτόνομων τα eVTOLs που θα μειώσει ακόμα περισσότερο τα λειτουργικά κόστη. Η μετάβαση σε eVTOL μπορεί να οδηγήσει σε μια μείωση 20-30% στο κόστος προσωπικού.
Τέλος, τα eVTOL έχουν απλούστερα συστήματα που προσφέρουν μειωμένο χρόνο ακινησίας (Downtime) και αυξημένη διαθεσιμότητα. Ενώ, τα ελικόπτερα απαιτούν παρατεταμένες περιόδους επιθεώρησης και συντήρησης, με αποτέλεσμα διακοπές στη λειτουργία. Η μείωση του χρόνου εκτός λειτουργίας κατά 10-20% μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση στο κόστος ετησίως από την βελτιωμένη παραγωγικότητα.
Συμπερασματικά, η υιοθέτηση των eVTOLs προσφέρει:

- 50-80% χαμηλότερο κόστος ενέργειας.
- 30-50% μείωση εξόδων συντήρησης.
- 20-40% εξοικονόμηση στα ασφάλιστρα.
- Εξάλειψη του κόστους καυσίμων και υποδομών.
- Αύξηση της παραγωγικότητας με μειωμένο χρόνο ακινησίας.

3.1.2 Εκπομπές ρύπων και ενεργειακό αποτύπωμα

Σε αυτό υποκεφάλαιο θα γίνει μια ανάλυση των εκπομπών που παράγουν τα eVTOsL, οι εκπομπές χωρίζονται σε άμεσες, που παράγονται δηλαδή κατά τη λειτουργία του αεροσκάφους, και έμμεσες, που παράγονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

- Άμεσες εκπομπές

Δεδομένου ότι λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια, τα eVTOLs δεν παράγουν εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη μείωση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος. Σε αντίθεση με τα συμβατικά ελικόπτερα που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, τα eVTOLs λειτουργούν με ηλεκτρικές μπαταρίες, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μηδενικές άμεσες εκπομπές κατά τη διάρκεια της πτήσης. Συγκεκριμένα δεν παράγεται καμία εκπομπή CO_2, NOx, SOx ή σωματιδίων και καμία εκπομπή αερίων θερμοκηπίου (GHG) στο σημείο λειτουργίας.

- Έμμεσες εκπομπές

Αν και τα eVTOsL δεν παράγουν εκπομπές κατά τη λειτουργία, παράγουν κατά τον κύκλο ζωής τους. Οι εκπομπές αυτές εξαρτώνται από την διαδικασία κατασκευής των μπαταριών και από τον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών. Συγκεκριμένα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου συμβάλλουν στις εκπομπές λόγω εξόρυξης και επεξεργασίας των πρώτων υλών τους όπως λίθιο, κοβάλτιο, νικέλιο και άλλα. Το εκτιμώμενο αποτύπωμα άνθρακα για την εξόρυξη των πρώτων υλών υπολογίζεται στα 50-100 kg CO_2 ανά kWh χωρητικότητας της μπαταρίας [10]. Για το αποτύπωμα από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται, αυτό εξαρτάται από το ενεργειακό μείγμα που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση για παράδειγμα χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ή από ορυκτά καύσιμα. Αν η φόρτιση είναι ανανεώσιμη παράγονται σχεδόν μηδενικές εκπομπές, ενώ αν προέρχεται από ορυκτά καύσιμα υπολογίζεται περίπου στα 400-600g CO_2 ανά kWh με την χρήση άνθρακα [11] και περίπου στα 200g CO_2 ανά kWh με την χρήση φυσικού αέριου. Τέλος, ιδιαίτερα σημαντική για την μείωση του αποτυπώματος είναι η σωστή ανακύκλωση των μπαταριών, ενώ η ακατάλληλη διάθεση μπορεί να προκαλέσει σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους.
Συμπερασματικά, τα eVTOLs προσφέρουν σημαντικά χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μέσα μεταφοράς.

3.1.3 Ταχύτερη Μεταφορά Επιβατών

Η χρήση των eVTOL για τη μεταφορά επιβατών προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τον χρόνο ταξιδιού, επιτρέποντας πιο γρήγορες, πιο ευέλικτες και αποδοτικές μετακινήσεις. Η ταχύτερη μεταφορά επιβατών συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση του λειτουργικού κόστους.
Αρχικά, τα eVTOLs επιτρέπουν απευθείας και γρήγορη μετακίνηση, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους μεταφοράς, όπως ελικόπτερα ή σκάφη. Οι χρόνοι μεταφοράς συγκριτικά για κάθε τρόπο μεταφοράς κυμαίνονται για ελικόπτερα σε 45–60 λεπτά από ξηρά σε υπεράκτια πλατφόρμα, για σκάφη σε 3–6 ώρες, ανάλογα με την απόσταση και τις καιρικές συνθήκες, ενώ για eVTOLs σε 20–30 λεπτά για την ίδια διαδρομή.
Τα eVTOLs δεν εξαρτώνται από σταθερές υποδομές, όπως λιμάνια ή ελικοδρόμια, επιτρέποντας προσγειώσεις σε απομακρυσμένες περιοχές ή ακόμα και απευθείας σε κινούμενα πλοία. Συγκριτικά με τα παραδοσιακά μέσα, όπως τα ελικόπτερα απαιτούν συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες για ασφαλή απογείωση/προσγείωση, τα eVTOLs διαθέτουν ευελιξία στις συνθήκες και την τοποθεσία.

3.1.4 Αυξημένη ασφάλεια και αξιοπιστία

Η χρήση των eVTOLs προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις όσον αφορά την ασφάλεια και αξιοπιστία, που οδηγούν σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας, ασφαλέστερες επιχειρήσεις και μεγαλύτερη συμμόρφωση με κανονισμούς ασφαλείας.
Τα eVTOLs χρησιμοποιούν προηγμένα αυτοματοποιημένα συστήματα σε σχέση με τα συμβατικά μέσα, μειώνοντας τον κίνδυνο ατυχημάτων. Ταυτόχρονα, οι πτήσεις πραγματοποιούνται με ακριβή εναέρια πλοήγηση και αποφεύγουν τα επικίνδυνα θαλάσσια περάσματα που συχνά συναντούν τα σκάφη. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μέσα όπως τα ελικόπτερα που έχουν υψηλό ρίσκο από ατυχήματα λόγω καιρικών συνθηκών ή τεχνικών αστοχιών και τα σκάφη που έχουν μεγαλύτερος κίνδυνο σύγκρουσης. Τα eVTOLs έχουν μειωμένο κίνδυνο, διαθέτοντας πτητικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Λιγότερα ατυχήματα σημαίνει χαμηλότερα ασφάλιστρα, οδηγώντας σε εξοικονόμηση έως και 20-30% στις ετήσιες ασφαλιστικές δαπάνες.
Ακόμη, τα eVTOLs είναι εξοπλισμένα με προηγμένα συστήματα αυτόματου πιλότου, τεχνολογίες αποφυγής εμποδίων και εφεδρικές λειτουργίες που ενισχύουν την ασφάλεια της πτήσης. Υπάρχουν σύστημα κατανομής ισχύος, όπου σε περίπτωση βλάβης σε έναν κινητήρα, οι υπόλοιποι μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν. Διαθέτουν αυτοματοποιημένη διαχείριση πτήσης με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται ο ανθρώπινος παράγοντας σφαλμάτων και τεχνολογίες αποφυγής σύγκρουσης με ενσωματωμένα συστήματα αισθητήρων που εντοπίζουν και αποφεύγουν εμπόδια.
Τα eVTOLs χρησιμοποιούν ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, τα οποία έχουν πολύ λιγότερα κινούμενα μέρη σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ελικόπτερα και σκάφη, μειώνοντας σημαντικά την πιθανότητα βλαβών. Τα ελικόπτερα απαιτούν τακτική συντήρηση λόγω του σύνθετου μηχανισμού του κινητήρα και των ρότορών τους. Η μειωμένη πιθανότητα βλαβών οδηγεί σε λιγότερες καθυστερήσεις και διακοπές στη λειτουργία, εξοικονομώντας ετησίως από τις απώλειες παραγωγικότητας και τα έξοδα επισκευών.
Τέλος, τα eVTOLs διαθέτουν ενσωματωμένα συστήματα τηλεμετρίας και επικοινωνίας, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση της πτήσης και τη διατήρηση της σύνδεσης με το πλοίο. Με αποτέλεσμα την βελτιωμένη διαχείριση του στόλου και την άμεση ανταπόκριση σε έκτακτες καταστάσεις.
Συμπερασματικά, η αυξημένη ασφάλεια και αξιοπιστία των eVTOLs προσφέρουν, 50-70% μείωση κινδύνων μηχανικών βλαβών, 20-30% χαμηλότερο κόστος ασφάλισης, σημαντική μείωση αποζημιώσεων και προστίμων και βελτίωση της παραγωγικότητας και ικανοποίησης του πληρώματος.

3.2 Προκλήσεις της χρήσης των eVTOL

Ενώ τα eVTOLs προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, η υιοθέτησή τους συνοδεύεται από προκλήσεις και μειονεκτήματα που μπορούν να επηρεάσουν την οικονομική βιωσιμότητα. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά μειονεκτήματα και οι πιθανές οικονομικές επιπτώσεις τους.

Το κύριο μειονέκτημα των eVTOL είναι το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης που απαιτείται. Η αγορά και η εγκατάσταση τους απαιτεί σημαντική αρχική επένδυση, καθώς περιλαμβάνει το κόστος απόκτησης των αεροσκαφών και της απαιτούμενης υποδομής φόρτισης. Το κόστος ενός eVTOL εκτιμάται σε 1 με 5 εκατομμύρια ανά μονάδα, σημαντικά υψηλότερο από ένα παραδοσιακό ελικόπτερο μικρής αυτονομίας. Ενώ, η εγκατάσταση υποδομών φόρτισης σε λιμάνια ή πλοία μπορεί να κοστίσει από 500.000 μέχρι 2 εκατομμύρια ευρώ. Η αυξημένη αρχική δαπάνη μπορεί να επηρεάσει την απόσβεση της επένδυσης σε βάθος χρόνου, γι' αυτό το λόγο απαιτείται σημαντική στρατηγική οικονομικού σχεδιασμού για τη διαχείριση της επένδυσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρά το υψηλό αρχικό κόστος, η μείωση των λειτουργικών εξόδων, καύσιμα, συντήρηση και άλλα που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορεί να αποσβέσει την επένδυση σε 5-10 χρόνια, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Επιπλέον, τα eVTOLs διαθέτουν περιορισμένη αυτονομία και μικρότερη χωρητικότητα φορτίου σε σύγκριση με τα ελικόπτερα ή τα πλοία. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα αυτονομίας και χωρητικότητας για κάθε μέσο μεταφοράς πληρώματος παρουσιάζονται παρακάτω.

- eVTOL: Αυτονομία 50-200 km και μεταφορά έως 5-10 επιβατών.
- Ελικόπτερα: Αυτονομία 400-800 km και μεταφορά 15 και περισσοτέρων επιβατών.
- Σκάφη: Μεταφορά μεγάλου όγκου προσωπικού χωρίς περιορισμούς αυτονομίας.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται περισσότερα δρομολόγια με eVTOLs για την εξυπηρέτηση του ίδιου αριθμού επιβατών, αυξάνοντας το κόστος ανά επιβάτη και να υπάρχει περιορισμός στην επιχειρησιακή χρήση, ιδιαίτερα σε μεγάλες αποστάσεις. Γι' αυτό θα ήταν καλύτερα, αρχικά, να χρησιμοποιούνται τα eVTOLs για μικρές και μεσαίες αποστάσεις όπου μπορούν να μειώσουν το συνολικό κόστος μετακίνησης σε σύγκριση με ελικόπτερα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας τους και την αύξηση της αυτονομίας τους λόγω των μπαταριών θα είναι δυνατή η καθολική χρήση τους.

Ακόμα ένα ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί και φέρει επιπρόσθετο κόστος είναι η δημιουργία κατάλληλων υποδομών φόρτισης. Οι υπάρχουσες υποδομές δεν είναι επαρκώς εξοπλισμένες για τη φόρτιση των eVTOLs, απαιτώντας σημαντικές επενδύσεις. Χρειάζονται σταθμοί φόρτισης υψηλής ισχύος στα λιμάνια και στις πλατφόρμες. Το κόστος μπορεί να φτάσει τα 500.000 με 1 εκατομμύριο ανά εγκατάσταση. Ενώ υπάρχει και εξάρτηση από τις τοπικές υποδομές ενέργειας, οι οποίες μπορεί να είναι ακριβές ή περιορισμένες σε διαθεσιμότητα. Λύση σε αυτό είναι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί να μειώσει μακροπρόθεσμα το κόστος ενέργειας και λειτουργίας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι τα eVTOLs επηρεάζονται περισσότερο από τις καιρικές συνθήκες, ειδικά σε δυνατούς ανέμους ή ακραίες θερμοκρασίες, περιορίζοντας τη διαθεσιμότητά τους, συγκριτικά με τα ελικόπτερα που λειτουργούν σε ευρύτερο εύρος καιρικών συνθηκών. Τα eVTOLs μπορεί να απαιτούν καθυστερήσεις ή ακυρώσεις πτήσεων λόγω κακοκαιρίας που οδηγεί σε οικονομικές επιπτώσεις όπως απώλεια παραγωγικότητας λόγω ακυρώσεων και πρόσθετο κόστος από τη χρήση εναλλακτικών μέσων (ελικόπτερα, σκάφη) όταν τα eVTOLs δεν είναι διαθέσιμα. Γι' αυτό χρειάζεται σωστή προγραμματισμένη χρήση που μπορεί να μειώσει τις επιπτώσεις των καιρικών περιορισμών.

Τα eVTOLs έχουν να αντιμετωπίσουν και πολλές ρυθμιστικές προκλήσεις. Οι κανονισμοί για την λειτουργία τους βρίσκονται ακόμη σε αρχικό στάδιο, με περιορισμένη πιστοποίηση και αδειοδοτήσεις για επιχειρησιακή χρήση. Υπάρχει έλλειψη κανονισμών για τη λειτουργία σε διεθνή ύδατα και αβεβαιότητα σχετικά με τις απαιτήσεις ασφαλείας και τα πρότυπα συντήρησης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καθυστέρηση στην υιοθέτηση των eVTOLs και μπορεί να επηρεάσει τον προγραμματισμό των επιχειρήσεων. Η έγκαιρη προσαρμογή στους κανονισμούς μπορεί να προσφέρει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα μακροπρόθεσμα.

Τέλος, οι μπαταρίες των eVTOLs έχουν περιορισμένο κύκλο ζωής και απαιτούν χρόνο φόρτισης που μπορεί να επηρεάσει τις επιχειρησιακές ανάγκες. Με την σημερινή τεχνολογία ο χρόνος φόρτισης κυμαίνεται στις 1-2 ώρες ενώ διαθέτουν αυτονομία 60-120 λεπτά ανά φόρτιση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει χαμένος επιχειρησιακός χρόνος κατά τη φόρτιση. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και το κόστος για την αντικατάσταση των μπαταριών κάθε 5-7 χρόνια.
Η τεχνολογική πρόοδος στις μπαταρίες θα μειώσει μακροπρόθεσμα το κόστος λειτουργίας.

Τελικά, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των eVTOLs, οι μειονεκτικές πτυχές που σχετίζονται με το κόστος επένδυσης, τις τεχνικές και κανονιστικές προκλήσεις, καθώς και τις καιρικές συνθήκες, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την πλήρη αξιολόγηση της βιωσιμότητάς τους, πράγμα που θα εξεταστεί στο επόμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, με τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας και τη μείωση του κόστους, οι επενδύσεις στα eVTOL μπορεί να αποφέρουν μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη.

3.3 Πιλοτικά προγράμματα: Εφαρμογές σε επιλεγμένες διαδρομές

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια λεπτομερής ανάλυση των βημάτων για την εφαρμογή ενός πιλοτικού προγράμματος χρήσης των eVTOLs στη μεταφορά επιβατών. Το πιλοτικό πρόγραμμα που θα επιλεχθεί θα βοηθήσει στην μελέτη σκοπιμότητας της επένδυσης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά βήματα για την υλοποίηση του πιλοτικού προγράμματος.

Καθορισμός στόχων και σχεδιασμός του προγράμματος
Αρχικά πρέπει να οριστούν οι στόχοι για την επιτυχία του πιλοτικού προγράμματος. Βασικός στόχος είναι η αξιολόγηση της απόδοσης, ασφάλειας, και οικονομικής βιωσιμότητας των eVTOLs. Αυτός ο στόχος θα εξεταστεί μέσω μετρήσιμων κριτηρίων, που είναι ο χρόνος μεταφοράς, το κόστος, η κατανάλωση ενέργειας, το ποσοστό επιτυχημένων προσγειώσεων και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
Στη συνέχεια, πολύ σημαντική είναι η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για τη δοκιμή του προγράμματος. Με βάση όσα έχουν εξεταστεί παραπάνω σχετικά με την αυτονομία των eVTOLs, θα ήταν προτιμότερο να επιλεχθούν εγγύς παράκτιες περιοχές ή λιμάνια με ήπιες καιρικές συνθήκες, όπου θα υπάρχει όσο το δυνατόν παρουσία κατάλληλων πλοίων και διαθέσιμων υποδομών για φόρτιση. Ταυτόχρονα, θα ήταν προτιμότερο, αρχικά, οι διαδρομές που καλύπτουν τα eVTOL να είναι σύντομες ώστε να μην περιορίζονται από την αυτονομία τους.
Απαραίτητη για την υλοποίηση του πιλοτικού προγράμματος είναι η συνεργασία με κατασκευαστές eVTOL και εταιρείες. Αλλά και η συμμετοχή των αρμόδιων κανονιστικών αρχών, όπως η Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας και οι ναυτιλιακές ρυθμιστικές αρχές. Επίσης, η συνεργασία με ερευνητικούς φορείς, όπως πανεπιστήμια ή ερευνητικά κέντρα, θα βοηθήσει στην απαραίτητη τεχνολογική ανάλυση.

Υποδομές και εξοπλισμός

Για την υλοποίηση του προγράμματος πρέπει να φτιαχτούν οι απαραίτητες υποδομές και να γίνουν οι κατάλληλες αναβαθμίσεις/ προσαρμογές. Αρχικά, πρέπει να κατασκευαστούν οι κατάλληλες πλατφόρμες προσγείωσης ή να αναβαθμιστούν οι υπάρχουσες στα πλοία που θα συμμετάσχουν στο πρόγραμμα. Όπως και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας, δηλαδή συμπερίληψη συστημάτων φωτισμού, σήμανσης και μηχανισμών ασφαλούς προσγείωσης.

Έπειτα, χρειάζεται να εξοπλιστούν οι σταθμοί φόρτισης, αρχικά κρίνεται ευκολότερη η ανάπτυξη φορητών σταθμών φόρτισης στα πλοία ή στα λιμάνια, λόγω χαμηλότερου κόστους. Είναι σημαντικό να διασφαλίζεται ότι τα πιλοτικά πλοία που θα χρησιμοποιηθούν διαθέτουν εφεδρικά συστήματα φόρτισης.

Τέλος, τα eVTOLs πρέπει να εξοπλιστούν και με τα κατάλληλα συστήματα παρακολούθησης καιρού και πλοήγησης. Δηλαδή, κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη συστημάτων πραγματικού χρόνου για την παρακολούθηση των θαλάσσιων καιρικών συνθηκών και ο εξοπλισμός με συστήματα αυτόνομης πλοήγησης ή απομακρυσμένου ελέγχου.

Δοκιμαστικές πτήσεις

Για την αξιολόγηση των μετρήσιμων κριτηρίων του προγράμματος είναι απαραίτητη η συλλογή δεδομένων από τις δοκιμαστικές πτήσεις, οι οποίες θα χωριστούν στις φάσεις που αναλύονται παρακάτω.

- Φάση 1: Προσομοιώσεις για την εκπαίδευση του πληρώματος

Αρχικά το πλήρωμα πρέπει να εκπαιδευτεί σε προσομοιωτές για την λειτουργία του eVTOLs. Απαραίτητη είναι η εκπαίδευση ώστε να μπορούν να ασφαλίσουν το αεροσκάφος μετά την προσγείωση αλλά και να φορτίσουν ή αποθηκεύσουν τις μπαταρίες κατάλληλα. Ακόμη, χρειάζονται προσομοιώσεις καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, αρχικά σε εικονικό περιβάλλον, ώστε να γίνει η ανάπτυξη και η δοκιμή των κατάλληλων πρωτοκόλλων.

- Φάση 2: Αρχικές πτήσεις

Στην συνέχεια, γίνονται οι πτήσεις χωρίς επιβαίνοντες, που περιλαμβάνουν δοκιμές προσγείωσης και απογείωσης για την αξιολόγηση της σταθερότητας και του ελέγχου. Ενώ επιλέγονται βραχυπρόθεσμες διαδρομές την πραγματοποίηση των δοκιμών και την συλλογή δεδομένων.

- Φάση 3: Πτήσεις με επιβαίνοντες

Στη τελική φάση γίνονται οι πτήσεις με επιλεγμένους επιβαίνοντες για τις δοκιμές μεταφοράς μικρού αριθμού επιβατών σε προκαθορισμένες διαδρομές. Η επαναληψιμότητα των πτήσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική για την συλλογή επαρκών δεδομένων κάτω από διάφορες συνθήκες.

Συλλογή και ανάλυση δεδομένων

Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών πτήσεων γίνεται συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων ώστε να μπορούν στην συνέχεια να αξιολογηθούν κατάλληλα. Τα δεδομένα αυτά χωρίζονται σε δεδομένα απόδοσης, δηλαδή σε ότι αφορά την συμπεριφορά του αεροσκάφους σε σχέση με τις προδιαγραφές λειτουργίας όπως για παράδειγμα ο χρόνος πτήσης, ο χρόνος φόρτισης, η καταναλισκόμενη ενέργεια, και τα ποσοστά επιτυχούς προσγείωσης. Ταυτόχρονα συγκεντρώνονται δεδομένα ασφαλείας, που περιλαμβάνουν την καταγραφή προβλημάτων, αναφορών επικινδυνότητας, και την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων έκτακτης ανάγκης. Τέλος, πρέπει να ελεγχθεί η περιβαλλοντική επίδραση με τα κατάλληλα δεδομένα, ώστε να γίνει και μια εκτίμηση εκπομπών και ηχορύπανσης σε σύγκριση με τα συμβατικά ελικόπτερα.

