ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΝΑΕΡΙΑ ΤΡΟΧΙΑ ΕΝΟΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ

Κωνσταντίνα Μπαφέρου

Επίβλεψη:

Παρασκευή Ψαράκη Καλουπτσίδη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2016

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF TRANSPORTATION PLANNING AND ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

FACTORS AFFECTING THE AIRCRAFT FLIGHT PATH

Konstantina Baferou

Supervisor:

Paraskevi Psaraki Kalouptsidi, Associate Professor in NTUA

Athens, March 2016

Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν **οι παράγοντες που επηρεάζουν την εναέρια τροχιά ενός αεροσκάφους**. Οι παράγοντες αυτοί συνθέτουν ένα πολύπλοκο πρόβλημα κι έτσι προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού μιας μέσης εναέριας τροχιάς, η οποία θα ενσωματώνει τους παράγοντες αυτούς. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, σε αυτή την εργασία γίνεται προσδιορισμός μιας **μέσης ακολουθούμενης εναέριας πορείας** για τους δημοφιλέστερους τύπους αεροσκαφών, για διαφορετικά εύρη αποστάσεων. Προτείνεται δηλαδή, ένα **αντιπροσωπευτικό μέσο διάγραμμα** του υψομέτρου του αεροσκάφους συναρτήσει του χρόνου. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, συλλέχθηκαν στοιχεία για πολλές διαφορετικές πτήσεις του τύπου των αεροσκαφών που εξετάζονται. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάναν πληροφορίες για το υψόμετρο του αεροσκάφους, την κάθε χρονική στιγμή της πτήσης. Η συλλογή στοιχείων έγινε για διάφορα εύρη αποστάσεων. Αυτά τα διαφορετικά εύρη για τα οποία έγινε ο προσδιορισμός της μέσης τροχίας, επιλέχθηκαν βάσει της σχετικής βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια, τα ακατέργαστα συλλεχθέντα δεδομένα, επεξεργάζονταν στατιστικά, ύστερα από **ευθυγράμμιση δεδομένων** (ή εξομάλυνση δεδομένων; στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρεται ως **landmark registration**). Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, εξαλείφονται οι διαφορές φάσης ανάμεσα στα διαγράμματα χρόνου-υψομέτρου και καθίσταται δυνατό να εξαχθεί στατιστικά η μέση τροχιά ενός αεροσκάφους. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Abstract

The purpose of this thesis is to explore the factors affecting the aircraft trajectory. These factors compose a **complex problem**; thus arises the need of an average flight path to be determined, which would incorporate these factors' effects. To accomplish this purpose, the **determination of an average flight path** for the most commonly used aircraft types and for various distance ranges. More specifically, the aim is to find a **representative mean diagram of the aircraft altitude in relation to flight time**. For this goal to be achieved, flight data was collected, for each aircraft type and for each examined distance range. These distance ranges were chosen according to the FAA Technical Manual (September 2005). The collected raw data was processed statistically, after undergoing **landmark registration**. Through use of landmark registration, phase differences between the flight profiles could be eliminated, making it possible to statistically extract an accurate mean flight path. Following this procedure, the results are being discussed.

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της διαδρομής μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, θα ήθελα να απευθύνω στην επιβλέπουσα καθηγήτρια κα. Παρασκευή Ψαράκη Καλουπτσίδη τις θερμές μου ευχαριστίες για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα καινοτόμο θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος, καθώς και για τη συνεχή επιστημονική της καθοδήγηση και τη συμβουλευτική της διάθεση. Τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου εκφράζω στην κα. Ιωάννα Παγώνη, υποψήφια διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την ακατάπαυστη παρουσία της σε όλα τα στάδια της εργασίας, την πολύτιμη βοήθειά της και τη δημιουργία αγαστών συνθηκών συνεργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά και τους φίλους μου για την αδιάκοπη υποστήριξή τους από τα πρώτα έως τα τελευταία μου βήματα στο Ίδρυμα αυτό .