Αξιολόγηση και ανατροφοδότηση

Για την επιτυχημένη αξιολόγηση των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν χρειάζεται να γίνει μια συγκριτική ανάλυση, που θα περιλαμβάνει την σύγκριση κόστους και απόδοσης με τις παραδοσιακές μεθόδους μεταφοράς, κυρίως με τα ελικόπτερα. Ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση είναι και η ανατροφοδότηση από τους συμμετέχοντες, αυτό μπορεί να γίνει με συνεντεύξεις και ερωτηματολόγια στους επιβάτες, στους χειριστές των eVTOLs και στο

διοικητικό προσωπικό. Σε αυτό το σημείο θα γίνει και η αναφορά σε βελτιώσεις, τεχνολογικές, διαδικαστικές και λειτουργικές για την μεγαλύτερη επιτυχία του προγράμματος.

Τελική υλοποίηση του προγράμματος

Στο τέλος, γίνεται η επέκταση του προγράμματος σε πιο απομακρυσμένες περιοχές, ώστε να εξεταστεί και εκεί η απόδοση των eVTOL. Τα αποτελέσματα του πιλοτικού προγράμματος θα πρέπει, τελικά, να υποβληθούν στις κανονιστικές αρχές για έγκριση και πιστοποίηση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος ενός πιλοτικού προγράμματος είναι αρκετά υψηλό για να στηριχθεί μόνο από τον ιδιωτικό τομέα, γι' αυτό είναι σημαντικό να δοθούν επιχορηγήσεις από το κράτος ή την Ευρωπαϊκή Ένωση για την υλοποίηση τέτοιων προγραμμάτων.

4 Μεθοδολογία Οικονομικής Ανάλυσης

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η μελέτη σκοπιμότητας της χρήσης των eVTOLs για τη μεταφορά επιβατών. Για το σκοπό αυτό πρέπει αρχικά να οριστούν τα κριτήρια της αξιολόγησης και η μεθοδολογία ανάλυσης κόστους οφέλους που θα ακολουθηθεί και θα αναπτυχθεί στα επόμενα κεφάλαια. Τέλος, στο πλαίσιο αξιολόγησης της επένδυσης κρίνεται σκόπιμο να εφαρμοστούν οι μέθοδοι της ΚΠΑ και του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης.

4.1 Κριτήρια αξιολόγησης και μεθοδολογία της ανάλυσης

4.1.1 Κριτήρια αξιολόγησης

Η αξιολόγηση μιας επένδυσης για τη χρήση eVTOLs στη μεταφορά επιβατών απαιτεί την εξέταση διαφόρων κριτηρίων, που καλύπτουν τεχνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και λειτουργικές πτυχές. Τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης αναπτύσσονται παρακάτω.

- Τεχνικά κριτήρια

Τα τεχνικά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση της επένδυσης είναι αρχικά η αυτονομία και ο χρόνος πτήσης, δηλαδή πόση απόσταση μπορεί να καλύψει το eVTOL με μία φόρτιση και με ποια ταχύτητα για να υπολογιστεί ο χρόνος πτήσης. Ακόμα, πρέπει να εξεταστεί η χωρητικότητα του eVTOL, πόσο φορτίο μπορεί να μεταφέρει σε άτομα και εξοπλισμό ώστε να εκτιμηθεί και ποιες ανάγκες μπορεί να καλύψει. Η αξιοπιστία και η ασφάλεια παίζουν σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση καθώς διασφαλίζουν την ασφαλή πτήση, την αποφυγή συγκρούσεων, και την αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών. Τέλος, αξιολογείται και η συμβατότητα με τις υπάρχουσες υποδομές, δηλαδή η ευκολία ενσωμάτωσης στα τρέχοντα επιχειρησιακά δίκτυα και υποδομές, ώστε να μειωθεί το κόστος για την κατασκευή των αναγκαίων υποδομών.

- Οικονομικά κριτήρια

Τα βασικά οικονομικά κριτήρια για την αξιολόγηση της επένδυσης που θα αναπτυχθούν λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια είναι το αρχικό κόστος της επένδυσης, δηλαδή το κόστος αγοράς ή ενοικίασης των eVTOLs και το κόστος εγκατάστασης σταθμών φόρτισης και υποδομών. Το λειτουργικό κόστος είναι άλλο ένα κριτήριο και αποτελείται από τα κόστη για ενέργεια (ηλεκτρική), συντήρηση, ασφάλιση και το κόστος του προσωπικού (πιλότων και τεχνικών). Επίσης, σημαντικό κριτήριο είναι η εξοικονόμηση έναντι των παραδοσιακών μέσων μεταφοράς (π.χ. σκάφη, ελικόπτερα). Στο τέλος αξιολογείται η απόδοση της επένδυσης (ROI) υπολογίζοντας τη χρονική περίοδο αποπληρωμής και κέρδη που μπορεί να προκύψουν από την επένδυση.

- Λειτουργικά κριτήρια

Τα λειτουργικά κριτήρια περιλαμβάνουν παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγικότητα των μεταφορών και συγκεκριμένα ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο χρόνος απόκρισης, δηλαδή η ικανότητα γρήγορης μεταφοράς επιβατών σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές. Άλλο ένα κριτήριο είναι η ευκολία χρήσης, πόσο εύκολα μπορεί να γίνει η εκπαίδευση των πιλότων και χρήση των υποδομών. Επιπλέον, σημαντική είναι η δυνατότητα εκτέλεσης πολλών πτήσεων ανά ημέρα αλλά και η καταλληλότητα για χρήση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπως διασώσεις ή ταχείες μετακινήσεις.

- Περιβαλλοντικά κριτήρια

Τα περιβαλλοντικά κριτήρια είναι ιδιαίτερα σημαντικά και πρέπει να υπάρχει συμμόρφωση με περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Κρίνεται η ενεργειακή αποδοτικότητα, δηλαδή η κατανάλωση ενέργειας ανά πτήση σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς. Σημαντικό κριτήριο είναι οι εκπομπές άνθρακα καθώς τα eVTOL παράγουν μηδενικές εκπομπές ή χαμηλές σε σύγκριση με τα συμβατικά μέσα. Τέλος, κρίνονται και τα επίπεδα θορύβου κατά την πτήση και προσγείωση σε σχέση με τα παραδοσιακά ελικόπτερα.

- Ρυθμιστικά και νομικά κριτήρια

Τα ρυθμιστικά κριτήρια περιλαμβάνουν τη συμμόρφωση με κανονισμούς, την απαραίτητη έγκριση από τις αρμόδιες αρχές πολιτικής αεροπορίας και ζητήματα ασφάλειας και αδειοδότησης, δηλαδή εξασφάλιση πιστοποιήσεων και τήρηση διεθνών προτύπων.

- Εμπορικά κριτήρια

Τα εμπορικά κριτήρια είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την στροφή της αγοράς στην χρήσης eVTOL. Τέτοια κριτήρια είναι η δυνατότητα χρήσης των eVTOLs για άλλες υπηρεσίες πέρα από τη μεταφορά επιβατών. Άλλο ένα κριτήριο είναι η ανταγωνιστικότητα που προσφέρει στις εταιρείες που θα επιλέξουν την εφαρμογή τους έναντι των ανταγωνιστών τους.

Η ανάλυση κόστους-οφέλους, που περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο, με βάση τα παραπάνω κριτήρια, σε συνδυασμό με πιλοτικές δοκιμές, θα προσφέρει μια πλήρη εικόνα για τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

4.1.2 Μέθοδος ανάλυσης κόστους-οφέλους

Για την μελέτη σκοπιμότητας της χρήσης των eVTOLs είναι απαραίτητη η διεξαγωγή της μεθόδου ανάλυσης κόστους-οφέλους (CBA). Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά βήματα της μεθόδου, που θα αναπτυχθούν στα επόμενα κεφάλαια.

1) Ανάλυση Αρχικής Επένδυσης: Αξιολόγηση του κόστους απόκτησης των eVTOLs και των απαιτούμενων υποδομών.
2) Αξιολόγηση Λειτουργικού Κόστους: Σύγκριση κόστους καυσίμου και συντήρησης με τις συμβατικές μεθόδους μεταφοράς.
3) Αύξηση Παραγωγικότητας: Μέτρηση της πιθανής μείωσης του χρόνου μεταφοράς πληρώματος και των σχετικών οικονομικών οφελών.
4) Απόδοση Επένδυσης (ROI): Υπολογισμός των αναμενόμενων οικονομικών αποδόσεων με την πάροδο του χρόνου για τον προσδιορισμό της βιωσιμότητας.
5) Ανάλυση Ευαισθησίας: Προσδιορισμός βασικών οικονομικών μεταβλητών όπως τιμές καυσίμων, διάρκεια ζωής μπαταρίας και κανονιστικά κόστη που μπορεί να επηρεάσουν τη σκοπιμότητα.
6) Αξιολόγηση Κινδύνου: Εκτίμηση πιθανών κινδύνων όπως τεχνολογική απαξίωση, αλλαγές κανονισμών και λειτουργικές διαταραχές.
7) Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής: Εξέταση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας, συμπεριλαμβανομένης της απόκτησης, λειτουργίας, συντήρησης και απόρριψης.
8) Ανάλυση Ζήτησης Αγοράς: Αξιολόγηση της πιθανής ζήτησης και αποδοχής.

4.1.3 Παραδοχές

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να αναφερθούν κάποιες από τις παραδοχές που θα χρησιμοποιηθούν στους απολογισμούς παρακάτω και συγκεκριμένα σχετικά με το κόστος κάθε διαδρομής.

Κόστος Διαδρομής

Γίνεται διάκριση μεταξύ του κόστους διαδρομής και του κόστους αποστολής. Το κόστος αποστολής είναι απλώς το άθροισμα των κεφαλαιακών εξόδων (με βάση την απόσβεση) και των λειτουργικών εξόδων για μια συγκεκριμένη αποστολή. Συνεπώς, το κόστος αποστολής υπολογίζεται ξεχωριστά για τις εμπορικές αποστολές και τις κενές (deadhead) αποστολές. Το κόστος διαδρομής υπολογίζεται στη συνέχεια με τη χρήση της εξίσωσης:

$$\text{Cost per trip} = (1 + \text{margin})[(\text{Cost per revenue mission}) + \frac{dr}{1 - dr}(\text{Cost per deadhead mission})]$$

Το dr είναι ο λόγος κενών αποστολών: ο αριθμός των κενών αποστολών ως ποσοστό του συνολικού αριθμού αποστολών. Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιείται λόγος κενών αποστολών 35%, ενώ το περιθώριο κόστους έχει οριστεί στο 10%.
Το κόστος ανά χιλιόμετρο ανά επιβάτη υπολογίζεται με την κανονικοποίηση του κόστους διαδρομής, λαμβάνοντας υπόψη την αυτονομία και τον αριθμό των επιβατών από την εμπορική αποστολή. Έτσι, τόσο η επίδραση των κενών αποστολών όσο και το περιθώριο κόστους περιλαμβάνονται στον υπολογισμό.

4.2 Ανάλυση αρχικής επένδυσης και υπολογισμός λειτουργικού κόστους eVTOL

Για την αξιολόγηση σκοπιμότητας της επένδυσης είναι απαραίτητος ο υπολογισμό του αρχικού κόστους επένδυσης που περιλαμβάνει το κόστος απόκτησης των eVTOLs, την ανάπτυξη των κατάλληλων υποδομών για τη λειτουργία τους και τα κόστη για την εκπαίδευση του προσωπικού. Έπειτα, θα υπολογιστούν τα κόστη για τις λειτουργικές δαπάνες των eVTOLs. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα προαναφερόμενα κόστη.

4.2.1 Αρχικό κόστος επένδυσης

Η ανάλυση αρχικής επένδυσης αποτελεί κρίσιμο βήμα για την εκτίμηση της βιωσιμότητας της χρήσης eVTOLs για μεταφορά επιβατών. Περιλαμβάνει τη διερεύνηση των απαιτούμενων κεφαλαίων, των σχετικών υποδομών και των επιπτώσεων στην επιχειρησιακή απόδοση.

Κόστος απόκτησης eVTOL
Για την απόκτηση των eVTOLs, το κόστος ανά μονάδα κυμαίνεται ανάλογα με το μοντέλο. Με βάση τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.3 τα κόστη είναι τα παρακάτω:

- Joby Aviation eVTOL, περίπου 1.3 εκατομμύρια δολάρια ανά μονάδα
- Lilium Jet, περίπου 7 εκατομμύρια δολάρια ανά μονάδα
- Vertical Aerospace VX4, περίπου 4 εκατομμύρια δολάρια ανά μονάδα
- EHang 216, περίπου 410.000 δολάρια ανά μονάδα

Για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου πέρα από το κόστος απόκτησης πρέπει μα ληφθούν υπόψη και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά όπως περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.3 καθώς η αυτονομία και η χωρητικότητα θα επηρεάσουν την λειτουργία και άρα τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης.
Αξίζει να σημειωθεί ότι εξετάστηκαν και εναλλακτικές επιλογές χρηματοδότησης όπως leasing ή συμβόλαια χρηματοδοτικής μίσθωσης, αλλά καθώς η τεχνολογία των eVTOL δεν έχει βγει ακόμα στην αγορά δεν είναι εφικτό να βρεθούν τα αντίστοιχα κόστη. Παρόλ' αυτά είναι μια επιλογή που μπορεί να εξεταστεί για το μέλλον.

Κόστος ανάπτυξης υποδομών
Στο αρχικό κόστος επένδυσης περιλαμβάνεται και το κόστος για τις υποδομές, φορητοί σταθμοί φόρτισης ή μόνιμες εγκαταστάσεις. Επειδή τα ακριβή κόστη δεν είναι ευρέως διαθέσιμα λόγω της αναδυόμενης φύσης του κλάδου και των ποικίλων απαιτήσεων κάθε έργου, θα γίνει μια εκτίμηση με βάση τα στοιχεία που υπάρχουν για την κατασκευή των κόμβων προσγείωσης (Vertiports [12]) σε αστικά περιβάλλοντα. Τα "vertibase" είναι μικρές εγκαταστάσεις που λειτουργούν ως βασικά σημεία προσγείωσης και απογείωσης για eVTOL αεροσκάφη, αποτελούν απλούστερες και οικονομικότερες υποδομές σε σύγκριση με μεγαλύτερα vertiports και περιέχουν βασικές εγκαταστάσεις φόρτισης και περιορισμένες

εγκαταστάσεις συντήρησης και ελέγχου. Τα "vertibase" μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημείο αναφοράς για το κόστος υποδομής των σταθμών φόρτισης. Το εκτιμώμενο κόστος κατασκευής τους κυμαίνεται από 500.000 έως 800.000 ευρώ [12].
Στην εκτίμηση θα ληφθεί υπόψη και η ανάγκη για κατασκευή ή αναβάθμιση των ελικοδρομίων για την υποστήριξη ασφαλών διαδικασιών προσγείωσης και απογείωσης των eVTOLs. Η αναβάθμιση αυτή ενδέχεται να απαιτήσει επιπλέον 150.000€ - 400.000€ ανά πλοίο και εξαρτάται από τις ανάγκες κάθε πλοίου. Πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος δοκιμών και πιστοποίησης αυτών των υποδομών.
Συνολικά εκτιμάται ότι για την ανάπτυξη των απαραίτητων υποδομών θα χρειαστούν 1 με 1.5 εκατομμύρια ευρώ.

Εκπαίδευση προσωπικού
Στο αρχικό κόστος της επένδυσης συγκαταλέγεται και το κόστος εκπαίδευσης πιλότων και πληρωμάτων για τη λειτουργία και συντήρηση του eVTOLs.
Το κόστος εκπαίδευσης και πιστοποίησης των πιλότων για τα eVTOLs ποικίλει ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως η δομή του προγράμματος εκπαίδευσης, η γεωγραφική τοποθεσία και η προηγούμενη εμπειρία του υποψηφίου. Τα εκτιμώμενα έξοδα που οι υποψήφιοι πιλότοι eVTOL μπορούν να αναμένουν κυμαίνονται από 10.000 έως 50.000 ευρώ. Επίσης, χρειάζεται να υπολογιστεί το κόστος της απόκτησης άδειας πιλότου για τη λειτουργία αεροσκαφών που μεταφέρουν επιβάτες το οποίο περιλαμβάνει διάφορα τέλη, όπως έξοδα εξετάσεων και έκδοσης. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το συνολικό κόστος για την απόκτηση τέτοιας άδειας υπολογίζεται περίπου στα 92.000 ευρώ.
Επίσης, τα προγράμματα εκπαίδευσης για τεχνικούς συντήρησης και προσωπικό υποστήριξης εδάφους είναι απαραίτητα για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των eVTOLs. Το κόστος εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των συστημάτων eVTOLs και το επίπεδο εκπαίδευσης που απαιτείται. Ένα μέσο κόστος υπολογίζεται περίπου στα 100.000 ευρώ.

Τελικά, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω αρχικά κόστη που αναφέρθηκαν, για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θεωρείται μια αρχική επένδυση της τάξης των 5 εκατομμυρίων ευρώ. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αρχικό κόστος της επένδυσης είναι μεγάλο, όμως τα eVTOLs θα μπουν το επόμενο σύντομο χρονικό διάστημα σε μαζική παραγωγή πράγμα που σημαίνει ότι θα μειωθεί και το κόστος αγοράς τους. Ακόμη, πιθανά κρατικά κίνητρα ή η δημιουργία πιλοτικών προγραμμάτων μπορούν να μειώσουν σημαντικά το οικονομικό ρίσκο.

4.2.2 Υπολογισμός λειτουργικών δαπανών

Η αξιολόγηση του λειτουργικού κόστους των eVTOLs αποτελεί βασικό παράγοντα για τη βιωσιμότητα της εφαρμογής τους και περιλαμβάνει την ανάλυση διαφόρων παραμέτρων, όπως η κατανάλωση ενέργειας, η συντήρηση, το κόστος προσωπικού και οι επιχειρησιακές διαδικασίες.

Κατανάλωση ενέργειας
Τα eVTOLs λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια, οπότε το κόστος ενέργειας υπολογίζεται βάσει της κατανάλωσης ανά πτήση. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν, η ενέργεια που καταναλώνεται ανά μίλι εκτιμάται στις 1-2 kWh για τα eVTOL που εξετάστηκαν και θεωρώντας τις παρακάτω παραδοχές θα υπολογιστεί το κόστος ενέργειας ανά έτος.

- Κατανάλωση ενέργειας: 1-2 kWh ανά μίλι
- Απόσταση: 100 ναυτικά μίλια (~185 χλμ)
- Μέση διάρκεια πτήσης: 45 λεπτά (0.75 ώρες)
- Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας: 0,20 ευρώ ανά kWh.
- Αριθμός πτήσεων: 1.500 πτήσεις/έτος.

Υπολογισμός κόστους ενέργειας:

1-2 kWh ανά μίλι × 100 μίλια ανά πτήση × 1.500 πτήσεις × 0,20 €/kWh=45.000 €/έτος

Θα θεωρηθεί και μια προσαρμογή για φόρτιση και απώλειες της τάξεως περίπου του +20% και το κόστος ενέργειας εκτιμάται στα 55.000 ευρώ/έτος.

Κόστος συντήρησης και ανταλλακτικών

Τα eVTOLs απαιτούν τακτική προγραμματισμένη συντήρηση για τη διασφάλιση της λειτουργικής ασφάλειας στα συστήματα πρόωσης, τις μπαταρίες και τα δομικά μέρη. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος των ανταλλακτικών για τα διάφορα συστήματα του αεροσκάφους.

Η αντικατάσταση των μπαταριών αποτελεί σημαντικό παράγοντα κόστους συντήρησης. Για παράδειγμα, σε μια τυπική αποστολή 30 λεπτών, η ανανέωση της μπαταρίας μπορεί να αντιπροσωπεύει περίπου το 32% του συνολικού λειτουργικού κόστους. Ενώ η συντήρηση της ατράκτου, των συστημάτων, των κινητήρων και των ελίκων αποτελεί περίπου το 9% του λειτουργικού κόστους για παρόμοιες αποστολές. Διαφορετικά επιχειρησιακά μοντέλα, όπως υπηρεσίες μεταφοράς προς πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου ή άλλες μετακινήσεις, έχουν διαφορετικές δομές κόστους.

Με βάσει τα παραπάνω και θεωρώντας τις παρακάτω παραδοχές θα υπολογιστεί το κόστος για τη συντήρηση και τα ανταλλακτικά ανά έτος.

- Τακτική συντήρηση: 2 φορές τον χρόνο και κοστολογείται περίπου 20.000 ευρώ ανά φορά.
- Έκτακτες επιδιορθώσεις: 5.000 ευρώ/έτος.
- Αντικατάσταση μπαταριών: Κάθε 3-5 χρόνια με συνολικό κόστος 100.000 ευρώ. Άρα η ετήσια απόσβεση για 5 χρόνια εκτιμάται στα 20.000 ευρώ.

Υπολογισμός κόστους συντήρησης:

(20.000 €/ συντήρηση × 2) + 5.000€ + 20.000 € = 75.000 €/έτος

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών αναμένεται να μειώσουν το κόστος στο μέλλον. Ωστόσο, προς το παρόν, η αντικατάσταση των μπαταριών παραμένει ένα σημαντικό έξοδο λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής και του υψηλού κόστους αντικατάστασης.

Κόστος προσωπικού και πρόσθετα λειτουργικά κόστη

Τα κόστη προσωπικού περιλαμβάνουν τις αμοιβές πιλότων και τεχνικού προσωπικού, την εκπαίδευση του προσωπικού στη χρήση και συντήρηση των eVTOLs και πρόσθετα κόστη για εκπαίδευση σε νέες τεχνολογίες και πρότυπα ασφαλείας. Ακόμα θα συμπεριληφθούν τα έξοδα για λογισμικό πλοήγησης και άλλα λειτουργικά κόστη.

Θεωρώντας τις παρακάτω παραδοχές θα υπολογιστεί το κόστος για το προσωπικό και πρόσθετα λειτουργικά κόστη ανά έτος.

- Μισθοί πιλότων ή χειριστών: 50.000 ευρώ/έτος.
- Λογισμικό πλοήγησης και αναβαθμίσεις: 30.000 ευρώ/έτος.
- Απρόβλεπτα λειτουργικά κόστη: 20.000 ευρώ/έτος.

Υπολογισμός κόστος προσωπικού και πρόσθετα λειτουργικά κόστη ανά έτος:

50.000 €+30.000€+20.000€=100.000€/έτος

Συνοψίζοντας τα παραπάνω τα συνολικά ετήσια λειτουργικά έξοδα ανέρχονται στα:

55.000€ (ενέργεια) + 75.000€ (συντήρηση)+100.000€ (λειτουργία)=230.000€/έτος

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί βασίζονται σε συντηρητικές εκτιμήσεις, ώστε να καλύπτουν απρόβλεπτες αυξήσεις κόστους για παράδειγμα σε περιπτώσεις έντονης χρήσης, τα λειτουργικά κόστη μπορεί να αυξηθούν, ιδιαίτερα για τη συντήρηση και την ενέργεια.

4.3 Σύγκριση με συμβατικές μεθόδους μεταφοράς

Η σύγκριση μεταξύ των eVTOLs και των παραδοσιακών μέσων μεταφοράς, όπως τα ελικόπτερα και τα ταχύπλοα σκάφη, αποτελεί κρίσιμο βήμα για τον υπολογισμό της εξοικονόμησης κόστους και πόρων. Αυτή η ανάλυση περιλαμβάνει τον υπολογισμό του λειτουργικό κόστους κάθε μέσου με στόχο τον υπολογισμό του οφέλους που θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια για τον υπολογισμό της απόδοσης της επένδυσης.

4.3.1 Ελικόπτερα

Για ένα ελικόπτερο τύπου Sikorsky S-92 όπως μελετήθηκε στο κεφάλαιο 3.4. και θεωρώντας τις παρακάτω παραδοχές υπολογίζεται το συνολικό ετήσιο λειτουργικό του κόστος.

- Διάρκεια πτήσης: 45 λεπτά (0.75 ώρες)
- Κόστος καυσίμων: 350 λίτρα/πτήση × 1,50 €/λίτρο = 525 €/πτήσης
- Κόστος πτήσης ανά πήγαινε-έλα: περίπου 1000 ευρώ, λόγω μικρότερης κατανάλωσης στο γύρνα που είναι ξεφόρτωτο το ελικόπτερο
- Ετήσιες μεταφορές: 1.500 πτήσεις ετησίως, για παράδειγμα σε μεγάλα πλοία ή στόλους, το ίδιο θεωρήθηκε και για τα eVTOLs.

Άρα το συνολικό κόστος καυσίμων υπολογίζεται:

1000 ευρώ ανά πήγαινε-έλα × 1500 πήγαινε-έλα = 1.500.000 ευρώ ετησίως

Σε αυτό προστίθεται το κόστος της συντήρηση του ελικοπτέρου που ανέρχεται στα 500.000 ευρώ/έτος αναλόγως με το μοντέλο και την ένταση χρήσης και το κόστος πληρώματος που ανέρχεται στα 300.000 ευρώ/έτος για 2 πιλότους και τεχνικό προσωπικό.

Έτσι, το συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος για ένα ελικόπτερο υπολογίζεται στα 2.300.000 ευρώ.

4.3.2 Σκάφη

Τα ετήσια λειτουργικά έξοδα ενός σκάφους μπορεί να κυμαίνονται ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος, ο τύπος και οι συνθήκες λειτουργίας. Θεωρώντας τις παρακάτω παραδοχές υπολογίζεται το συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος για ταχύπλοα σκάφη.

- Καύσιμα Σκαφών: 150 ευρώ ανά ώρα πλεύσης.
- Χρόνος μεταφοράς ανά πήγαινε-έλα: 5 ώρες κατά μέσο όρο (πήγαινε-έλα).
- Κόστος ανά πήγαινε-έλα: περίπου 750 ευρώ.
- Ετήσιες μεταφορές: 1.500 πλεύσεις ετησίως.

Άρα το συνολικό κόστος καυσίμων υπολογίζεται:

750 ευρώ ανά πήγαινε-έλα × 1500 πήγαινε-έλα = 1.125.000 ευρώ.

Σε αυτό προστίθεται το κόστος συντήρησης του σκάφους που ανέρχεται περίπου στα 100.000 ευρώ/έτος για τακτική συντήρηση (κινητήρας, σύστημα πρόωσης, γάστρα) και το κόστος του πληρώματος που ανέρχεται στα 250.000 ευρώ/έτος.

Έτσι, το συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος για ένα ταχύπλοο σκάφος υπολογίζεται στα 1.475.000 ευρώ.

4.3.3 Υπολογισμός ετήσιας εξοικονόμησης

Στη συνέχεια όσων υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 4.2.2 για τα λειτουργικά κόστη των eVTOLs σε αυτό το κεφάλαιο θα υπολογιστεί η εξοικονόμηση σε σχέση με την χρήση συμβατικών μέσων μεταφοράς.
Συνοπτικά τα ετήσια λειτουργικά έξοδα των eVTOL είναι:

- Σε ενέργεια 55.000 ευρώ
- Στη συντήρηση 75.000 ευρώ
- Για τη λειτουργία 100.000 ευρώ

Άρα, το συνολικό ετήσιο κόστος των eVTOLs υπολογίστηκε στα 230.000 ευρώ λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4.2.2.

Για τον υπολογισμό της ετήσιας εξοικονόμησης με την χρήση των eVTOLs αντί για την μεταφορά επιβατών με συμβατικά μέσα, δηλαδή ελικόπτερα και ταχύπλοα σκάφη, υπολογίζεται ο μέσος όρος των εξόδων λειτουργίας των συμβατικών μέσων όπως υπολογίστηκαν στις παραπάνω υποενότητες.
Έτσι, ο μέσος όρος λειτουργικού κόστους μεταξύ ελικοπτέρων και σκαφών είναι:

$$(2.300.000+1.475.000)/2=1.887.500 \text{ ευρώ/έτος.}$$

Ενώ το ετήσιο λειτουργικό κόστος των eVTOLs υπολογίστηκε στα 230.000 ευρώ.

Άρα, η ετήσια εξοικονόμηση υπολογίζεται στα:

$$1.887.500-230.000=1.657.500 \text{ ευρώ}$$

Για την περεταίρω ανάλυση, θα χρησιμοποιηθεί μια συντηρητική εκτίμηση εξοικονόμησης θεωρώντας απώλειες της τάξεως του 20% για να ληφθούν υπόψη πιθανές αποκλίσεις λόγω λειτουργικών συνθηκών. Έτσι η ετήσια εξοικονόμηση υπολογίζεται στα 1.326.000 ευρώ.

Παρακάτω γίνεται μια σύγκριση των μέσων μεταφοράς που περιλαμβάνει παράγοντες όπως το λειτουργικό κόστος, την απόδοση, την αξιοπιστία και την περιβαλλοντική επίδραση. Στόχος είναι να παρουσιαστούν και άλλα πλεονεκτήματα των eVTOLs πέρα από το μειωμένο λειτουργικό κόστος που μπορούν μακροπρόθεσμα να επιφέρουν και οικονομικό κέρδος. Παρόλ' αυτά, όπως, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα η χωρητικότητα των eVTOLs είναι περιορισμένη πράγμα που σημαίνει ότι η παραπάνω εξοικονόμηση κόστους που υπολογίστηκε είναι αποδεκτή για μεταφορά μικρού αριθμού επιβατών, σε αντίθετη περίπτωση τα eVTOLs θα πρέπει θα εκτελέσουν διπλή και τριπλή διαδρομή που αυξάνει τα λειτουργικά έξοδα.

Πίνακας 1: Σύγκριση χαρακτηριστικών μέσων μεταφοράς

Παράμετρος	eVTOL	Ελικόπτερα	Ταχύπλοα Σκάφη
Κόστος ανά ώρα	€300 - €500	€1.200 - €2.500	€800 - €1.500
Ενέργεια	Ηλεκτρική	Καύσιμα	Καύσιμα
Συντήρηση	Χαμηλό	Υψηλό	Μέτριο
Εκπομπές CO_2	Μηδενικές	Υψηλές	Υψηλές
Μέση διαδρομή	50-300 km	100-500 km	50-400 km
Χωρητικότητα	4-8 άτομα	10-20 άτομα	10-50 άτομα

4.4 Απόδοση Επένδυσης

Στα προηγούμενα κεφάλαια έχει γίνει η εκτίμηση του συνολικού κόστους επένδυσης, συμπεριλαμβανομένου του κόστους απόκτησης, υποδομών και λειτουργίας και προσδιορίστηκε η εξοικονόμηση του λειτουργικού κόστους σε σχέση με τη χρήση συμβατικών μέσων. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει υπολογισμός του χρονικού διαστήματος απόσβεσης της επένδυσης.

Με βάση όσα αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.2, το αρχικό κόστος επένδυσης για την απόκτηση του eVTOL και τις απαραίτητες υποδομές ανέρχεται στα 5.000.000 ευρώ. Το ποσό αυτό επιβαρύνει μόνο το πρώτο έτος της επένδυσης. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν τα ετήσια λειτουργικά έξοδα που ανέρχεται σε 230.000 ευρώ.

Στο κεφάλαιο 4.3 υπολογίστηκε η ετήσια εξοικονόμηση κόστους σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους μεταφοράς που ανέρχεται στα 1.326.000 ευρώ.

Για την συγκεκριμένη μελέτη θα χρησιμοποιηθεί μια περίοδος ανάλυσης στα 10 χρόνια καθώς εκτιμάται ως η διάρκεια ζωής της επένδυσης πριν από μια σημαντική αναβάθμιση ή αντικατάσταση.

Το καθαρό ετήσιο ταμειακό αποτέλεσμα υπολογίζεται ως:

Καθαρό Ετήσιο Ταμειακό Αποτέλεσμα = Εξοικονόμηση Κόστους - Συνολικά Ετήσια Έξοδα

Στη συνέχεια, το αθροιστικό ταμειακό αποτέλεσμα υπολογίζεται προσθέτοντας το ετήσιο καθαρό αποτέλεσμα και αφαιρώντας το αρχικό κόστος.

Πίνακας 2: Υπολογισμός αθροιστικού ταμειακού αποτελέσματος με περίοδο ανάλυσης τα 10 χρόνια

Χρόνος	Αρχική Επένδυση	Συνολικά ετήσια κόστη	Ετήσια εξοικονόμηση	Καθαρό ετήσιο ταμειακό αποτέλεσμα	Αθροιστικό ταμειακό αποτέλεσμα
1	5000000	230000	1326000	1096000	-3904000
2	0	230000	1326000	1096000	-2808000
3	0	230000	1326000	1096000	-1712000
4	0	230000	1326000	1096000	-616000
5	0	230000	1326000	1096000	480000
6	0	230000	1326000	1096000	1576000
7	0	230000	1326000	1096000	2672000
8	0	230000	1326000	1096000	3768000
9	0	230000	1326000	1096000	4864000
10	0	230000	1326000	1096000	5960000

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα μόνο από την ετήσια εξοικονόμηση η επένδυση θα έχει αποσβεσθεί μέσα σε 5 χρόνια. Παρακάτω υπολογίζεται και η απόδοση της επένδυσης (ROI).

Ο τύπος για την Απόδοση Επένδυσης είναι:

$$ROI = \left(\frac{Καθαρό\ κέρδος}{Συνολικό\ κόστος\ επένδυσης}\right) \times 100 \qquad (1)$$

Όπου:

- Καθαρό Κέρδος = Ετήσια Εξοικονόμηση – Λειτουργικά Κόστη
- Συνολικό Κόστος Επένδυσης = Αγορά eVTOL + Υποδομή + Εκπαίδευση προσωπικού

Άρα, η απόδοση της επένδυσης υπολογίζεται:

$$ROI = \left(\frac{1096000}{5000000}\right) \times 100 = 21.92\ \%$$

Τα στάδια εκτίμησης της απόδοσης της επένδυσης (ROI) είναι τα εξής:

- Βραχυπρόθεσμα (1-3 έτη): Χαμηλή απόδοση

Στο αρχικό στάδιο της επένδυσης, η απόδοση αναμένεται να είναι χαμηλή ή ακόμα και αρνητική. Αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών αρχικών δαπανών και της περιορισμένης ζήτησης. Οι κύριοι λόγοι περιλαμβάνουν τα υψηλά αρχικά κόστη, αγορά eVTOL, κατασκευή υποδομών, εκπαίδευση προσωπικού, αδειοδοτήσεις κ.λπ. Ακόμα υπάρχει αβεβαιότητα στην αγορά, καθώς η τεχνολογία είναι νέα, οι εταιρείες μπορεί να είναι επιφυλακτικές στο να τα υιοθετήσουν.

- Μεσοπρόθεσμα (3-7 έτη): Αύξηση απόδοσης

Σε αυτό το στάδιο, η απόδοση αρχίζει να βελτιώνεται, καθώς η αγορά των eVTOLs ωριμάζει και οι λειτουργικές βελτιώσεις οδηγούν σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Παράγοντες που οδηγούν σε αύξηση της απόδοσης είναι η όλο και μεγαλύτερη μείωση των λειτουργικών εξόδων λόγω της βελτίωσης στις τεχνολογίες μπαταριών και των σταθμών φόρτισης με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος ανά πτήση. Σιγά-σιγά οι εταιρείες αναγνωρίζουν τα οφέλη των eVTOLs και επεκτείνουν τη χρήση τους με αποτέλεσμα καλύτερες και περισσότερες υποδομές που βελτιώνουν την επιχειρησιακή αποδοτικότητα. Ακόμα, η μαζική παραγωγή μειώνει το κόστος των eVTOLs, και η εμπειρία στη συντήρηση και τις διαδικασίες μειώνει τις καθυστερήσεις και τα απρόοπτα κόστη.

- Μακροπρόθεσμα (7-10 έτη): Υψηλή απόδοση

Μετά από 7-10 χρόνια, η τεχνολογία θα έχει ωριμάσει πλήρως και η αγορά θα έχει διευρυνθεί, οδηγώντας σε υψηλή απόδοση επένδυσης. Οι παράγοντες που συμβάλλουν είναι η ευρεία αποδοχή της τεχνολογίας, τα eVTOLs θα αποτελούν κοινό μέσο μεταφοράς, μειώνοντας την ανάγκη για πιο ακριβά ελικόπτερα ή χρονοβόρα πλωτά μέσα. Θα υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων δηλαδή σημαντική μείωση του χρόνου μεταφοράς, μεγαλύτερη επιχειρησιακή ευελιξία και χαμηλότερα κόστη λειτουργίας. Ο αυξημένος ανταγωνισμός, περισσότεροι κατασκευαστές και πάροχοι υπηρεσιών, θα προσφέρει ανταγωνιστικές λύσεις, μειώνοντας περαιτέρω το κόστος. Τέλος, η χρήση των eVTOLs θα επεκταθεί και σε άλλες ανάγκες (π.χ. μεταφορά ανταλλακτικών, έκτακτες αποστολές).

4.5 Ανάλυση ευαισθησίας για τη μεταφορά επιβατών με eVTOLs

Η ανάλυση ευαισθησίας είναι ένα κρίσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας της χρήσης των eVTOL. Σκοπός της είναι να εντοπίσει τις βασικές οικονομικές και λειτουργικές μεταβλητές που μπορεί να επηρεάσουν το συνολικό κόστος και την αποδοτικότητα του συστήματος. Επίσης θα παρουσιαστούν διάφορα σενάρια ευαισθησίας, που το καθένα εξετάζει διαφορετικές οικονομικές και λειτουργικές μεταβλητές, παρέχοντας μια ευρεία εικόνα των πιθανών αποτελεσμάτων.

4.5.1 Κύριες μεταβλητές για την ανάλυση ευαισθησίας

Οι βασικές μεταβλητές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των επιχειρήσεων με eVTOLs εντοπίζονται παρακάτω και χωρίζονται σε οικονομικές και λειτουργικές.

Οικονομικές μεταβλητές

- Τιμές ενέργειας, δηλαδή το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και οι διακυμάνσεις στις τιμές καυσίμων επηρεάζουν το κόστος λειτουργίας ανά ώρα πτήσης.
- Λειτουργικά κόστη, δηλαδή κόστη συντήρησης, μισθοί και έξοδα εκπαίδευσης πληρώματος και ασφαλιστικά κόστη που επηρεάζουν την ετήσια εξοικονόμηση.
- Επενδυτικό κόστος που επηρεάζει το αρχικό κόστος επένδυσης.
- Επιδοτήσεις και χρηματοδοτικά κίνητρα με αποτέλεσμα την μείωση του αρχικού κόστους αγοράς του εξοπλισμού και μείωση του χρόνου απόσβεσης
- Μεταβολές στους κανονισμούς ασφαλείας και περιβαλλοντικών απαιτήσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε ευνοϊκότερο ή μη περιβάλλον για την χρήση των eVTOLs.

Λειτουργικές και τεχνολογικές μεταβλητές

- Απόδοση και εξέλιξη των μπαταριών που οδηγεί σε βελτίωση της αυτονομίας του eVTOL και του χρόνου πτήσης.
- Τεχνολογική ωρίμανση και αναβαθμίσεις που οδηγούν σε μικρότερους χρόνους φόρτισης και μεγαλύτερη αποδοτικότητα των λειτουργιών.
- Ανθεκτικότητα σε καιρικές συνθήκες με αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγικότητα και διαθεσιμότητα eVTOL για καθημερινή χρήση.
- Ικανότητα μεταφοράς μεγαλύτερου φορτίου (αριθμός πληρώματος και βάρος φορτίου) με αποτέλεσμα να μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά μέσα με μια διαδρομή και να είναι κατάλληλα για περισσότερες χρήσεις, π.χ. μεταφορά προμήθειών κ.ά.

4.5.2 Σενάρια Ανάλυσης Ευαισθησίας

Η ανάλυση των σεναρίων ευαισθησίας παρέχει πολύτιμα δεδομένα για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επένδυση στα eVTOLs. Η συνεχής παρακολούθηση των οικονομικών και τεχνολογικών τάσεων, καθώς και η ευελιξία στη στρατηγική προσαρμογής, είναι απαραίτητες για τη μεγιστοποίηση των οφελών και την ελαχιστοποίηση των κινδύνων. Παρακάτω αναλύονται τρία διαφορετικά σενάρια.

4.5.2.a Αισιόδοξο σενάριο

Στο αισιόδοξο σενάριο θεωρείται ότι υπάρχουν σταθερές ή μειούμενες τιμές ενέργειας κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάλυσης. Ενώ υπάρχουν βελτιώσεις στην τεχνολογία μπαταριών που επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής τους. Ταυτόχρονα, δημιουργείται ένα ευνοϊκό νομοθετικό περιβάλλον με φορολογικά κίνητρα. Με βάση αυτό το σενάριο θα υπολογιστούν ξανά τα κόστη της επένδυσης, η εξοικονόμηση κόστους από τα συμβατικά μέσα και τελικά η απόδοση της επένδυσης, με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκαν στα κεφάλαια 4.2 έως 4.4.
Θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές:

- Το αρχικό κόστος της επένδυσης θα θεωρηθεί μειωμένο κατά 20% λόγω των φορολογικών κινήτρων, τα κόστη για την εκπαίδευση του προσωπικού θεωρούνται σταθερά.
- Το κόστος ενέργειας θεωρείται σταθερό στα 55.000 ευρώ/έτος, όπως είχε υπολογιστεί στο κεφάλαιο 4.2.2.
- Το κόστος συντήρησης θα μειωθεί λόγω των βελτιώσεων στις μπαταρίες των eVTOLs, καθιστώντας την ανάγκη αντικατάστασης τους στα 8-10 χρόνια και την τιμή τους φθηνότερη λόγω της οικονομίας κλίμακας. Έτσι το κόστος συντήρησης ανέρχεται στα 55.000 ευρώ/έτος.

- Το ετήσιο κόστος προσωπικού και τα υπόλοιπα απρόβλεπτα ετήσια λειτουργικά έξοδα θα θεωρηθούν σταθερά.
- Τα λειτουργικά κόστη των eVTOLs υπολογίζονται με βάση τα παραπάνω στα 210.000 ευρώ/έτος
- Ο μέσος όρος του λειτουργικού κόστους μεταξύ ελικοπτέρων και σκαφών θα θεωρηθεί σταθερός και ίσος με 1.887.500 ευρώ/έτος.
- Η ετήσια εξοικονόμηση από την χρήση των eVTOLs αντί των συμβατικών μέσων υπολογίζεται στα 1.887.500-210.000= 1.677.500 ευρώ/έτος. Θεωρώντας απώλειες της τάξεως του 15% για να ληφθούν υπόψη πιθανές αποκλίσεις. Η ετήσια εξοικονόμηση υπολογίζεται στα 1.425.000 ευρώ.

Έτσι, υπολογίζεται το καθαρό κέρδος και το συνολικό κόστος της επένδυσης:
Καθαρό Κέρδος=Ετήσια Εξοικονόμηση–Λειτουργικά Κόστη=1.425.000 – 210.000=1.215.000 ευρώ/έτος
Συνολικό Κόστος Επένδυσης = 4 εκατομμύρια ευρώ

Άρα, η απόδοση της επένδυσης υπολογίζεται από τον τύπο (1):

$$ROI = \left(\frac{1215000}{4000000}\right) \times 100 = 30.375\ \%$$

Τελικά υπολογίζεται μία μείωση της περιόδου απόσβεσης επένδυσης στα 4 χρόνια.

4.5.2.b Μετριοπαθές σενάριο

Στο μετριοπαθές σενάριο θεωρείται μια σταδιακή αύξηση των τιμών ενέργειας με την πάροδο των χρόνων και μια ήπια βελτίωση στη διάρκεια ζωής των μπαταριών, ενώ οι υφιστάμενες κανονιστικές απαιτήσεις διατηρούνται σταθερές. Όπως και στο προηγούμενο σενάριο γίνονται οι αντίστοιχοι υπολογισμοί.
Θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές:

- Το αρχικό κόστος της επένδυσης θα θεωρηθεί σταθερό όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 4.2.1.
- Το κόστος ενέργειας θα αυξηθεί σταδιακά μέσα στα χρόνια με ένα ποσοστό 15% έτσι όπως είχε υπολογιστεί στο κεφάλαιο 4.2.2, το κόστος ενέργειας ανέρχεται στα 62.100 ευρώ/έτος.
- Το κόστος συντήρησης θα μειωθεί λόγω της ήπιας βελτίωσης στις μπαταρίες των eVTOL, καθιστώντας την ανάγκη αντικατάστασης τους στα 5-8 χρόνια και την τιμή τους φθηνότερη λόγω της οικονομίας κλίμακας. Έτσι το κόστος συντήρησης ανέρχεται στα 65.000 ευρώ/έτος.
- Το ετήσιο κόστος προσωπικού και τα υπόλοιπα απρόβλεπτα ετήσια λειτουργικά έξοδα θα θεωρηθούν σταθερά.
- Τα λειτουργικά κόστη των eVTOLs υπολογίζονται με βάση τα παραπάνω στα 227.100 ευρώ/έτος
- Ο μέσος όρος του λειτουργικού κόστους μεταξύ ελικοπτέρων και σκαφών θα αυξηθεί σταδιακά λόγω της αύξησης της τιμής του καυσίμου. Με μια αύξηση του καυσίμου 15% μέσα στα χρόνια, όπως είχε υπολογιστεί στο κεφάλαιο 4.3., ο μέσος όρος του λειτουργικού κόστους των συμβατικών μέσων ανέρχεται στα 2.084.000 ευρώ/έτος.
- Η ετήσια εξοικονόμηση από την χρήση των eVTOL αντί των συμβατικών μέσων υπολογίζεται στα 2.084.000-227.100= 1.856.900 ευρώ/έτος. Θεωρώντας απώλειες της τάξεως του 20% για να ληφθούν υπόψη πιθανές αποκλίσεις. Η ετήσια εξοικονόμηση υπολογίζεται στα 1.425.000 ευρώ.