Περιεχόμενα

Σύνοψη 3
Περιεχόμενα 6
1. Εισαγωγή 9
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο 13
2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την εναέρια πορεία του αεροσκάφους 13
2.2 Οι φάσεις της πτήσης 19
2.3 Εξεταζόμενοι τύποι αεροσκαφών 22
2.4 Μήκος πτήσης 31
3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και Επιλογή Μεθόδου 34
3.1 Μοντέλο Σημείου-Μάζας (Point-Mass Model) 34
3.2 Μοντέλο παλινδρόμησης (Regression Model) 38
3.3 Επιλεγείσα μέθοδος: Στατιστική επεξεργασία ύστερα από ευθυγράμμιση δεδομένων με τη χρήση χαρακτηριστικών σημείων (Landmark Registration) 39
4. Συλλογή και Καταγραφή Στοιχείων Πτήσεων 42
4.1 Γενικά 42
4.2 Ομαδοποίηση πτήσεων με βάση το εύρος απόστασης 45
5. Επεξεργασία Στοιχείων 47
6. Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων 51
6.1 Προφίλ πτήσης τύπων αεροσκάφους ανά εύρος απόστασης 51
6.2 Προφίλ πτήσης σε κάθε εύρος απόστασης ανά τύπο αεροσκάφους 65
6.3 Μέσα υψόμετρα πλεύσης ανά τύπο αεροσκάφους 73
6.4 Διάρκεια φάσεων ανόδου και καθόδου ανά τύπο αεροσκάφους 77
6.5 Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου ανά τύπο αεροσκάφους 79
7. Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα 85
Βιβλιογραφία 87
Παράρτημα 89
Λίστα των αεροδρομίων που χρησιμοποιήθηκαν στη συλλογή στοιχείων 89
Φύλλο καταγραφής στοιχείων 91

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1: Η εξέλιξη των εσόδων για τον ετήσιο αριθμό επιβατοχιλιομέτρων, 1945 -2012 9
Διάγραμμα 2.1: Πυκνότητα αέρα συναρτήσει του υψομέτρου 14
Διάγραμμα 2.2: Ταχύτητα ανέμου συναρτήσει του υψομέτρου 17
Διάγραμμα 2.3: Μερίδιο κέρδους από την πώληση εμπορικών αεροσκαφών στην παγκόσμια αγορά .. 22
Διάγραμμα 2.4: Μερίδιο κέρδους από την πώληση εμπορικών αεροσκαφών, Βόρειος Αμερική 23
Διάγραμμα 2.5: Μερίδιο κέρδους από την πώληση εμπορικών αεροσκαφών, Ευρώπη 23
Διάγραμμα 2.6 Παραδόσεις Boeing 737 και Airbus A320 28
Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα ροής της διπλωματικής εργασίας 41
Διάγραμμα 4.1: Προφίλ πτήσης αεροσκάφους 43
Διάγραμμα 4.2: Πτήση με μη διακριτή διαδοχή φάσεων 44
Διάγραμμα 5.1: Ευθυγραμμισμένα δεδομένα σε Matlab σε Boeing B737-700, απόσταση 250 μιλίων ... 49
Διάγραμμα 5.2: Μέσο προφίλ πτήσης σε Matlab σε Boeing B737-700, απόσταση 250 μιλίων 49
Διάγραμμα 5.3: Ευθυγραμμισμένα δεδομένα σε Matlab σε Boeing B737-700, απόσταση 2000 μιλίων . 50
Διάγραμμα 5.4: Μέσο προφίλ πτήσης σε Matlab σε Boeing B737-700, απόσταση 2000 μιλίων 50
Διάγραμμα 6.1: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A321, B712 52
Διάγραμμα 6.2: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, B737, B733 53
Διάγραμμα 6.3: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733 54
Διάγραμμα 6.4: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733 55
Διάγραμμα 6.5: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733 56
Διάγραμμα 6.6: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733, B752 57
Διάγραμμα 6.7: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733, B752 58
Διάγραμμα 6.8: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B737, B733, B752 59
Διάγραμμα 6.9: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B737, B733, B752 60
Διάγραμμα 6.10: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B763, B752, B772 62
Διάγραμμα 6.11: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη B763, B752 63
Διάγραμμα 6.12: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη B763, B772 64
Διάγραμμα 6.13: Προφίλ πτήσης A319 65
Διάγραμμα 6.14: Προφίλ πτήσης A321 66
Διάγραμμα 6.15: Προφίλ πτήσης B737 67
Διάγραμμα 6.16: Προφίλ πτήσης B733 68
Διάγραμμα 6.17: Προφίλ πτήσης B712 69
Διάγραμμα 6.18: Προφίλ πτήσης B752 70
Διάγραμμα 6.19: Προφίλ πτήσης B763 71
Διάγραμμα 6.20: Προφίλ πτήσης B772 72
Διάγραμμα 6.21: Μέσο υψόμετρο πλεύσης για τους τύπους αεροσκαφών συναρτήσει του μήκους πτήσης 76
Διάγραμμα 6.22: Μέσοι ρυθμοί ανόδου για πτήσεις μικρού και μεσαίου μήκους 81
Διάγραμμα 6.23: Μέσοι ρυθμοί καθόδου για πτήσεις μικρού και μεσαίου μήκους 81
Διάγραμμα 6.24: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για αεροσκάφη πτήσεων μικρού και μεσαίου μήκους 82
Διάγραμμα 6.25: Μέσοι ρυθμοί ανόδου για πτήσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους 83
Διάγραμμα 6.26: Μέσοι ρυθμοί καθόδου για πτήσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους 84