Έτσι, υπολογίζεται το καθαρό κέρδος και το συνολικό κόστος της επένδυσης:
Καθαρό Κέρδος=Ετήσια Εξοικονόμηση–Λειτουργικά Κόστη=1.425.000 – 227.100=1.197.900 ευρώ/έτος
Συνολικό Κόστος Επένδυσης = 5 εκατομμύρια ευρώ

Άρα, η απόδοση της επένδυσης υπολογίζεται από τον τύπο (1):

$$ROI = \left(\frac{1197900}{5000000}\right) \times 100 = 23.96\ \%$$

Τελικά υπολογίζεται μία μείωση της περιόδου απόσβεσης επένδυσης στα 5 χρόνια. Παρατηρείται ότι με μία αντίστοιχη αύξηση της ενέργειας και του καυσίμου η επένδυση αποσβένεται γρηγορότερα, καθώς το κόστος του καυσίμου αποτελεί ένα μεγάλο έξοδο για τα συμβατικά μέσα.

4.5.2.c Απαισιόδοξο σενάριο

Στο απαισιόδοξο σενάριο θεωρείται μια απότομη αύξηση στις τιμές ενέργειας, ενώ εκτιμάται μια σημαντική φθορά των μπαταριών με αυξημένα κόστη αντικατάστασης. Παράλληλα, υπάρχει αυστηρότερο ρυθμιστικό πλαίσιο που αυξάνει το κόστος συμμόρφωσης. Αντίστοιχα υπολογίζεται η απόδοση της επένδυσης όπως προηγουμένως.
Θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές:

- Το αρχικό κόστος της επένδυσης θα θεωρηθεί αυξημένο λόγω ρυθμιστικό πλαίσιο που αυξάνει το κόστος συμμόρφωσης, τα κόστη για την εκπαίδευση του προσωπικού θεωρούνται σταθερά. Έτσι όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 4.2.1 και θεωρώντας πρόσθετα έξοδα της τάξεως των 200.000 ευρώ για κόστη συμμόρφωσης και ακριβότερο το κόστος τον υποδομών. Το αρχικό κόστος επένδυσης θεωρείται στα 6.000.000 ευρώ.
- Το κόστος ενέργειας θα αυξηθεί ραγδαία μέσα στα χρόνια με ένα ποσοστό 30% έτσι όπως είχε υπολογιστεί στο κεφάλαιο 4.2.2, το κόστος ενέργειας ανέρχεται στα 70.200 ευρώ/έτος.
- Το κόστος συντήρησης θα αυξηθεί λόγω σημαντικών φθορών στις μπαταρίες των eVTOLs, καθιστώντας την ανάγκη αντικατάστασης τους στα 2.5 χρόνια. Έτσι το κόστος συντήρησης, όπως είχε υπολογιστεί στο κεφάλαιο 4.2.2, ανέρχεται στα 125.000 ευρώ/έτος.
- Το ετήσιο κόστος προσωπικού και τα υπόλοιπα απρόβλεπτα ετήσια λειτουργικά έξοδα θα θεωρηθούν σταθερά.
- Τα λειτουργικά κόστη των eVTOLs υπολογίζονται με βάση τα παραπάνω στα 295.200 ευρώ/έτος
- Ο μέσος όρος του λειτουργικού κόστους μεταξύ ελικοπτέρων και σκαφών θα αυξηθεί σταδιακά λόγο της αύξησης της τιμής του καυσίμου. Με μια αύξηση του καυσίμου 15% μέσα στα χρόνια, όπως είχε υπολογιστεί στο κεφάλαιο 4.3., ο μέσος όρος του λειτουργικού κόστους των συμβατικών μέσων ανέρχεται στα 2.084.000 ευρώ/έτος.
- Η ετήσια εξοικονόμηση από την χρήση των eVTOLs αντί των συμβατικών μέσων υπολογίζεται στα 2.084.000-295.200= 1.788.800 ευρώ/έτος. Θεωρώντας απώλειες της τάξεως του 20% για να ληφθούν υπόψη πιθανές αποκλίσεις. Η ετήσια εξοικονόμηση υπολογίζεται στα 1.431.000 ευρώ.

Έτσι, υπολογίζεται το καθαρό κέρδος και το συνολικό κόστος της επένδυσης:
Καθαρό Κέρδος=Ετήσια Εξοικονόμηση–Λειτουργικά Κόστη=1.431.000 – 295.200=1.135.800 ευρώ/έτος
Συνολικό Κόστος Επένδυσης = 6.000.000 ευρώ

Άρα, η απόδοση της επένδυσης υπολογίζεται από τον τύπο (1):

$$ROI = \left(\frac{1135800}{6000000}\right) \times 100 = 18.93\ \%$$

Τελικά υπολογίζεται μία μείωση της περιόδου απόσβεσης επένδυσης στα 6 χρόνια, φαίνεται ότι είναι ιδιαίτερα κρίσιμο να δοθούν κίνητρα και διευκολύνσεις για την μείωση του κόστους της αρχικής επένδυσης.

4.6 Μέθοδοι αξιολόγησης της επένδυσης

Στο πλαίσιο αξιολόγησης της επένδυσης κρίνεται σκόπιμο να εφαρμοστούν οι μέθοδοι της ΚΠΑ και του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης. Κοινό στοιχείο των δυο μεθόδων είναι η χρήση προεξοφλημένων ταμειακών ροών. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση σχετικά με τις αναμενόμενες χρηματικές ροές. Επιπλέον, οι δυο αυτές μέθοδοι ικανοποιούν τα 3 βασικά κριτήρια (σύνολο ταμειακών ροών, χρονική αξία του χρήματος, αβεβαιότητα μελλοντικών ταμειακών ροών) και καταλήγουν στην επιλογή των πιο επικερδών επενδύσεων.
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων σχετικά με την αποδοχή ή την απόρριψη της επένδυσης είναι δυνατόν να διαφέρουν. Σε αυτή την περίπτωση, προτιμάται το αποτέλεσμα της ΚΠΑ καθώς αποτιμά ακριβώς το οικονομικό αντίκτυπο κάθε επένδυσης στην αξία μιας εταιρείας.

Κάθε ιδιωτικός ή δημόσιος φορέας στοχεύει μέσω κάθε επένδυσης στην εξασφάλιση των μέγιστων οικονομικών ωφελειών. Προς αυτή τη κατεύθυνση δεσμεύονται μια σειρά από περιουσιακά στοιχεία του εκάστοτε φορέα όπως οικονομικοί πόροι, εξοπλισμός και ανθρώπινο δυναμικό τα οποία θα χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της επένδυσης. Εν συνεχεία, το αρμόδιο οικονομικό τμήμα κάθε εταιρείας εξετάζει το σύνολο των επενδυτικών σχεδίων που είναι διαθέσιμα και επιλέγει εκείνο το επενδυτικό σχέδιο που προβλέπεται να μεγιστοποιήσει το κέρδος των μετόχων [13].

Η αξιολόγηση των επενδύσεων πραγματοποιείται με συγκεκριμένες τεχνικές αξιολόγησης επενδύσεων [13]:

1. Περίοδος επανάκτησης κεφαλαίου (Payback Period)
2. Μέθοδος προεξοφλημένης περιόδου επανάκτησης κεφαλαίου (Discounted Payback Period)
3. Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)
4. Δείκτης κερδοφορίας (Profitability Index)
5. Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Internal Rate of Return)
6. Τροποποιημένος εσωτερικός ρυθμός απόδοσης (Modified Internal Rate of Return)

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο ή τις μεθόδους που εφαρμόζονται για την αξιολόγηση ενός επενδυτικού σχεδίου, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψιν τρία βασικά κριτήρια, η ικανοποίηση των οποίων οδηγεί κατά κανόνα στην επίτευξη της μεγιστοποίησης του κέρδους για τον υποψήφιο επενδυτή με βάση το διαθέσιμο κεφάλαιο. Τα κριτήρια αυτά είναι:

- Οι μελλοντικές ταμειακές ροές της επένδυσης
- Η χρονική αξία του χρήματος
- Η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τις μελλοντικές ταμειακές ροές

Πιθανοί οικονομικοί περιορισμοί στο υπό διάθεση κεφάλαιο για επένδυση (capital rationing) οδηγούν συχνά στην επιλογή επενδυτικών σχεδίων έναντι άλλων παρά το γεγονός ότι είναι δυνατόν περισσότερες από μια επενδύσεις να είναι επικερδείς. Επιπρόσθετα, η σχέση εξάρτησης μεταξύ των διάφορων επενδυτικών σχεδίων μπορεί να επηρεάσει τη πραγματοποίηση ή μη κάποιας πιθανής επένδυσης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση ασυμβίβαστων επενδυτικών σχεδίων, η ταυτόχρονη υλοποίηση των οποίων δεν είναι δυνατή και επιλέγονται μόνο συγκεκριμένες επικερδείς επενδύσεις.

4.6.1 Περίοδος επανάκτησης κεφαλαίου

Η περίοδος επανάκτησης κεφαλαίου για μια επένδυση είναι το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται για να επιστραφεί το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης. Ουσιαστικά, είναι η περίοδος από την αρχική εκροή κεφαλαίου μέχρι την στιγμή που οι μελλοντικές εισροές αθροιζόμενες ισούνται με την αρχική εκροή. Χρησιμοποιείται ως εύχρηστη μέθοδος για την απόρριψη επενδυτικών σχεδίων που αναμένεται να είναι ζημιογόνα για τους υποψήφιους επενδυτές.

Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου περιόδου επανάκτησης κεφαλαίου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
• Απλή στον υπολογισμό • Παρέχει ορισμένες πληροφορίες για το ρίσκο μιας επένδυσης • Παρέχει μια απλή μέτρηση της ρευστότητας μιας επένδυσης	• Δεν είναι σε θέση να εκτιμήσει αν μια επένδυση αυξάνει την αξία μιας εταιρείας • Αγνοεί τυχόν ταμειακές ροές μετά την περίοδο επανάκτησης κεφαλαίου • Αγνοεί την χρονική αξία του χρήματος • Αγνοεί την αβεβαιότητα σχετικά με τις μελλοντικές ταμειακές ροές

4.6.2 Μέθοδος προεξοφλημένης περιόδου επανάκτησης κεφαλαίου

Πρόκειται για το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται για την επανάκτηση του ποσού μιας αρχικής επένδυσης συνυπολογίζοντας τις προεξοφλημένες μελλοντικές ταμειακές ροές. Ειδικότερα, κάθε μελλοντική ταμειακή ροή ανάγεται στο παρόν μειούμενη κατά ένα ποσοστό, το κόστος κεφαλαίου, το οποίο αντανακλά τόσο τη χρονική αξία του χρήματος όσο και την αβεβαιότητα σχετικά με τις μελλοντικές ταμειακές ροές.

Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου προεξοφλημένης επανάκτησης κεφαλαίου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
• Λαμβάνει υπόψιν τη χρονική αξία του χρήματος	• Δεν είναι σε θέση να εκτιμήσει αν μια επένδυση αυξάνει την αξία της εταιρείας

• Λαμβάνει υπόψιν την αβεβαιότητα των ταμειακών ροών που περιλαμβάνονται στην αποπληρωμή	• Απαιτεί την γνώση του κόστους κεφαλαίου • Αγνοεί ταμειακές ροές μετά την περίοδο αποπληρωμής

4.6.3 Καθαρά Παρούσα Αξία

Η Καθαρά Παρούσα Αξία είναι η παρούσα αξία όλων των προσδοκώμενων ταμειακών ροών. Συγκεκριμένα, η καθαρή παρούσα αξία είναι η διαφορά μεταξύ της παρούσας αξίας των θετικών ταμειακών ροών ή ταμειακών εισροών και των αρνητικών ταμειακών ροών ή ταμειακών εκροών. Η ΚΠΑ υπολογίζεται από την σχέση:

$$NPV = \sum_{t=0}^{N} \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (3.13)$$

Όπου t η οποιαδήποτε χρονική περίοδος, CF_t η ταμειακή ροή στο τέλος της περιόδου t, i το κόστος κεφαλαίου, N ο αριθμός των περιόδων που αποτελούν την οικονομική ζωή της επένδυσης.

Η απόφαση σχετικά με την αποδοχή ή την απόρριψη μιας επένδυσης σχετίζεται με την τιμή της ΚΠΑ (NPV):

- NPV>0 ισοδυναμεί με αναμενόμενη αύξηση κερδών και προτείνεται αποδοχή της επένδυσης
- NPV<0 ισοδυναμεί με αναμενόμενη εμφάνιση ζημιών και προτείνεται απόρριψη της επένδυσης
- NPV=0 ισοδυναμεί με καμία μεταβολή στην αξία της εταιρείας και δεν παρατηρείται διαφορά σε πιθανή επιλογή ή απόρριψη της επένδυσης.

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου της Καθαράς Παρούσας Αξίας

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
• Ύπαρξη κριτηρίων που εξετάζουν αν μια επένδυση αυξάνει την αξία μιας εταιρείας • Λαμβάνει υπόψιν όλες τις ταμειακές ροές • Λαμβάνει υπόψιν την χρονική αξία του χρήματος	• Απαιτείται η γνώση του κόστους κεφαλαίου για τον υπολογισμό της • Εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες (π.χ. €) και όχι σε ποσοστό

• Λαμβάνει υπόψιν την αβεβαιότητα των μελλοντικών ταμειακών ροών	

Στο σημείο αυτό θα γίνει υπολογισμός της ΚΠΑ για το υπό μελέτη πρόβλημα, με βάση όσα υπολογίστηκαν και θεωρήθηκαν στο κεφάλαιο 4.2 και 4.3.

- Το αρχικό κόστος επένδυσης για την απόκτηση του eVTOL και τις απαραίτητες υποδομές ανέρχεται στα 5.000.000 ευρώ
- Τα ετήσια λειτουργικά έξοδα των eVTOL ανέρχονται σε 230.000 ευρώ.
- Η ετήσια εξοικονόμηση κόστους σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους μεταφοράς ανέρχεται στα 1.326.000 ευρώ.
- Η περίοδος ανάλυσης t ορίζεται στα 10 χρόνια

Οι Ταμιακές Ροές (Cash Flows) σε ένα συγκεκριμένο έτος υπολογίζονται ως εξής:

$$CF_t = Έσοδα - Έξοδα$$

όπου:
Έσοδα: Θεωρείται η εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους από την χρήση των eVTOLs έναντι των συμβατικών μέσων.
Έξοδα: Κόστος λειτουργίας του eVTOLs, δηλαδή το κόστος συντήρησης, καυσίμων, μισθών κ.λπ.
Επειδή η αξία του χρήματος μειώνεται με τον χρόνο, για κάθε μελλοντικό έτος προεξοφλούμε την ταμιακή ροή χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$PV(C_t) = \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

όπου:

$PV(C_t)$: η παρούσα αξία της ταμιακής ροής στο έτος
r: το προεξοφλητικό επιτόκιο (π.χ. 8%)
t: το συγκεκριμένο έτος.
Για παράδειγμα, για το EVTOL στο έτος 10 με προεξοφλητικό επιτόκιο 8%:

$$PV(C_{10}) = \frac{1326000}{(1+0.08)^{10}} = 614194 \text{ ευρώ}$$

4.6.4 Δείκτης κερδοφορίας

Ο δείκτης κερδοφορίας ορίζεται ως ο λόγος της παρούσας αξίας της μεταβολής των επιχειρησιακών ταμειακών εισροών προς τη παρούσα αξία των επενδυτικών ταμειακών εκροών [20]:

$$\text{PI} = \frac{\text{Παρούσα αξία της μεταβολής των επιχειρησιακών ταμειακών εισροών}}{\text{Παρούσα αξία των επενδυτικών ταμειακών εκροών}} \quad (3.14)$$

Ο δείκτης κερδοφορίας αποτελεί ουσιαστικά μια παραλλαγή του κριτηρίου της ΚΠΑ και δείχνει το κέρδος λαμβάνει μια εταιρεία για κάθε ένα € που επενδύει [20]. Όσον αφορά την επιλογή ή απόρριψη μιας επένδυσης ισχύουν οι ακόλουθες περιπτώσεις [20]:

- PI>0, η επένδυση αποδίδει περισσότερα χρήματα από 1 € για κάθε 1 € που επενδύθηκε και συνεπώς προτείνεται η πραγματοποίηση της.
- PI<0, η επένδυση αποδίδει λιγότερα χρήματα από 1 € για κάθε 1 € που επενδύθηκε και συνεπώς δεν προτείνεται η πραγματοποίηση της.
- PI=0, η επένδυση αναμένεται να αποδώσει ακριβώς 1 € για κάθε 1 € που επενδύθηκε και συνεπώς δεν υπάρχει διαφορά σε πιθανή επιλογή ή απόρριψη της επένδυσης.

Πίνακας 6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου του δείκτη κερδοφορίας

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
• Ύπαρξη κριτηρίων που εξετάζουν αν μια επένδυση αυξάνει την αξία μιας εταιρείας • Λαμβάνει υπόψιν όλες τις ταμειακές ροές • Λαμβάνει υπόψιν την χρονική αξία του χρήματος • Λαμβάνει υπόψιν την αβεβαιότητα των μελλοντικών ταμειακών ροών • Χρήσιμος για την κατάταξη και επιλογή επενδύσεων όταν υπάρχει περιορισμός διαθέσιμου κεφαλαίου	• Απαιτείται η γνώση του κόστους κεφαλαίου για τον υπολογισμό της • Μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες αποφάσεις όταν συγκρίνονται αμοιβαίως αποκλειόμενα επενδυτικά σχέδια

4.6.5 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο το οποίο μηδενίζει τη παρούσα αξία όλων των προσδοκώμενων μελλοντικών ταμειακών ροών. Συνεπώς, πρόκειται για το προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο ισχύει NPV=0 [20]. Ο εσωτερικός ρυθμός απόδοσης υπολογίζεται από την σχέση [20]:

$$0 = \sum_{t=1}^{N} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} \quad (3.15)$$

Η επιλογή ή απόρριψη μιας επένδυσης με βάση τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ της τιμής αυτού και του κόστους κεφαλαίου. Ειδικότερα [20]:

- IRR > Κόστος κεφαλαίου: Η επένδυση αποδίδει περισσότερα χρήματα από όσα απαιτούνται από τους μετόχους και συνεπώς προτείνεται η αποδοχή της.
- IRR < Κόστος κεφαλαίου: Η επένδυση αποδίδει λιγότερα χρήματα από όσα απαιτούνται από τους μετόχους και συνεπώς προτείνεται η απόρριψη της.
- IRR = Κόστος κεφαλαίου: Η επένδυση αποδίδει ακριβώς τόσα χρήμα όσα απαιτούνται από τους μετόχους και συνεπώς δεν προκύπτει διαφορά με την αποδοχή ή την απόρριψη της.

Πίνακας 7: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου του εσωτερικού βαθμού απόδοσης

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
• Ύπαρξη κριτηρίων που εξετάζουν αν μια επένδυση αυξάνει την αξία μιας εταιρείας • Λαμβάνει υπόψιν όλες τις ταμειακές ροές • Λαμβάνει υπόψιν τη χρονική αξία του χρήματος • Λαμβάνει υπόψιν την αβεβαιότητα των μελλοντικών ταμειακών ροών	• Απαιτείται η γνώση του κόστους κεφαλαίου για τη τελική απόφαση • Δεν οδηγεί απαραίτητα στην απόφαση που μεγιστοποιεί την αξία της εταιρείας όταν συγκρίνονται αμοιβαίως αποκλειόμενες επενδύσεις • Δεν οδηγεί απαραίτητα στην απόφαση που μεγιστοποιεί την αξία της εταιρείας όταν υπάρχει περιορισμός διαθέσιμου κεφαλαίου

4.6.6 Τροποποιημένος εσωτερικός βαθμός απόδοσης

Ο τροποποιημένος εσωτερικός βαθμός απόδοσης αποτελεί μια παραλλαγή του εσωτερικού βαθμού απόδοσης, η οποία ωστόσο χρησιμοποιεί μια πιο ρεαλιστική υπόθεση σχετικά με την επανεπένδυση των ταμειακών ροών [20]. Με άλλα λόγια, είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο το οποίο εξισώνει την παρούσα αξία των εκροών με την παρούσια αξία των τελικών εισροών υποθέτοντας ότι τα χρήματα επανεπενδύονται με το ίδιο κόστος κεφαλαίου [20].

Αναφορικά με την απόφαση για την υλοποίηση ενός επενδυτικού σχεδίου διακρίνονται 3 περιπτώσεις [20]:

- MIRR > Κόστος κεφαλαίου: Προτείνεται αποδοχή της επένδυσης.
- MIRR < Κόστος κεφαλαίου: Προτείνεται η απόρριψη της επένδυσης.
- MIRR = Κόστος κεφαλαίου: Δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ αποδοχής ή απόρριψης της επένδυσης.

Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου του δείκτη κερδοφορίας

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
• Ύπαρξη κριτηρίων που εξετάζουν αν μια επένδυση αυξάνει την αξία μιας εταιρείας • Λαμβάνει υπόψιν όλες τις ταμειακές ροές • Λαμβάνει υπόψιν την χρονική αξία του χρήματος • Λαμβάνει υπόψιν την αβεβαιότητα των μελλοντικών ταμειακών ροών	• Δεν οδηγεί απαραίτητα στην απόφαση που μεγιστοποιεί την αξία της εταιρείας όταν συγκρίνονται αμοιβαίως αποκλειόμενες επενδύσεις με διαφορετικό επίπεδο επιχειρηματικού κινδύνου • Δεν οδηγεί απαραίτητα στην απόφαση που μεγιστοποιεί την αξία της εταιρείας όταν υπάρχει περιορισμός διαθέσιμου κεφαλαίου

4.7 Συμπεράσματα Οικονομικής Ανάλυσης

Η οικονομική ανάλυση για τη χρήση των eVTOLs οδηγεί σε ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Καταρχάς, η επένδυση μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη, υπό την προϋπόθεση ότι η χρήση τους είναι συχνή και αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν σε επίπεδο ταχύτητας, περιβαλλοντικής φιλικότητας και χαμηλότερου κόστους ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι το αρχικό κόστος απόκτησης και ανάπτυξης υποδομών είναι υψηλό, οι μακροπρόθεσμες εξοικονομήσεις καθιστούν την επένδυση ελκυστική. Επιπλέον, η επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων, καθώς και τα ενδεχόμενα κρατικά κίνητρα, μπορούν να περιορίσουν το οικονομικό ρίσκο και να ενισχύσουν τη χρηματοοικονομική σκοπιμότητα.
Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται η εφαρμογή πιλοτικών προγραμμάτων με περιορισμένο στόλο eVTOLs, ώστε να αξιολογηθούν σε πραγματικές συνθήκες τα κόστη και τα οφέλη τους. Παράλληλα, η συνεργασία με τεχνολογικούς φορείς θεωρείται καθοριστική, καθώς μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους ανάπτυξης και συντήρησης των απαραίτητων υποδομών.

5 Μελέτη περιπτώσεων

5.1 Οικονομική αξιολόγηση μέσων μεταφοράς για τη διαδρομή Αθήνα - Θεσσαλονίκη

Η διαδρομή Αθήνα – Θεσσαλονίκη, με απόσταση 500 km, είναι μία από τις πιο πολυσύχναστες διαδρομές στην Ελλάδα, η οποία εξυπηρετεί επιβάτες για επαγγελματικούς, τουριστικούς και προσωπικούς σκοπούς. Για αυτή τη διαδρομή εξετάζονται τα μεταφορικά μέσα eVTOL, αεροπλάνο, τρένο και λεωφορείο. Η ανάλυση αφορά στο χρόνο του ταξιδιού, το κόστος ανά επιβάτη, τις εκπομπές CO_2 και την οικονομική βιωσιμότητα. Λαμβάνονται υπόψη ρεαλιστικοί αριθμοί επιβατών που εξασφαλίζουν θετικές ταμειακές ροές. Τα δεδομένα των μεταφορικών μέσων παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

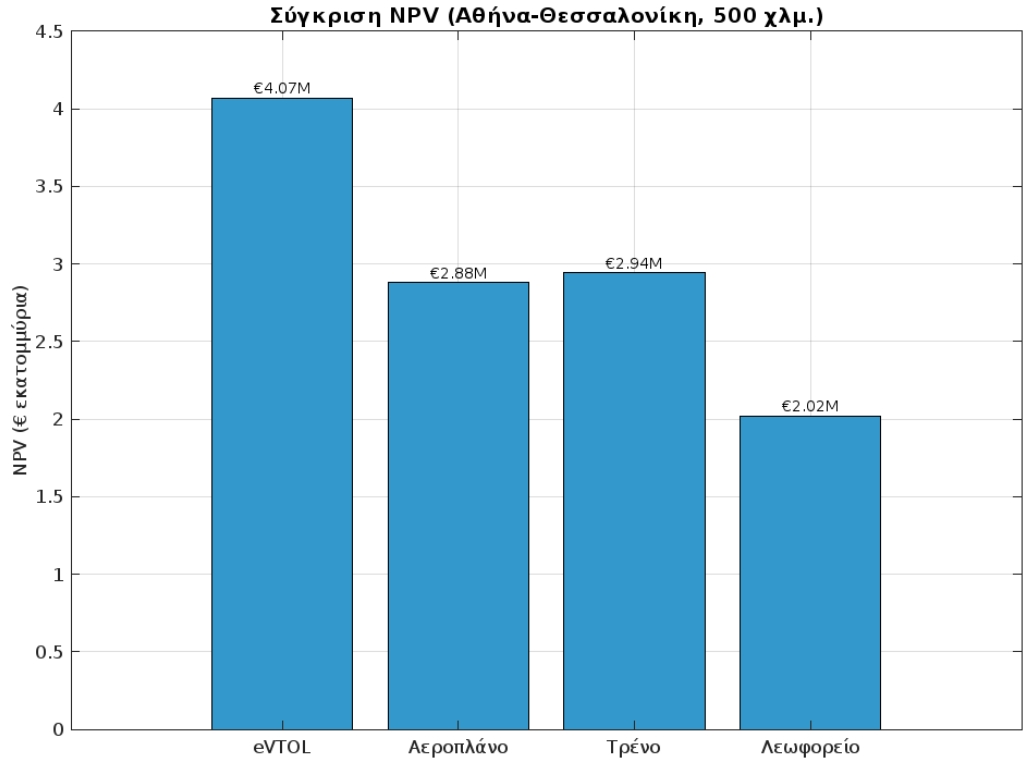
Πίνακας 9 Δεδομένα μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα – Θεσσαλονίκη [5][14][15][16][17][18][19][20]

Μέσο μεταφοράς	Χρόνος ταξιδιού (h)	Κόστος ανά επιβάτη (€)	Εκπομπές CO2 (kg)	Αριθμός επιβατών ανά έτος	Αρχικό κόστος (€)	Λειτουργικά έξοδα (€)
eVTOL	2.17 (500/300 (km/h) h πτήσης + 0.5 h προς vertiport)	250	0	7800 (15 πτήσεις/εβδομάδα*10 επιβάτες*52 εβδομάδες)	7000000	300000
Αεροπλάνο	2.5 (1 h πτήση + 1.5 h check-in/πρόσβαση στο αεροδρόμιο	60	166.5 (500*0.333)	140000 (4 πτήσεις/ημέρα*100 επιβάτες*350 ημέρες	30000000	3500000
Τρένο	4.5	50	30 (500*0.06)	140000 (2 δρομολόγια / ημέρα *200 επιβάτες *350 ημέρες)	40000000	600000
Λεωφορείο	6	40	80 (500*0.16)	17500 (2 δρομολόγια/ημέρα*50επιβάτες*350)	1000000	150000

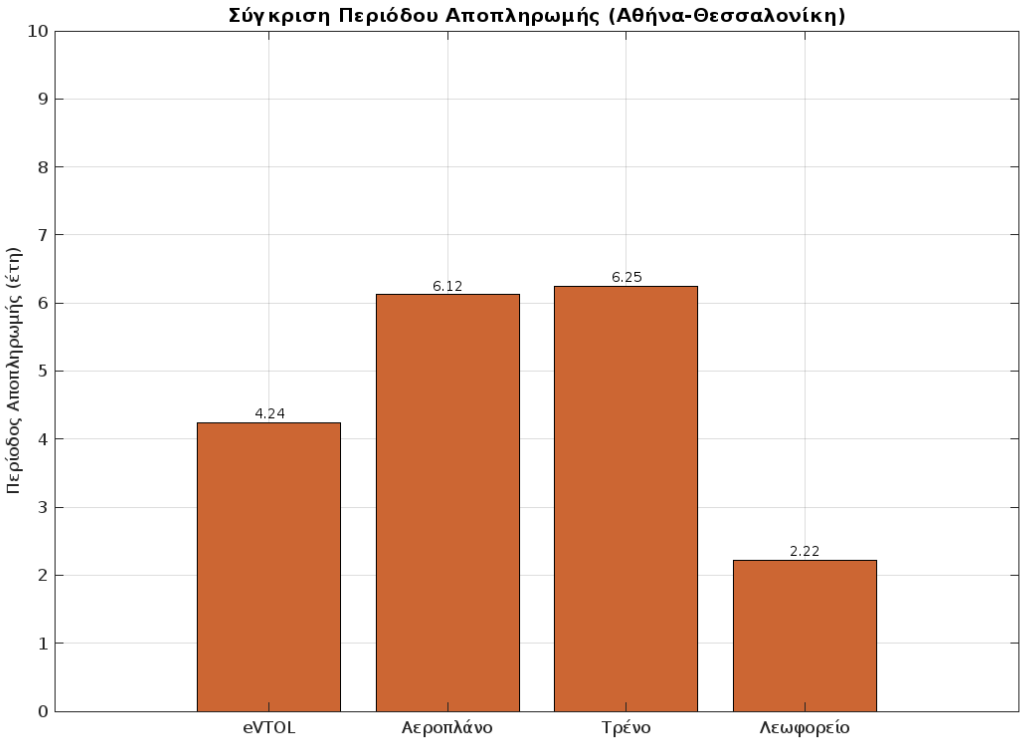
Ο υπολογισμός και η οπτικοποίηση των οικονομικών δεικτών υλοποιείται με κώδικα στο Matlab, ο οποίος παρατίθεται στο Παράρτημα Α. Η περίοδος ανάλυσης ορίζεται στα 10 έτη και το προεξοφλητικό επιτόκιο ορίζεται στο 8%. Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας των ταμειακών ροών.

Οι ταμειακές ροές για κάθε μέσο υπολογίζονται ως εξής : (Αριθμός Επιβατών x Έσοδα ανά Επιβάτη) – Λειτουργικά Έξοδα. Επίσης, υπολογίζονται η Καθαρά Παρούσα Αξία, η περίοδος αποπληρωμής και το IRR. Δημιουργούνται 4 διαγράμματα για τα αποτελέσματα:

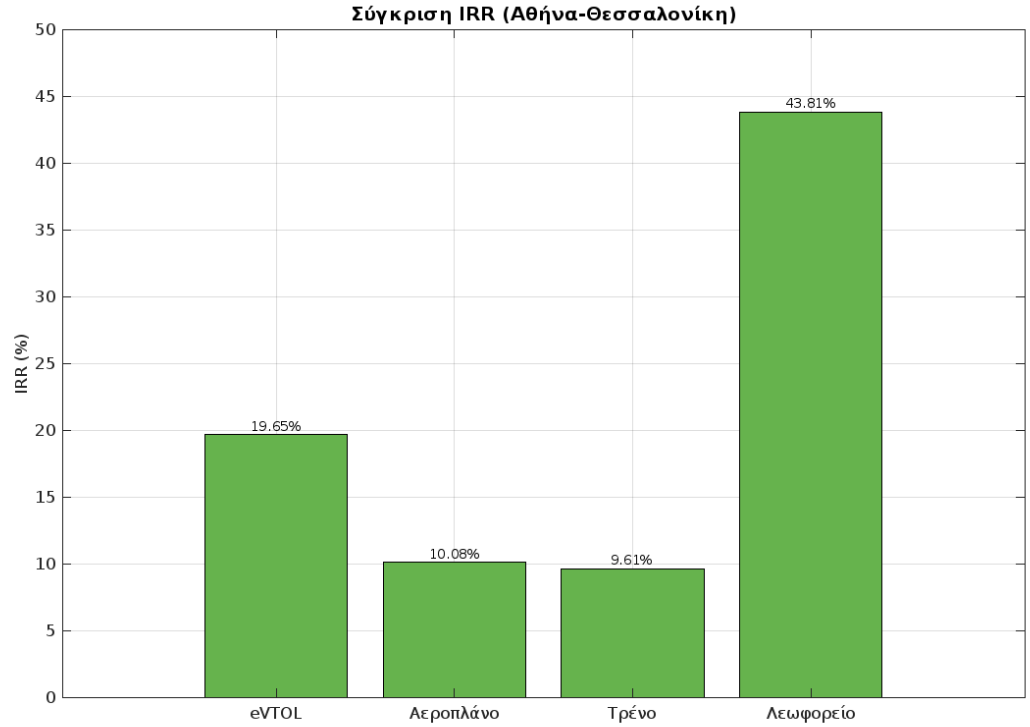
- **Διάγραμμα NPV:** Συγκρίνει την Καθαρά Παρούσα Αξία για κάθε μέσο.
- **Διάγραμμα περιόδου αποπληρωμής:** Εμφανίζει την περίοδο αποπληρωμής κάθε μεταφορικού μέσου.
- **Διάγραμμα IRR:** Συγκρίνει τους δείκτες IRR για κάθε επένδυση.
- **Διάγραμμα σωρευτικών ταμειακών ροών:** Απεικονίζει την εξέλιξη των σωρευτικών ταμειακών ροών με την πάροδο του χρόνου.



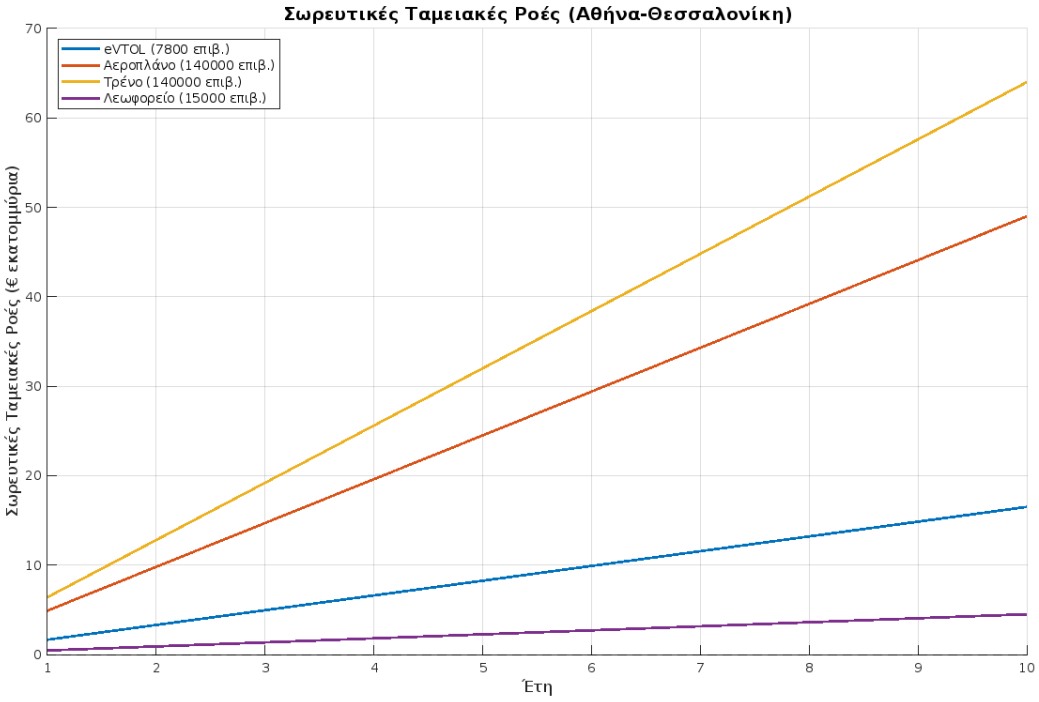
Εικόνα 10 Σύγκριση Καθαράς Παρούσας Αξίας μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα - Θεσσαλονίκη



Εικόνα 11 Σύγκριση Περιόδου Αποπληρωμής μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα - Θεσσαλονίκη



Εικόνα 12 Σύγκριση δείκτη IRR μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα - Θεσσαλονίκη



Εικόνα 13 Σύγκριση Σωρευτικών Ταμειακών Ροών μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα - Θεσσαλονίκη

Η ΚΠΑ μετρά της κερδοφορία της κάθε επένδυσης, υπολογίζοντας την παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών ροών και αφαιρώντας το αρχικό κόστος. Την υψηλότερη ΚΠΑ παρουσιάζει το eVTOL (4071500 €), η οποία οφείλεται στις υψηλές ταμειακές ροές από την τιμή του εισιτηρίου και στα χαμηλά λειτουργικά έξοδα. Από την άλλη πλευρά, το τρένο και το αεροπλάνο, έχουν χαμηλότερη ΚΠΑ λόγω του υψηλού αρχικού κόστους. Η μικρότερη ΚΠΑ υπολογίζεται για το λεωφορείο. Ωστόσο, η επένδυση στο λεωφορείο παραμένει συμφέρουσα λόγω του πολύ χαμηλού αρχικού κόστους.

Η περίοδος αποπληρωμής αντιστοιχεί στο χρόνο που απαιτείται για να καλυφθεί το αρχικό κόστος από τις σωρευτικές ταμειακές ροές. Η περίοδος αποπληρωμής για το eVTOL είναι 4.24 έτη, για το αεροπλάνο 6.12 έτη, για το τρένο 6.25, ενώ για το λεωφορείο είναι μόλις 2.22 έτη. Χάρη στις υψηλές ταμειακές ροές (1650000 €/έτος), η αποπληρωμή του eVTOL είναι σχετικά γρήγορη.

Αν και το λεωφορείο έχει τον υψηλότερο δείκτη IRR (45%), το eVTOL ακολουθεί με IRR = 20% . Πρακτικά, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης με τιμή 20%, σημαίνει ότι η επένδυση αποφέρει ετήσια απόδοση 20% επί του επενδυμένου κεφαλαίου, γεγονός που καθιστά το eVTOL ελκυστική επένδυση.

Βάσει της ΚΠΑ και του δείκτη IRR, το eVTOL είναι η πιο κερδοφόρα επιλογή για τη διαδρομή Αθήνα – Θεσσαλονίκη. Αποτελεί την πλέον περιβαλλοντικά φιλική λύση και ο γρήγορος χρόνος ταξιδιού, μόλις 2.17 ώρες, το καθιστούν ιδανικό για επαγγελματίες και επιβάτες υψηλού εισοδήματος. Ωστόσο, η μικρή χωρητικότητά του περιορίζει τη μαζική του χρήση. Το λεωφορείο είναι η καλύτερη επιλογή για επενδυτές που αναζητούν γρήγορη απόδοση και χαμηλό ρίσκο. Ωστόσο, παρουσιάζει τα μειονεκτήματα του μεγάλου χρόνου ταξιδιού (6 ώρες) και των υψηλών εκπομπών CO_2 (80 kg).

Με βάση το δείκτη απόδοσης της επένδυσης ROI, το λεωφορείο είναι πιο αποδοτική επένδυση, ενώ το eVTOL προσφέρει καλή απόδοση με χαμηλότερο ρίσκο λόγω υψηλής ΚΠΑ. ROI ίσο με 350% σημαίνει ότι κάθε ευρώ που επενδύθηκε, η επένδυση απέδωσε κέρδος 3.5 ευρώ, πέρα από την ανάκτηση του αρχικού κεφαλαίου, στο τέλος της περιόδου ανάλυσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με την τρέχουσα τεχνολογία κανένα eVTOL δεν μπορεί να καλύψει 500 km με μία μόνο φόρτιση. Συνεπώς, θα χρειαζόταν τουλάχιστον μία ενδιάμεση στάση για επαναφόρτιση της μπαταρίας, γεγονός που επηρεάζει το χρόνο ταξιδιού, τις λειτουργικές δαπάνες και τελικά την οικονομική αξιολόγηση του eVTOL.

Πίνακας 10 Απόδοση επένδυσης μεταφορικών μέσω για τη διαδρομή Αθήνα-Θεσσαλονίκη

Μεταφορικό Μέσο	ROI
eVTOL	135.71%
Αεροπλάνο	63.33%
Τρένο	60%
Λεωφορείο	350%

5.2 Οικονομική αξιολόγηση μέσων μεταφοράς για τη διαδρομή Αθήνα - Μύκονος

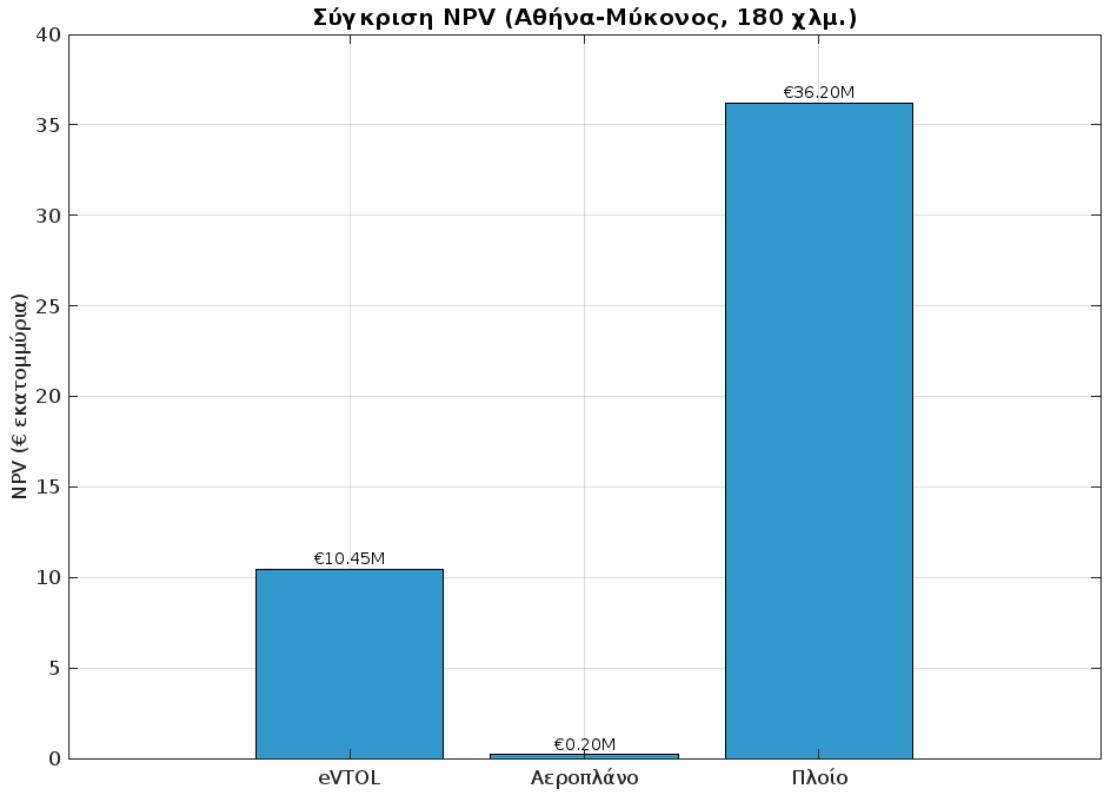
Η διαδρομή Μύκονος, με απόσταση 180 km, είναι ιδιαίτερα δημοφιλής για τουριστικούς σκοπούς, κυρίως κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Για αυτή τη διαδρομή εξετάζονται τα μεταφορικά μέσα eVTOL, το αεροπλάνο και το πλοίο, διότι το τρένο και το λεωφορείο δεν είναι εφαρμόσιμα λόγω της νησιωτικής φύσης της διαδρομής. Η ανάλυση αφορά στο χρόνο του ταξιδιού, το κόστος ανά επιβάτη, τις εκπομπές CO_2 και την οικονομική βιωσιμότητα. Λαμβάνονται υπόψη ρεαλιστικοί αριθμοί επιβατών που εξασφαλίζουν θετικές ταμειακές ροές. Τα δεδομένα των μεταφορικών μέσων παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 12 Δεδομένα μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα – Μύκονος [5][14][15][17][20][21]

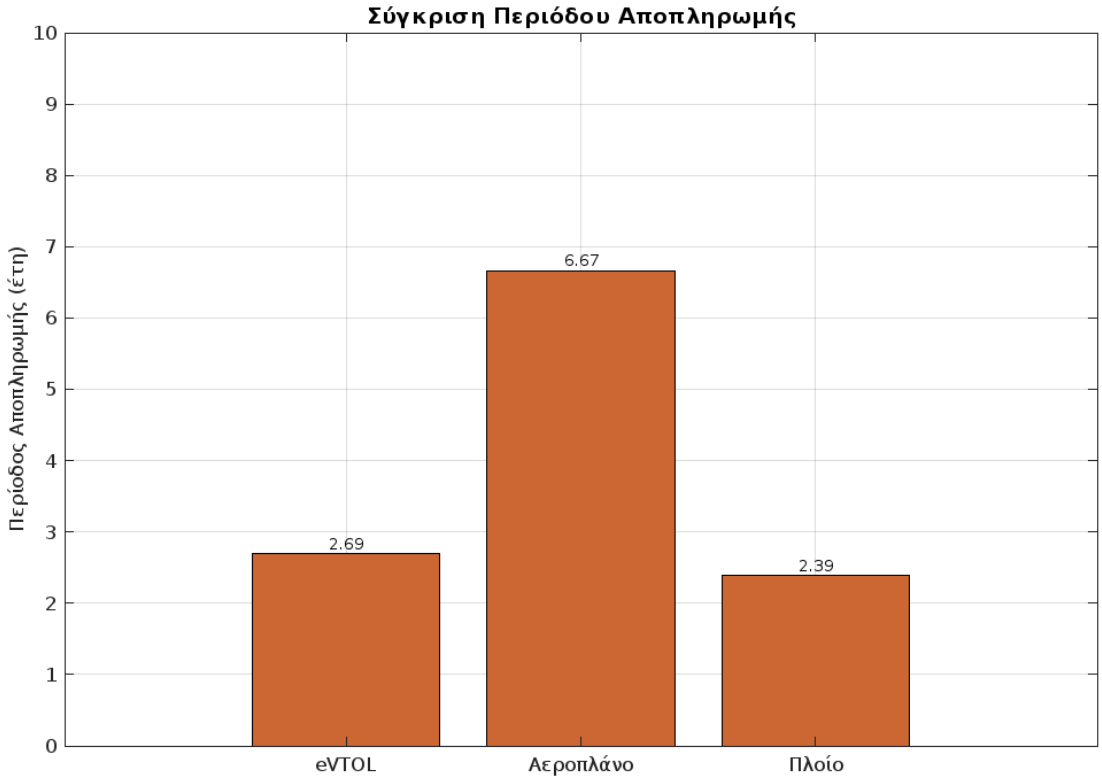
Μέσο μεταφοράς	Χρόνος ταξιδιού (h)	Κόστος ανά επιβάτη (€)	Εκπομπές CO2 (kg)	Αριθμός επιβατών ανά έτος	Αρχικό κόστος (€)	Λειτουργικά έξοδα (€)
eVTOL	0.6 (180/300 (km/h) h πτήσης + 0.2 h προς vertiport)	250	0	15000 (10 πτήσεις/εβδομάδα*10 επιβάτες*150 εβδομάδες)	7000000	400000
Αεροπλάνο	2 (0.5 h πτήση + 1.5 h check-in/πρόσβαση στο αεροδρόμιο	50	59.94 (180*0.333)	120000 (8 πτήσεις/ημέρα*100 επιβάτες*150 ημέρες	30000000	3500000
Πλοίο	4	45.5	36 (180*0.06)	250000 (1 δρομολόγια / ημέρα *1000 επιβάτες *250 ημέρες)	20000000	3000000

Οι ταμειακές ροές για κάθε μέσο υπολογίζονται ως εξής : (Αριθμός Επιβατών x Έσοδα ανά Επιβάτη) – Λειτουργικά Έξοδα. Επίσης, υπολογίζονται η Καθαρά Παρούσα Αξία, η περίοδος αποπληρωμής και το IRR. Δημιουργούνται 4 διαγράμματα για τα αποτελέσματα:

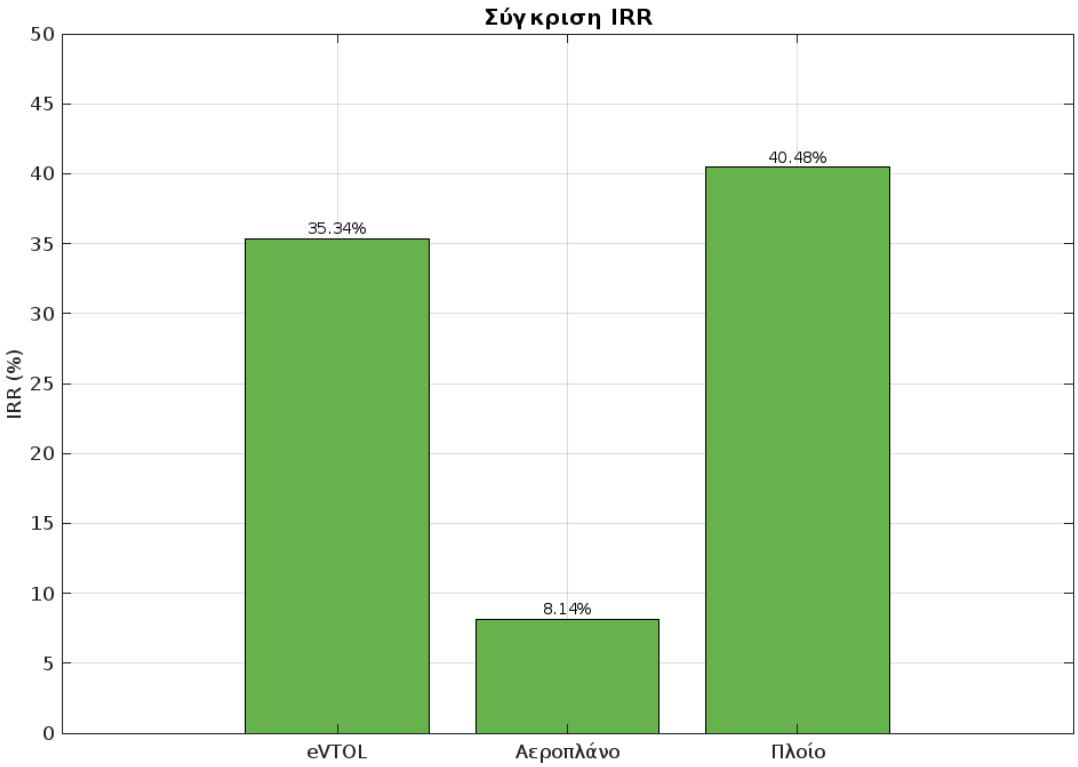
- **Διάγραμμα NPV:** Συγκρίνει την Καθαρά Παρούσα Αξία για κάθε μέσο.
- **Διάγραμμα περιόδου αποπληρωμής:** Εμφανίζει την περίοδο αποπληρωμής κάθε μεταφορικού μέσου.
- **Διάγραμμα IRR:** Συγκρίνει τους δείκτες IRR για κάθε επένδυση.
- **Διάγραμμα σωρευτικών ταμειακών ροών:** Απεικονίζει την εξέλιξη των σωρευτικών ταμειακών ροών με την πάροδο του χρόνου.



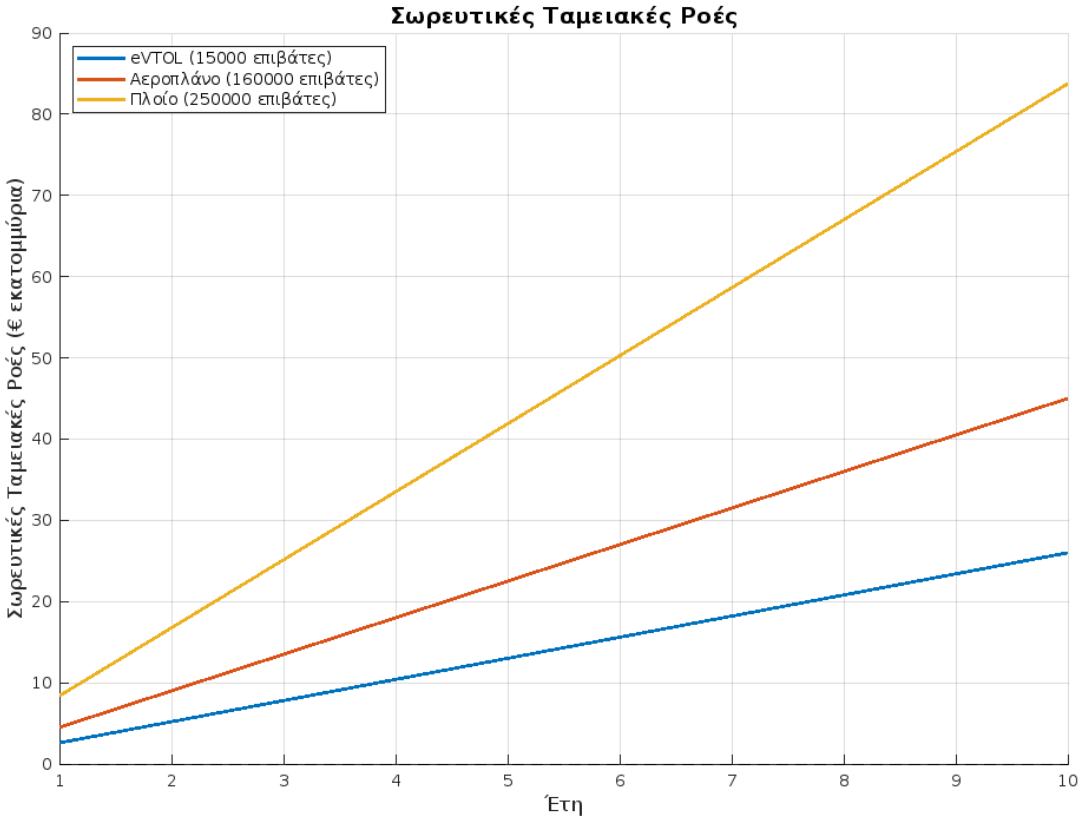
Εικόνα 14 Σύγκριση Καθαράς Παρούσας Αξίας μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα – Μύκονος



Εικόνα 15 Σύγκριση Περιόδου Αποπληρωμής μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα - Μύκονος



Εικόνα 16 Σύγκριση δείκτη IRR μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα – Μύκονος



Εικόνα 17 Σύγκριση Σωρευτικών Ταμειακών Ροών μεταφορικών μέσων για τη διαδρομή Αθήνα - Μύκονο

Το πλοίο αποτελεί την πλέον συμφέρουσα επένδυση για τη διαδρομή Αθήνα – Μύκονος, με ΚΠΑ 36200000 €, περίοδο αποπληρωμής 2.39 έτη και δείκτη IRR 40.48% , παρά το υψηλό αρχικό κόστος και τα λειτουργικά έξοδα. Επίσης, το eVTOL είναι ιδιαίτερα κερδοφόρο, με ΚΠΑ 10450000 €, περίοδο αποπληρωμής 2.69 έτη και δείκτη IRR 35.34% , και αποτελεί ελκυστική επιλογή για premium, γρήγορη και περιβαλλοντικά φιλική μεταφορά. Το αεροπλάνο επιτυγχάνει οριακά θετική ΚΠΑ με περίοδο αποπληρωμής 6.67 και δείκτη IRR 8.14%. Ωστόσο, οι υψηλές εκπομπές CO_2 και το υψηλό αρχικό κόστος το καθιστούν λιγότερο ελκυστική επένδυση.

Το πλοίο παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς 1000 επιβατών ανά δρομολόγιο, γεγονός που το καθιστά ιδανικά για μαζικό τουρισμό. Επιπλέον, το κόστος ανά επιβάτη είναι το χαμηλότερο σε σύγκριση με τα άλλα μέσα μεταφοράς. Έτσι, προσελκύει ταξιδιώτες που αναζητούν οικονομικές επιλογές. Ωστόσο, ο μεγάλος χρόνος ταξιδιού και οι εκπομπές CO_2 αποτελούν περιορισμούς, ιδιαίτερα για επιβάτες που προτιμούν τη γρήγορη μεταφορά και για περιβαλλοντικά ευαισθητοποιημένους ταξιδιώτες. Αυτά τα κενά καλύπτονται από την επιλογή μετακίνησης με eVTOL με αντίτιμο το υψηλότερο κόστος ανά επιβάτη.

Με βάση το δείκτη απόδοσης της επένδυσης ROI, το eVTOL είναι η πιο αποδοτική επένδυση, χάρη στο χαμηλό αρχικό κόστος και στα υψηλά έσοδα ανά επιβάτη. Εξίσου αποδοτική επένδυση είναι πλοίο. Από την άλλη πλευρά, το αεροπλάνο έχει αρνητική απόδοση, γεγονός που υποδηλώνει ότι θα πρέπει να αυξηθούν οι επιβάτες ή τα έσοδα ανά επιβάτη, και ταυτόχρονα να μειωθούν οι λειτουργικές δαπάνες.

Πίνακας 13 Απόδοση επένδυσης μεταφορικών μέσω για τη διαδρομή Αθήνα-Μύκονος

Μεταφορικό Μέσο	ROI
eVTOL	378.57%
Αεροπλάνο	-16.67%
Πλοίο	318.75%

5.3 Τεχνική αξιολόγηση eVTOL Joby Aviation S4-2.0

Σε αυτή την ενότητα αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την τεχνική αξιολόγηση του eVTOL Joby Aviation S4-2.0. Υπολογίζονται η αυτονομία, ο χρόνος πτήσης, οι ενεργειακές απαιτήσεις, οι εκπομπές CO_2, η θερμική διαχείριση της μπαταρίας και οι υποδομές φόρτισης. Τα δεδομένα, οι παράμετροι και οι μεταβλητές του μοντέλου βασίζονται στις πηγές [22][23][24][25][26].

Οι παράμετροι είναι οι εξής:

- **$m_{φορτίο}$:** Η μάζα του φορτίου η οποία ισούται με 360 kg και αντιστοιχεί σε 4 επιβάτες και στις αποσκευές.
- **$m_{κενή}$:** Η μάζα του eVTOL χωρίς φορτίο ισούται με 1900 kg.
- **EWR (Empty Weight Ratio):** Ο λόγος κενής μάζας ισούται με $m_{κενή} / (m_{κενή} + m_{φορτίο}) = 0.84$. Ο χαμηλός EWR αντιπροσωπεύει ένα ελαφρύ όχημα, το οποίο έχει μεγαλύτερη αυτονομία και καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Αντίθετα, με υψηλό EWR μειώνεται η ικανότητας μεταφοράς φορτίου.
- **g:** Επιτάχυνση βαρύτητας = 9.81 m/s^2.
- **$P_{δίσκος}$ (Disk Loading):** Η φόρτιση δίσκου είναι η ισχύς που παρέχεται από τους έλικες του eVTOL ανά μονάδα επιφάνειας του δίσκου που σχηματίζεται από την περιστροφή τους. Υψηλή φόρτιση δίσκου σημαίνει ότι απαιτείται περισσότερη ισχύς για την ανύψωση, κάτι που αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και μειώνει

την απόδοση. Αντίθετα, η χαμηλή φόρτιση δίσκου βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση, αλλά αυξάνει το μέγεθος του οχήματος.

- **L/D (Lift-to-Drag Ratio):** Ο λόγος ανύψωσης-αντίστασης ισούται με 12 και είναι η σχέση της ανυψωτικής δύναμης που παράγεται από τους έλικες προς την αντίσταση αέρα κατά την πτήση. Υψηλός L/D συνεπάγεται καλύτερη αεροδυναμική απόδοση, καθώς μειώνεται η ενέργεια που απαιτείται κατά την πτήση. Κατά την ανύψωση, ο L/D είναι συνήθως χαμηλότερος λόγω της μεγαλύτερης αντίστασης του αέρα από την κλίση, ενώ σε σταθερό ύψος είναι υψηλότερος.
- **W/S (Wing Loading):** Η φόρτιση πτέρυγας ισούται με 100 kg/m^2 και είναι η συνολική μάζα του οχήματος διαιρεμένη με την επιφάνεια των πτερύγων. Η χαμηλή φόρτιση πτέρυγας βελτιώνει την ανυψωτική ικανότητα και μειώνει την ενέργεια που απαιτείται σε σταθερό ύψος, αλλά απαιτεί μεγαλύτερες πτέρυγες. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή φόρτιση πτέρυγας επιτρέπει μικρότερες πτέρυγες, αλλά αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας.
- **$E_{ειδική}$:** Η ειδική ενέργεια της μπαταρίας ιόντων λιθίου τύπου LFP είναι 320 Wh/kg.
- **$C_{μπαταρία}$:** Η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 100 kWh.
- **$m_{μπαταρία}$:** Η μάζα της μπαταρίας είναι 312.5 kg.
- **u_{cruise}:** Η ταχύτητα του οχήματος σε σταθερό ύψος είναι 322 km/h.
- **$n_{έλικα}$:** Η απόδοση του έλικα είναι 0.85.
- **$n_{κινητήρα}$:** Η απόδοση του κινητήρα είναι 0.92.
- **$n_{φόρτισης}$:** Η απόδοση της φόρτισης της μπαταρίας είναι 0.9.
- **D**: Απόσταση πτήσης σε km.
- **$t_{πτήσης}$:** Ο χρόνος πτήσης σε ώρες.
- **$P_{απαιτούμενη}$:** Η απαιτούμενη ισχύς σε kW για μία πτήση.
- **$E_{απαιτούμενη}$**: Η απαιτούμενη ενέργεια σε kWh για μία πτήση.
- **$GHG_{παραγωγή}$:** Το ανθρακικό αποτύπωμα από την παραγωγή της μπαταρίας είναι 150 kg CO_2 / kWh.
- **$GHG_{λειτουργία}$:** Το ανθρακικό αποτύπωμα κατά τη χρήση του οχήματος είναι 0.35 kg CO_2 / kWh με βάση το Ελληνικό ενεργειακό μείγμα του 2025, με 40% διείσδυση ΑΠΕ.
- **$P_{θερμική}$:** Η θερμική ισχύς της μπαταρίας σε kW.
- **$R_{μπαταρία}$:** Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας ισούται με 0.02 Ω.
- **I:** Το ρεύμα της μπαταρίας σε A.
- **$P_{αιώρησης}$:** Η ισχύς αιώρησης (Hover) είναι ισχύς σε kW που απαιτείται για να διατηρηθεί το eVTOL σταθερό στον αέρα χωρίς κίνηση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω.
- **P_{cruise}:** Η ισχύς cruise είναι η ισχύς σε kW που απαιτείται για να διατηρηθεί το eVTOL σε σταθερό ύψος με σταθερή ταχύτητα. Η ανύψωση οφείλεται στις πτέρυγες, ενώ οι έλικες παρέχουν την ώθηση για την κίνηση προς τα εμπρός.

Η απαιτούμενη ενέργεια για μία πτήση, η ισχύς Cruise και η ισχύς αιώρησης δίνονται από τις σχέσεις (5.1), (5.2) και (5.3), αντίστοιχα:

$$E_{απαιτούμενη} = \frac{P_{απαιτούμενη} * t_{\,πτήση}}{n_{προπέλα} * n_{κινητήρα}} \quad (5.1)$$

$$P_{cruise} = \frac{\left(m_{φορτίο} + m_{κενή}\right) * g * u_{\,cruise}}{(L/D) * n_{προπέλα} * n_{κινητήρα}} \quad (5.2)$$

$$P_{αιώρησης} = \frac{\left(m_{φορτίο} + m_{κενή}\right) * g * \sqrt{\frac{\left(m_{φορτίο} + m_{κενή}\right) * g}{2ρA_{δίσκος}}}}{n_{προπέλα}} \quad (5.3)$$

Όπου ρ = 1.225 kg/m^3 είναι η πυκνότητα του αέρα και $A_{δίσκος}$ η επιφάνεια δίσκου.

Η αυτονομία του eVTOL προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$D = \frac{E_{ειδική} * m_{μπαταρία} * (L/D) * n_{προπέλα} * n_{κινητήρα}}{\left(m_{φορτίο} + m_{κενή}\right) * g} \quad (5.4)$$

Για το Joby Aviation S4-2.0 θα είναι:

$$P_{cruise} = \frac{(360 + 1900) * 9.81 * 322/36}{12 * 0.85 * 0.92} = 211.3\ kW \quad (5.5)$$

$$P_{αιώρησης} = \frac{(360 + 1900) * 9.81 * \sqrt{\frac{(360 + 1900) * 9.81}{2 * 1.225 * 5.55}}}{0.85} = 1054\ \ kW \quad (5.6)$$

$$D = \frac{3.6 * 10^8 * 12 * 0.85 * 0.92}{(360 + 1900) * 9.81} = 152.37\ km \quad (5.7)$$

$$t_{πτήσης} = \frac{152.37}{322} = 0.47\ h = 1692\ s \quad (5.8)$$

Η συνολική απαιτούμενη ενέργεια για την πτήση περιλαμβάνει αιώρηση κατά το 1%, ανύψωση κατά το 2% και cruising κατά το 97% του χρόνου πτήσης. Επίσης, η ανύψωση καταναλώνει 20 % περισσότερη ισχύ από το cruising. Έτσι θα είναι:

$$E_{αιώρησης} = \frac{1054 * 0.01 * 1692}{3600} = 4.95\ kWh \quad (5.9)$$

$$E_{ανύψωσης} = \frac{211.3 * 0.02 * 1692}{3600 * 0.8} = 2.48\ kWh \quad (5.10)$$

$$E_{cruise} = \frac{211.3 * 0.97 * 1692}{3600} = 96.33\ kWh \quad (5.11)$$

$$E_{συνολική} = 96.33 + 4.95 + 2.48 = 103.76\ kWh \quad (5.12)$$

Από τους υπολογισμούς συνάγεται το συμπέρασμα ότι η μπαταρία των 100 kWh δεν επαρκεί. Προκειμένου να επιτευχθεί η συγκεκριμένη αυτονομία, το συγκεκριμένο προφίλ πτήσης και να εξασφαλιστεί 20% αποθηκευμένης ενέργειας, θα χρειαστεί μία δεύτερη μπαταρία τύπου LFP χωρητικότητας 25 kWh.

Δεδομένου του συντελεστή απόδοσης φόρτισης, ο οποίος είναι 0.9, υπολογίζονται η απαιτούμενη ενέργεια φόρτισης για τις μπαταρίες του eVTOL και το ανθρακικό αποτύπωμα για την παραγωγή τους και τη λειτουργία τους:

$$E_{φόρτισης} = \frac{125}{0.9} = 138.9\ kWh \quad (5.13)$$

$$GHG_{παραγωγή} = 150 * 125 = 18750\ kg\ CO_2 \quad (5.14)$$

$$GHG_{λειτουργία} = 138.9 * 0.35 = 48.6\ kg\ CO_2 \quad (5.15)$$

Για I = 1000 A, η θερμική ισχύς που παράγεται από τις μπαταρίες είναι:

$$P_\theta = 1000^2 * 0.02 = 20\ kW \quad (5.16)$$

Με βάση την παραπάνω μελέτη, το Joby Aviation S4-2.0 επιτυγχάνει αυτονομία 152.37 km, η οποία μειώνεται σε 121.9 km με αποθεματικό 20%. Αυτές οι τιμές είναι χαμηλότερες από την επίσημη αυτονομία του (241 km), διότι έγιναν συντηρητικές παραδοχές όπως L/D = 12 και χωρητικότητα μπαταρίας 100 kWh. Η συνολική απαιτούμενη ενέργεια υπερβαίνει τη χωρητικότητα της μπαταρίας, καθιστώντας την πτήση ανέφικτη χωρίς πρόσθετη μπαταρία ή βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης.

Το ενεργειακό αποτύπωμα παραγωγής των μπαταριών είναι υψηλό, ενώ το ανθρακικό αποτύπωμα λειτουργίας είναι χαμηλό σε σύγκριση με τα συμβατικά αεροσκάφη. Το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα μπορεί να μειωθεί με ενεργειακό μείγμα το οποίο περιλαμβάνει υψηλότερο ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ.

Το Joby Aviation S4-2.0 είναι αποδοτικό για αστικές μετακινήσεις, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε cruise. Ωστόσο, η αιώρηση είναι ενεργειακά απαιτητική και περιορίζει την αυτονομία. Στο συγκεκριμένο eVTOL μπορούν να χρησιμοποιηθούν μπαταρίες έως 200 kWh έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αυτονομία. Επιπλέον, αν αυξηθεί η επιφάνεια δίσκου, μειώνεται η φόρτιση δίσκου και τελικά η απαιτούμενη ισχύς. Ο αποδοτικός αεροδυναμικός σχεδιασμός μπορεί να αυξήσει το λόγο L/D σε 18 και να μειώσει δραστικά την ισχύ cruise, με αποτέλεσμα την αύξηση της αυτονομίας. Σημαντική είναι η επίδραση της βελτιωμένης απόδοσης της προπέλας, η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά την ισχύ αιώρησης.

Οι θερμικές απώλειες των 20 kW που προκύπτουν από την αντίσταση των μπαταριών απαιτούν ένα ισχυρό σύστημα ψύξης για να διατηρηθεί η απόδοση και η ασφάλεια της μπαταρίας. Η επιλογή μπαταρίας με μικρότερη εσωτερική αντίσταση βελτιώνει την απόδοση του συστήματος και μειώνει τις απαιτήσεις ψύξης.

5.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής eVTOL Lilium Jet στις Κυκλάδες

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis) είναι μία τυποποιημένη μεθοδολογία που αξιολογεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την απόσυρσή του, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14044 [23]. Η παρούσα ανάλυση εφαρμόζεται στο Lilium Jet, το οποίο είναι ένα ηλεκτρικό όχημα κάθετης απογείωσης και προσγείωσης με στόχο να χρησιμοποιηθεί για ενδονησιωτική μεταφορά στις Κυκλάδες.

Οι Κυκλάδες είναι ένα σύμπλεγμα 24 νησιών στο Αιγαίο που απέχουν 20-150 km μεταξύ τους, έχουν περιορισμένες οδικές υποδομές και οι μεταφορές κατά κύριο λόγο βασίζονται σε αεροπορικά ή θαλάσσια μέσα. Το Lilium Jet προσφέρει τη δυνατότητα γρήγορης και βιώσιμης μεταφοράς σε σύγκριση με τα συμβατικά μέσα.

Η ανάλυση έχει ως σκοπό τον υπολογισμό των ισοδύναμων εκπομπών CO_2 και άλλων ρύπων του Lilium Jet, τη σύγκριση της περιβαλλοντικής απόδοσής του με συμβατικά μέσα μεταφοράς και την υποβολή προτάσεων για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης.

Το Lilium Jet διανύει απόσταση 150000 km κατά τη διάρκεια της ζωής του (8-10 έτη) [23]. Ως σενάριο μεταφοράς θεωρείται ότι το Lilium Jet χρησιμοποιείται για καθημερινές πτήσεις μεταξύ Μυκόνου και Σαντορίνης, διανύοντας 120 km και μεταφέροντας 5 επιβάτες ανά δρομολόγιο. Εκτελεί 3 πτήσεις ημερησίως για 350 ημέρες ετησίως, για 8 έτη.

Ο κύκλος ζωής του οχήματος περιλαμβάνει την κατασκευή, χρήση, συντήρηση και ανακύκλωση του οχήματος. Η κατασκευή της μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι η πιο ενεργοβόρα φάση λόγω της εξόρυξης υλικών όπως το λίθιο, το κοβάλτιο και το νικέλιο. Η συντήρηση, η οποία περιλαμβάνει αντικατάσταση εξαρτημάτων και ελέγχους, αποτελεί το 3% των εκπομπών κατασκευής. Οι εκπομπές του κύκλου ζωής του οχήματος υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση [23][27][28]:

$$EO = Μέγιστη\ ενέργεια\ οχήματος * Συντελεστής\ εκπομπών\ κατασκευής * (1 + ποσοστό\ συντήρησης) = 320\ kWh * \frac{73 kg CO_2}{kWh} * (1 + 0.03) = 24060.8\ kg CO_2 \quad (5.17)$$

Ο κύκλος καυσίμου καλύπτει και την παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την επαναφόρτιση των μπαταριών βάσει του ενεργειακού μίγματος των Κυκλάδων. Το δίκτυο των Κυκλάδων συνδέεται με το ηπειρωτικό δίκτυο της Ελλάδας μέσω υποβρύχιων καλωδίων. Το 2023, το 45% της ενέργειας προερχόταν από ΑΠΕ, το 20% από λιγνίτη και το 35% από φυσικό αέριο [29]. Θεωρώντας την ιδανική κατανάλωση eVTOL 0.2 kWh/km [30], η κατανάλωση ενέργεια του οχήματος κατά τη διάρκεια ζωής του είναι 150000 * 0.2 = 30000 kWh. Λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές εκπομπών ρύπων [31], υπολογίζονται οι εκπομπές ρύπων για τον κύκλο καυσίμου.

Πίνακας 11 Εκπομπές ρύπων κύκλου καυσίμου για το Lilium Jet

Ρύπος	Συντελεστής εκπομπών ρύπου (kg/kWh)	Ενέργεια (kWh)	Εκπομπές (kg)
CO_2	0.45	30000	13500
SO_2	0.0015	30000	45
NO_x	0.001	30000	30
CO	0.0004	30000	12

Οι συνολικές εκπομπές του κύκλου ζωής του οχήματος είναι:

$$Εκπομπές\ LCA = 24060.8 + 13500 = 37560.8\ kg\ CO_2 \quad (5.18)$$

Η κατασκευή της μπαταρίας συνεισφέρει το 64% του συνολικού αποτυπώματος. Το σχετικά χαμηλό αποτύπωμα του κύκλου καυσίμου οφείλεται στο υψηλό ποσοστό διείσδυσης των ΑΠΕ στο Ελληνικό δίκτυο. Το μέσο ανθρακικό αποτύπωμα κατά τη διάρκεια ζωής του οχήματος είναι 37560.8 / 150000 = 250.4 g CO_2 / km.

Ένα μικρό αεροσκάφος, όπως το Cirrus SR22, εκπέμπει 300 g CO_2 / km και 45000 kg CO_2 για 150000 km [32]. Επίσης, το πλοίο της γραμμής εκπέμπει 250 g CO_2 / km και 37500 kg CO_2 για 150000 km [33]. Συνεπώς, το Lilium Jet έχει όμοιο ανθρακικό αποτύπωμα με το πλοίο της γραμμής και 16.53% μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα από ένα μικρό αεροσκάφος.

Οι τεχνολογίες της ανακύκλωσης μπαταριών μειώνουν το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα του eVTOL. Επίσης, η εγκατάσταση τοπικών σταθμών φόρτισης με αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα στα νησιά πρόκειται να μειώσουν το ανθρακικό αποτύπωμα του κύκλου καυσίμου.

5.5 Ανάλυση ευαισθησίας για κρίσιμες τεχνικές παραμέτρους του Joby Aviation S4

Η ανάλυση ευαισθησίας βασίζεται στις πηγές [24] και [34]. Για την ανάλυση επιλέγεται το eVTOL Joby Aviation S4, ένα αεροσκάφος κάθετης απογείωσης και προσγείωσης με έξι προπέλες, με μέγιστη ταχύτητα 200 mph ή 89.4 m/s και αυτονομία 241 km.

Οι τεχνικές παράμετροι, οι οποίες επηρεάζουν την αυτονομία και το μέγιστο βάρος απογείωσης, είναι οι ακόλουθες:

- **Ειδική ενέργειας μπαταρίας E_{bs}:** Η ειδική ενέργεια της μπαταρίας μετρά την ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα μάζας. Η αρχική τιμή της είναι 276 Wh/kg με εύρος 200-500 Wh/kg. Η ειδική ενέργεια μπαταρίας αυξάνει την αυτονομία του EVTOL καθώς περισσότερη ενέργεια είναι διαθέσιμη για την πτήση χωρίς αύξηση της μάζας. Αν V_c η ταχύτητα του eVTOL, m_b η μάζα της μπαταρίας, DOD το βάθος εκφόρτισης, E_{br} η εφεδρική ενέργεια της μπαταρίας και P_c η ισχύς cruise, τότε ορίζονται οι εξής σχέσεις για την αυτονομία, το χρόνο πτήσης και τη διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας:

$$S_c = 3600 V_c t_c \quad (5.19)$$

$$t_c = \frac{E_{ba}}{P_c} \quad (5.20)$$

$$E_{ba} = E_{bs} m_b DOD - E_{br} \quad (5.21)$$

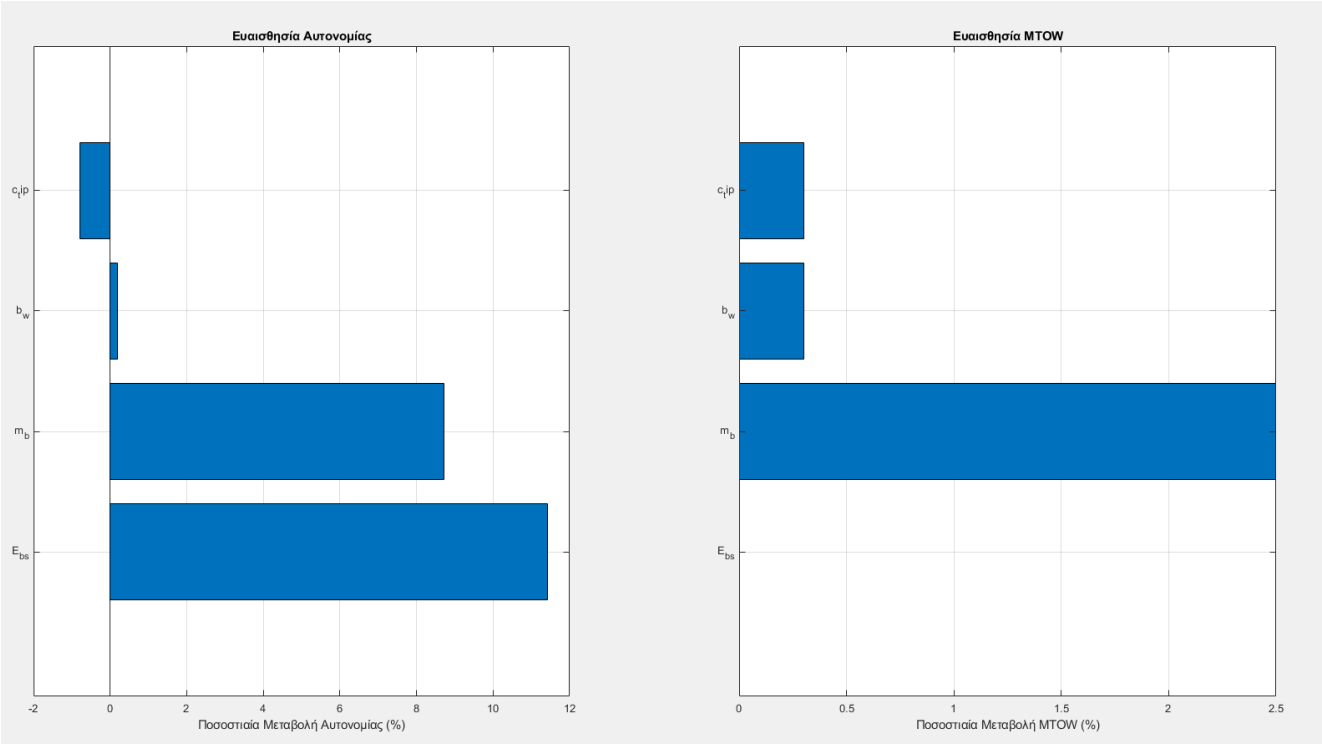
- **Μάζα μπαταρίας (m_b):** Η μάζα μπαταρίας με αρχική τιμή 250 kg και εύρος 200-250 kg αποτελεί σημαντικό τμήμα του μέγιστου βάρους απογείωσης (Maximum Takeoff Weight), το οποίο είναι το μέγιστο συνολικό βάρος του αεροσκάφους με το οποίο μπορεί να απογειωθεί ασφάλεια. Το MTOW είναι το άθροισμα του δομικού βάρους m_s (πλαίσιο, πτέρυγες), του βάρους συστήματος ισχύος m_p (κινητήρες, προπέλες), του βάρος εξοπλισμού m_e (ηλεκτρονικά), του ωφέλιμου φορτίου m_{pl} (επιβάτες, φορτίο) και της μάζας μπαταρίας m_b . Η αύξηση της μάζας

της μπαταρίας αυξάνει απευθείας το MTOW. Αν και η μεγαλύτερη μάζα μπαταρίας αυξάνει τη διαθέσιμη ενέργεια, αυξάνει επίσης την ισχύ cruise λόγω μεγαλύτερου βάρους, μειώνοντας ταυτόχρονα το χρόνο t_c και την αυτονομία. Αν W_{to} το βάρος απογείωσης σε N και L_c/D_c ο λόγος της δύναμης άντωσης προς τη δύναμη οπισθέλκουσας, η ισχύς cruise δίνεται από τη σχέση:

$$P_c = \frac{W_{to} V_c}{\frac{L_c}{D_c} n_p} \quad (5.22)$$

- **Άνοιγμα πτερυγίων b_w:** Το άνοιγμα πτερυγίων με αρχική τιμή 9.7 m και εύρος 8 - 12m καθορίζει το μέγεθος της πτέρυγας και επηρεάζει την αεροδυναμική απόδοση. Το μεγαλύτερο άνοιγμα πτερυγίων βελτιώνει το λόγο L_c/D_c, μειώνοντας την ισχύ cruise και αυξάνοντας την αυτονομία. Επίσης, αυξάνει το δομικό βάρος και κατά συνέπεια το MTOW.
- **Μήκος χορδής στην άκρη της πτέρυγας c_{tip}:** Το μήκος της χορδής στην άκρη της πτέρυγας με αρχική τιμή 1 m και εύρος 0.45 – 1 m επηρεάζει το μέγεθος και το σχήμα της πτέρυγας. Η αύξηση του μήκους της χορδής αυξάνει την επιφάνει της πτέρυγας, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη οπισθέλκουσα, το μικρότερο λόγο L_c/D_c και τη μείωση της αυτονομίας. Επίσης, μειώνεται το MTOW.

Η ανάλυση ευαισθησίας υλοποιείται στο λογισμικό Matlab εξετάζοντας την επίδραση της αύξησης κατά 10% των τεσσάρων παραμέτρων στην αυτονομία και στο MTOW. Ειδικότερα, η ειδική ενέργεια της μπαταρίας αυξάνεται από 276 σε 303.6 Wh/kg, η μάζα της μπαταρίας από 250 σε 275 kg, το άνοιγμα πτερυγίων από 9.7 σε 10.67 m και το μήκος χορδής στην άκρη της πτέρυγας από 1 σε 1.1 m.



Εικόνα 18 Ευαισθησία αυτονομίας και MTOW του Joby Aviation S4 στη μεταβολή της ειδικής ενέργεια της μπαταρίας, της μάζας της μπαταρίας, του άνοιγματος πτερυγίων και του μήκους χορδής στην άκρη της πτέρυγας

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υπολογισμών, η αύξηση της ειδικής ενέργειας της μπαταρίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αυτονομίας 11.33% χωρίς να επηρεάζεται το MTOW. Αυτό σημαίνει ότι η επένδυση σε τεχνολογίες μπαταριών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας αποφέρει τα μέγιστα οφέλη.

Η αύξηση της μάζας της μπαταρίας αυξάνει την αυτονομία κατά 8.7% και ταυτόχρονα το MTOW κατά 2.5%. Έτσι, αν και προσφέρει σημαντική βελτίωση στην αυτονομία, το προστιθέμενο βάρος περιορίζει την απόδοση, αυξάνει το κόστος κατασκευής και λειτουργίας, και μειώνει την ικανότητα μεταφοράς ωφέλιμου φορτίου.

Η επίδραση του ανοίγματος πτερυγίων τόσο στην αυτονομία όσο και στο MTOW είναι περιορισμένη, 0.27% και 0.3% αντίστοιχα. Η αεροδυναμική βελτιστοποίηση που επιτυγχάνεται αντισταθμίζεται από την αύξηση του δομικού βάρους και την απαιτούμενη ισχύ cruise.

Η αύξηση του μήκους της χορδής στην άκρη της πτέρυγας μειώνει την αυτονομία κατά 0.62% και αυξάνει το MTOW κατά 0.3%. Η αύξηση του μήκους της χορδής έχει αρνητική επίδραση στην αυτονομία λόγω της αυξημένης οπισθέλκουσας. Έτσι, για τη βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης, το μήκος της χορδής στην άκρη της πτέρυγας θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.

6 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξέτασε τη σκοπιμότητα χρήσης αεροσκαφών eVTOL για τη μεταφορά επιβατών, συγκρίνοντάς τα με συμβατικά μέσα μεταφοράς. Μέσα από την ανάλυση που διεξήχθη, και ιδιαίτερα από τη μελέτη περίπτωσης στο κεφάλαιο 5, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής του Lilium Jet στις Κυκλάδες καταδεικνύει ότι το eVTOL προσφέρει ανταγωνιστικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τα συμβατικά μέσα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, το Lilium Jet παρουσιάζει ανθρακικό αποτύπωμα 250.4 g CO_2/km, όμοιο με αυτό ενός πλοίου της γραμμής και 16.53% χαμηλότερο από αυτό ενός μικρού αεροσκάφους, όπως το Cirrus SR22. Η υψηλή διείσδυση ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα των Κυκλάδων συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου κατά τη φάση χρήσης, ενώ η κατασκευή της μπαταρίας αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή εκπομπών, και, συγκεκριμένα, το 64% του συνολικού αποτυπώματος. Η χρήση τοπικών σταθμών φόρτισης με αιολική και φωτοβολταϊκή ενέργεια μπορεί να μειώσει περαιτέρω το αποτύπωμα του κύκλου καυσίμου και να ενισχύσει τη βιωσιμότητα των eVTOLs.
- Η ανάλυση ευαισθησίας του Joby Aviation S4 καταδεικνύει ότι η ειδική ενέργεια της μπαταρίας αποτελεί τον πιο κρίσιμο παράγοντα για την αυτονομία, με αύξηση κατά 11.33% να οδηγεί σε σημαντική βελτίωση χωρίς αύξηση του μέγιστου βάρους απογείωσης. Ωστόσο, η αύξηση της μάζας της μπαταρίας βελτιώνει την αυτονομία κατά 8.7%, αλλά αυξάνει το MTOW κατά 2.5%, υποδεικνύοντας μία ισορροπία μεταξύ ενεργειακής ικανότητας και βάρους. Το άνοιγμα πτερυγίων έχει περιορισμένη επίδραση στην αυτονομία και το MTOW, ενώ η αλλαγή του μήκους χορδής στην άκρη της πτέρυγας επηρεάζει ελάχιστα αυτές τις παραμέτρους, υποδηλώνοντας ότι η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης πρέπει να εξισορροπιστεί με το δομικό βάρος.
- Η ανάλυση κόστους-οφέλους για τη διαδρομή Αθήνα-Μύκονος κατέδειξε ότι τα eVTOLs έχουν ανταγωνιστική ΚΠΑ και δείκτη IRR, αν και η περίοδος αποπληρωμής είναι μεγαλύτερη από αυτή των πλοίων και των αεροπλάνων. Για τη διαδρομή Αθήνα-Θεσσαλονίκη, τα eVTOLs παρουσιάζουν μεγαλύτερη ΚΠΑ σε σχέση με το τρένο και το λεωφορείο, αλλά χαμηλότερη από το αεροπλάνο, υποδεικνύοντας ότι είναι πιο κατάλληλα για μικρότερες αποστάσεις, όπως η διαδρομή Αθήνα-Μύκονος.

Τα eVTOLs προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως ταχύτητα μεταφοράς επιβατών, δυνατότητα λειτουργίας σε περιορισμένους χώρους, μειωμένες εκπομπές ρύπων, χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, προκλήσεις όπως το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, η περιορισμένη αυτονομία λόγω της τρέχουσας τεχνολογίας μπαταριών και οι απαιτήσεις υποδομών φόρτισης παραμένουν σημαντικές.

Με βάση τα ευρήματα της εργασίας προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Η βελτιστοποίηση της τεχνολογίας των μπαταριών έτσι ώστε να βελτιωθεί η ενεργειακή πυκνότητά τους αυξάνει την αυτονομία και διατηρεί παράλληλα χαμηλό MTOW.
- Η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης με έμφαση στη χρήση ΑΠΕ μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και την οικονομική απόδοση των eVTOLs.

- Η ανάλυση του κόστους ανακύκλωσης των μπαταριών ιόντων λιθίου συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.
- Η ανάπτυξη τεχνολογιών αυτόνομης πλοήγησης και τεχνητής νοημοσύνης βελτιώνει την απόδοση και την ασφάλεια των eVTOLs.
- Η βελτιστοποίηση της χρήσης των eVTOLs με αύξηση της χωρητικότητάς τους και η εφαρμογή ευέλικτων τιμολογιακών πολιτικών μπορεί να βελτιώσει τα έσοδα ανά επιβάτη.

7 Βιβλιογραφία

[1] Osita N. Ugwueze, Thomas Statheros, Nadjim Horri and Mauro S. Innocente, 'Investigation of a Mission-based Sizing Method for Electric VTOL Aircraft Preliminary Design' Available: https://doi.org/10.2514/6.2022-1931

[2] https://www.aviationtoday.com/2021/05/14/why-are-batteries-a-problem-for-evtols/

[3] Osita Ugwueze, Thomas Statheros, Michael A. Bromfield and Nadjim Horri, 'Trends in eVTOL Aircraft Development: The Concepts, Enablers and Challenges' Available: https://doi.org/10.2514/6.2023-2096

[4] https://www.smf.com.sg/reinventing-maritime-deliveries-f-drones/?utm_source=chatgpt.com

[5] https://www.jobyaviation.com/

[6] https://lilium.com/

[7] https://vertical-aerospace.com/

[8] https://www.ehang.com/ehangaav/

[9] Vertical Take-off and Landing (VTOL), EASA (European Union Aviation Safety Agency) Available: https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/vertical-take-and-landing-vtol?utm_source=chatgpt.com

[10] Jorge A. Llamas-Orozco, Fanran Meng, Gavin S. Walker, Amir F. N. Abdul-Manan, Heather L. MacLean, Daniel Posen, Jon McKechnie, 'Estimating the environmental impacts of global lithium-ion battery supply chain: A temporal, geographical, and technological perspective' Available: https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad361

[11] International Energy Agency (IEA), Global Energy & CO_2 Status Report, Available: https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions?utm_source=chatgpt.com

[12] https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/to-take-off-flying-vehicles-first-need-places-to-land?utm_source=chatgpt.com

[13] P. Peterson and F. Fabozzi, Capital Budgeting: Theory and Practice. JOHN WILEY & SONS, 2002.

[14] "Google," *Google.com*. [Online]. Available: http://google.com

[15] [Online]. Available: http://[https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx

[16] "Athens Transport," Athens Transport, [Online]. Available: https://www.athenstransport.com/

[17] All about Aviation, [Online]. Available: https://allaboutaviation.gr/

[18] "Hellenic Train," Hellenictrain.gr. [Online]. Available: https://www.hellenictrain.gr/

[19] Ktelbus.com. [Online]. Available: https://ktelbus.com/

[20] "Skyscanner," Skyscanner.com. [Online]. Available: https://gr.skyscanner.com/

[21] "Dave's Travel Pages: Greece travel blog and bicycle touring," Dave's Travel Pages, 05-Jun-2017. [Online]. Available: https://www.davestravelpages.com/

[22] S. P. Melo, F. Cerdas, A. Barke, C. Thies, T. S. Spengler, and C. Herrmann, “Life Cycle Engineering of future aircraft systems: the case of eVTOL vehicles,” Procedia CIRP, vol. 90, pp. 297–302, 2020.
[23] N. Velaz-Acera, D. Arcauz-Durán, and D. Borge-Diez, “Life cycle assessment of eVTOL vehicles in island systems. Case study: Canary Islands,” Transportation Research Procedia, vol. 71, pp. 387–394, 2023.
[24] “Home,” Evtol.news. [Online]. Available: https://evtol.news/
[25] D. P. Raymer, Aircraft design: A conceptual approach, 6th ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2018.
[26] J. Anderson, Aircraft Performance & Design. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 1999.
[27] “Lilium air mobility - Lilium,” Lilium.com, 24-Dec-2024. [Online]. Available: https://lilium.com/
[28] Commissioned by Transport, “Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it,” Digitaloceanspaces.com. [Online]. Available: https://te-cdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2019_11_Analysis_CO2_footprint_lithium-ion_batteries.pdf
[29] “PAAEY,” Raaey.gr. [Online]. Available: https://www.raaey.gr/
[30] Birmingham.ac.uk. [Online]. Available: https://research.birmingham.ac.uk/en/publications/nasa-electric-vertical-takeoff-and-landing-evtol-aircraft-technol
[31] Gov.gr. [Online]. Available: https://ypen.gov.gr/
[32] D. Lopez, “Cirrus SR22: Celebrating the worlds best-selling GA aircraft,” MotoArt PlaneTags, 14-Nov-2024. [Online]. Available: https://planetags.com/blogs/planetags-blog/cirrus-sr22-celebrating-the-worlds-best-selling-ga-aircraft
[33] Visual Capitalist, “Cruise ships are the most carbon-intensive travel method,” Voronoiapp.com. [Online]. Available: https://www.voronoiapp.com/climate/Cruise-Ships-Are-The-Most-Carbon-Intensive-Travel-Method-1036
[34] Y. Wang, W. Ma, and Z. Chen, “Sensitivity analysis for design parameters of electric tilt-rotor aircraft,” Aerospace, vol. 11, no. 4, p. 322, 2024.

8 Παράρτημα Α

8.1 Κώδικας για την οικονομική αξιολόγηση μέσων μεταφοράς για τη διαδρομή Αθήνα - Θεσσαλονίκη

```
% Ορισμός παραμέτρων
years = 10; % Περίοδος ανάλυσης
discount_rate = 0.08; % Προεξοφλητικό επιτόκιο

% Δεδομένα για τη Διαδρομή Αθήνα-Θεσσαλονίκη
means_ath_thess = {'eVTOL', 'Αεροπλάνο', 'Τρένο', 'Λεωφορείο'};
num_passengers_ath_thess = [7800, 140000, 140000, 15000];
initial_cost_ath_thess = [7000000, 30000000, 40000000, 1000000]; % Αρχικό κόστος (€)
revenue_per_passenger_ath_thess = [250, 60, 50, 40]; % Έσοδα ανά επιβάτη (€)
operating_costs_ath_thess = [300000, 3500000, 600000, 150000]; % Λειτουργικά έξοδα (€/έτος)

% Υπολογισμός ταμειακών ροών
cash_flows_ath_thess = num_passengers_ath_thess .* revenue_per_passenger_ath_thess -
operating_costs_ath_thess;

% Αρχικοποίηση πινάκων
npv_ath_thess = zeros(1, length(means_ath_thess)); % Πίνακας για NPV
payback_ath_thess = zeros(1, length(means_ath_thess)); % Πίνακας για περίοδο αποπληρωμής
irr_ath_thess = zeros(1, length(means_ath_thess)); % Πίνακας για IRR

% Υπολογισμός NPV, Περιόδου αποπληρωμής και IRR
for i = 1:length(means_ath_thess)
    % Υπολογισμός NPV
    pv = 0;
    for t = 1:years
        pv = pv + cash_flows_ath_thess(i) / (1 + discount_rate)^t; % Παρούσα αξία ταμειακών ροών
    end
    npv_ath_thess(i) = pv - initial_cost_ath_thess(i); % NPV = Παρούσα αξία - Αρχικό κόστος

    % Υπολογισμός Περιόδου Αποπληρωμής
    cumulative_cash = 0;
    for t = 1:years
        cumulative_cash = cumulative_cash + cash_flows_ath_thess(i);
        if cumulative_cash >= initial_cost_ath_thess(i)
            payback_ath_thess(i) = t - (cumulative_cash - initial_cost_ath_thess(i)) / cash_flows_ath_thess(i);
            break;
        end
    end
    if cumulative_cash < initial_cost_ath_thess(i)
        payback_ath_thess(i) = NaN; % Δεν επιτυγχάνεται αποπληρωμή εντός 10 ετών
    end

    % Υπολογισμός IRR
    fun = @(r) -initial_cost_ath_thess(i) + sum(cash_flows_ath_thess(i) ./ (1 + r).^(1:years));
    try
        irr_ath_thess(i) = fzero(fun, [0, 2], optimset('Display', 'off'));
    catch
        irr_ath_thess(i) = NaN; % IRR μη εφαρμόσιμο αν δεν υπάρχει λύση
    end
end

% Αποτελέσματα
% Διάγραμμα 1: Σύγκριση NPV
figure('Name', 'Σύγκριση NPV (Αθήνα-Θεσσαλονίκη)', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
bar(npv_ath_thess / 1000000, 'FaceColor', [0.2, 0.6, 0.8]);
set(gca, 'XTickLabel', means_ath_thess, 'FontSize', 12);
```

```
title('Σύγκριση NPV (Αθήνα-Θεσσαλονίκη, 500 χλμ.)', 'FontSize', 14);
ylabel('NPV (€ εκατομμύρια)', 'FontSize', 12);
grid on;
for i = 1:length(means_ath_thess)
    text(i, npv_ath_thess(i) / 1000000, sprintf('€%.2fM', npv_ath_thess(i) / 1000000), ...
        'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', ...
        'FontSize', 10, 'Color', 'black');
end

% Διάγραμμα 2: Σύγκριση Περιόδου Αποπληρωμής
figure('Name', 'Σύγκριση Περιόδου Αποπληρωμής (Αθήνα-Θεσσαλονίκη)', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
bar(payback_ath_thess, 'FaceColor', [0.8, 0.4, 0.2]);
set(gca, 'XTickLabel', means_ath_thess, 'FontSize', 12);
title('Σύγκριση Περιόδου Αποπληρωμής (Αθήνα-Θεσσαλονίκη)', 'FontSize', 14);
ylabel('Περίοδος Αποπληρωμής (έτη)', 'FontSize', 12);
ylim([0, 10]);
grid on;
for i = 1:length(means_ath_thess)
    if ~isnan(payback_ath_thess(i))
        text(i, payback_ath_thess(i), sprintf('%.2f', payback_ath_thess(i)), ...
            'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', ...
            'FontSize', 10, 'Color', 'black');
    else
        text(i, 10, 'N/A', 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', ...
            'FontSize', 10, 'Color', 'black');
    end
end

% Διάγραμμα 3: Σύγκριση IRR
figure('Name', 'Σύγκριση IRR (Αθήνα-Θεσσαλονίκη)', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
bar(irr_ath_thess * 100, 'FaceColor', [0.4, 0.7, 0.3]);
set(gca, 'XTickLabel', means_ath_thess, 'FontSize', 12);
title('Σύγκριση IRR (Αθήνα-Θεσσαλονίκη)', 'FontSize', 14);
ylabel('IRR (%)', 'FontSize', 12);
ylim([0, 50]);
grid on;
for i = 1:length(means_ath_thess)
    if ~isnan(irr_ath_thess(i))
        text(i, irr_ath_thess(i) * 100, sprintf('%.2f%%', irr_ath_thess(i) * 100), ...
            'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', ...
            'FontSize', 10, 'Color', 'black');
    else
        text(i, 0, 'N/A', 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom', ...
            'FontSize', 10, 'Color', 'black');
    end
end

% Διάγραμμα 4: Σωρευτικές ταμειακές
figure('Name', 'Σωρευτικές ταμειακές ροές (Αθήνα-Θεσσαλονίκη)', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
hold on;
colors = lines(length(means_ath_thess));
for i = 1:length(means_ath_thess)
    cumulative_cash = cumsum(repmat(cash_flows_ath_thess(i), 1, years));
    plot(1:years, cumulative_cash / 1000000, 'LineWidth', 2, ...
        'Color', colors(i, :), 'DisplayName', sprintf('%s (%d επιβ.)', means_ath_thess{i},
num_passengers_ath_thess(i)));
end
plot([1, years], [0, 0], 'k--', 'HandleVisibility', 'off');
title('Σωρευτικές Ταμειακές Ροές (Αθήνα-Θεσσαλονίκη)', 'FontSize', 14);
xlabel('Έτη', 'FontSize', 12);
ylabel('Σωρευτικές Ταμειακές Ροές (€ εκατομμύρια)', 'FontSize', 12);
legend('show', 'FontSize', 10, 'Location', 'northwest');
```

```
grid on;
hold off;
```

8.2 Κώδικας για την οικονομική αξιολόγηση μέσων μεταφοράς για τη διαδρομή Αθήνα – Μύκονος

```
% Παράμετροι
years = 10; % Περίοδος ανάλυσης
discount_rate = 0.08; % Προεξοφλητικό επιτόκιο

% Δεδομένα για τη Διαδρομή Αθήνα-Μύκονος (180 χλμ.)
means_ath_myconos = {'eVTOL', 'Αεροπλάνο', 'Πλοίο'};
num_passengers_ath_myconos = [15000, 160000, 250000]; % Ετήσιος αριθμός επιβατών
initial_cost_ath_myconos = [7000000, 30000000, 20000000]; % Αρχικό κόστος (€)
revenue_per_passenger_ath_myconos = [200, 50, 45.5]; % Έσοδα ανά επιβάτη (€)
operating_costs_ath_myconos = [400000, 3500000, 3000000]; % Λειτουργικά έξοδα (€/έτος)

% Υπολογισμός ταμειακών ροών
cash_flows_ath_myconos = num_passengers_ath_myconos .* revenue_per_passenger_ath_myconos -
operating_costs_ath_myconos;

% Αρχικοποίηση πινάκων
npv_ath_myconos = zeros(1, length(means_ath_myconos));
payback_ath_myconos = zeros(1, length(means_ath_myconos));
irr_ath_myconos = zeros(1, length(means_ath_myconos));

% Υπολογισμός NPV, Περιόδου Αποπληρωμής και IRR
for i = 1:length(means_ath_myconos)
    % Υπολογισμός NPV
    pv = 0;
    for t = 1:years
        pv = pv + cash_flows_ath_myconos(i) / (1 + discount_rate)^t;
    end
    npv_ath_myconos(i) = pv - initial_cost_ath_myconos(i);

    % Υπολογισμός Περιόδου Αποπληρωμής
    cumulative_cash = 0;
    for t = 1:years
        cumulative_cash = cumulative_cash + cash_flows_ath_myconos(i);
        if cumulative_cash >= initial_cost_ath_myconos(i)
            payback_ath_myconos(i) = t - (cumulative_cash - initial_cost_ath_myconos(i)) /
cash_flows_ath_myconos(i);
            break;
        end
    end
    if cumulative_cash < initial_cost_ath_myconos(i)
        payback_ath_myconos(i) = NaN;
    end
    % Υπολογισμός IRR
    fun = @(r) -initial_cost_ath_myconos(i) + sum(cash_flows_ath_myconos(i) ./ (1 + r).^(1:years));
    try
        irr_ath_myconos(i) = fzero(fun, [0, 2], optimset('Display', 'off'));
    catch
        irr_ath_myconos(i) = NaN;
```

```
    end
end

% Αποτελέσματα
% Διάγραμμα 1: Σύγκριση NPV
figure('Name', 'Σύγκριση NPV (Αθήνα-Μύκονος, 180 χλμ.)', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
bar(npv_ath_myconos / 1000000, 'FaceColor', [0.2, 0.6, 0.8]);
set(gca, 'XTickLabel', means_ath_myconos, 'FontSize', 12);
title('Σύγκριση NPV (Αθήνα-Μύκονος, 180 χλμ.)', 'FontSize', 14);
ylabel('NPV (€ εκατομμύρια)', 'FontSize', 12);
grid on;
for i = 1:length(means_ath_myconos)
    text(i, npv_ath_myconos(i) / 1000000, sprintf('€%.2fM', npv_ath_myconos(i) / 1000000),
'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom','FontSize', 10, 'Color', 'black');
end

% Διάγραμμα 2: Σύγκριση Περιόδου Αποπληρωμής
figure('Name', 'Σύγκριση Περιόδου Αποπληρωμής', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
bar(payback_ath_myconos, 'FaceColor', [0.8, 0.4, 0.2]);
set(gca, 'XTickLabel', means_ath_myconos, 'FontSize', 12);
title('Σύγκριση Περιόδου Αποπληρωμής', 'FontSize', 14);
ylabel('Περίοδος Αποπληρωμής (έτη)', 'FontSize', 12);
ylim([0, 10]);
grid on;
for i = 1:length(means_ath_myconos)
    if ~isnan(payback_ath_myconos(i))
        text(i, payback_ath_myconos(i), sprintf('%.2f', payback_ath_myconos(i)),'HorizontalAlignment', 'center',
'VerticalAlignment', 'bottom','FontSize', 10, 'Color', 'black');
    else
        text(i, 10, 'N/A', 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom','FontSize', 10, 'Color',
'black');
    end
end

% Διάγραμμα 3: Σύγκριση IRR
figure('Name', 'Σύγκριση IRR', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
bar(irr_ath_myconos * 100, 'FaceColor', [0.4, 0.7, 0.3]);
set(gca, 'XTickLabel', means_ath_myconos, 'FontSize', 12);
title('Σύγκριση IRR', 'FontSize', 14);
ylabel('IRR (%)', 'FontSize', 12);
ylim([0, 50]);
grid on;
for i = 1:length(means_ath_myconos)
    if ~isnan(irr_ath_myconos(i))
        text(i, irr_ath_myconos(i) * 100, sprintf('%.2f%%', irr_ath_myconos(i) * 100),'HorizontalAlignment',
'center', 'VerticalAlignment', 'bottom','FontSize', 10, 'Color', 'black');
    else
        text(i, 0, 'N/A', 'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom','FontSize', 10, 'Color', 'black');
    end
end

% Διάγραμμα 4: Σωρευτικές Ταμειακές Ροές
figure('Name', 'Σωρευτικές Ταμειακές Ροές', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
hold on;
colors = lines(length(means_ath_myconos));
for i = 1:length(means_ath_myconos)
    cumulative_cash = cumsum(repmat(cash_flows_ath_myconos(i), 1, years));
    plot(1:years, cumulative_cash / 1000000, 'LineWidth', 2, 'Color', colors(i, :), 'DisplayName', sprintf('%s (%d
επιβάτες)', means_ath_myconos{i}, num_passengers_ath_myconos(i)));
end
plot([1, years], [0, 0], 'k--', 'HandleVisibility', 'off');
title('Σωρευτικές Ταμειακές Ροές', 'FontSize', 14);
```

```
xlabel('Ετη', 'FontSize', 12);
ylabel('Σωρευτικές Ταμειακές Ροές (€ εκατομμύρια)', 'FontSize', 12);
legend('show', 'FontSize', 10, 'Location', 'northwest');
grid on;
hold off;
```

8.3 Κώδικας για την ανάλυση ευαισθησίας κρίσιμων τεχνικών παραμέτρων του Joby Aviation S4

```
% Βασικές παράμετροι Joby Aviation S4
E_bs = 276; % Ειδική ενέργεια μπαταρίας (Wh/kg)
m_b = 250; % Μάζα μπαταρίας (kg)
b_w = 9.7; % Άνοιγμα πτερυγίων (m)
c_tip = 1.0; % Μήκος χορδής (m)
V_c = 89; % Ταχύτητα (m/s)
rho = 1.225; % Πυκνότητα αέρα (kg/m^3)
g = 9.81; % Επιτάχυνση βαρύτητας (m/s^2)
eta_p = 0.85; % Απόδοση προπέλας
L_D = 10; % Λόγος άντωσης-οπισθέλκουσας
DOD = 0.8; % Βάθος εκφόρτισης
E_res = 0.1 * E_bs * m_b; % Εφεδρική ενέργεια
m_s = 300; % Δομικό βάρος (kg)
m_p = 150; % Βάρος συστήματος ισχύος (kg)
m_e = 100; % Βάρος εξοπλισμού (kg)
m_pl = 200; % Ωφέλιμο φορτίο (kg)
MTOW = m_s + m_p + m_e + m_pl + m_b; % Μέγιστο βάρος απογείωσης (kg)
E_total = E_bs * m_b * DOD - E_res; % Διαθέσιμη ενέργεια (Wh)
P_c = (MTOW * g * V_c) / (L_D * eta_p); % Ισχύς cruise (W)
t_c = E_total / P_c; % Χρόνος πτήσης (h)
S_c = 3600 * V_c * t_c / 1000; % Αυτονομία (km)

% Διακυμάνσεις παραμέτρων (±10%)
delta = 0.1;
params = {'E_{bs}', 'm_b', 'b_w', 'c_tip'};
base_values = [E_bs, m_b, b_w, c_tip];
deltas = [delta * E_bs, delta * m_b, delta * b_w, delta * c_tip];
sensitivity_range = zeros(1, 4);
sensitivity_MTOW = zeros(1, 4);

% Υπολογισμός ευαισθησίας
for i = 1:4
    % Αύξηση κατά 10%
    if i == 1 % E_bs
        E_bs_new = E_bs * (1 + delta);
        E_total_new = E_bs_new * m_b * DOD - E_res;
        P_c_new = P_c;
        t_c_new = E_total_new / P_c_new;
        S_c_new = 3600 * V_c * t_c_new / 1000;
        MTOW_new = MTOW;
    elseif i == 2 % m_b
        m_b_new = m_b * (1 + delta);
        E_total_new = E_bs * m_b_new * DOD - E_res;
        MTOW_new = m_s + m_p + m_e + m_pl + m_b_new;
        P_c_new = (MTOW_new * g * V_c) / (L_D * eta_p);
        t_c_new = E_total_new / P_c_new;
        S_c_new = 3600 * V_c * t_c_new / 1000;
    elseif i == 3 % b_w
        b_w_new = b_w * (1 + delta);
```

```
        L_D_new = L_D * (1 + 0.05 * delta);
        m_s_new = m_s * (1 + 0.1 * delta);
        MTOW_new = m_s_new + m_p + m_e + m_pl + m_b;
        P_c_new = (MTOW_new * g * V_c) / (L_D_new * eta_p);
        t_c_new = E_total / P_c_new;
        S_c_new = 3600 * V_c * t_c_new / 1000;
    elseif i == 4 % c_tip
        c_tip_new = c_tip * (1 + delta);
        L_D_new = L_D * (1 - 0.05 * delta);
        m_s_new = m_s * (1 + 0.1 * delta);
        MTOW_new = m_s_new + m_p + m_e + m_pl + m_b;
        P_c_new = (MTOW_new * g * V_c) / (L_D_new * eta_p);
        t_c_new = E_total / P_c_new;
        S_c_new = 3600 * V_c * t_c_new / 1000;
    end
    sensitivity_range(i) = (S_c_new - S_c) / S_c * 100;
    sensitivity_MTOW(i) = (MTOW_new - MTOW) / MTOW * 100;
end

% Διαγράμματα
figure;
subplot(1, 2, 1);
barh(sensitivity_range);
set(gca, 'YTickLabel', params);
xlabel('Ποσοστιαία Μεταβολή Αυτονομίας (%)');
title('Ευαισθησία Αυτονομίας');
grid on;
subplot(1, 2, 2);
barh(sensitivity_MTOW);
set(gca, 'YTickLabel', params);
xlabel('Ποσοστιαία Μεταβολή MTOW (%)');
title('Ευαισθησία MTOW');
grid on;
```