Διάγραμμα 6.27: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη που εκτελούν πτήσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους 84

Κατάλογος Πινάκων

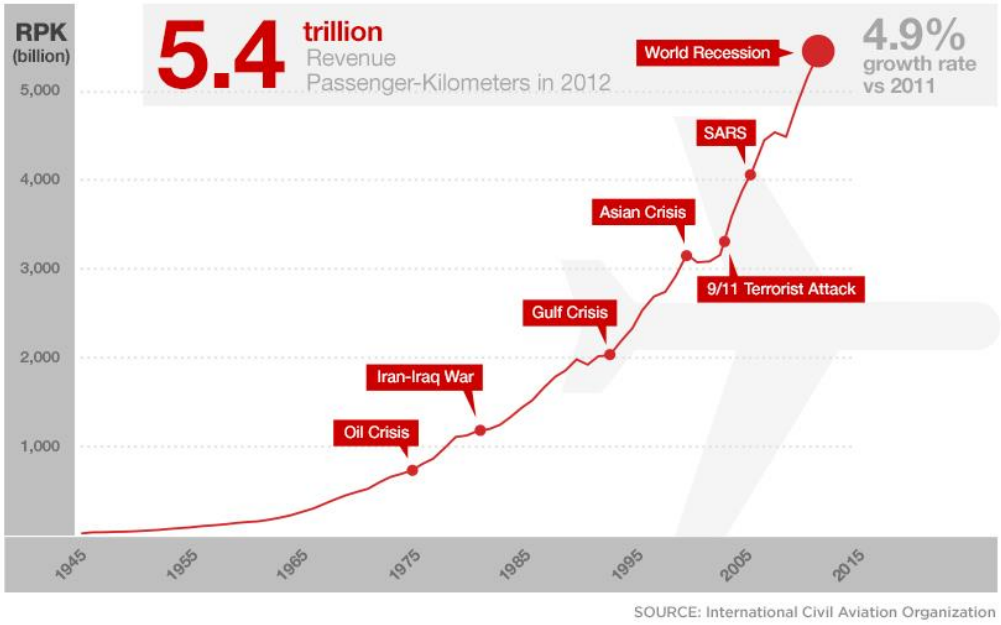
Πίνακας 2.1: Οι φάσεις της πτήσης 19
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά αεροσκαφών Airbus 24
Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά αεροσκαφών Boeing 737-700, Boeing 737-300, Boeing 717-200 26
Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά αεροσκαφών Boeing 757-200, Boeing 767-300, Boeing 777-200 26
Πίνακας 4.1 Ομαδοποίηση πτήσεων σε εύρη απόστασης 45
Πίνακας 4.2: Συνδυασμοί εύρους αποστάσεων με τύπους αεροσκαφών 46
Πίνακας 6.1: Σύντομες γραφές τύπων αεροσκαφών 51
Πίνακας 6.2: Μέσο υψόμετρο πλεύσης αεροσκαφών Airbus A319 και A321 73
Πίνακας 6.3: Μέσο υψόμετρο πλεύσης αεροσκαφών Boeing 737, 733, 712 74
Πίνακας 6.4: Μέσο υψόμετρο πλεύσης αεροσκαφών Boeing 752, 763, 772 75
Πίνακας 6.5: Μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Airbus A319 και A321 77
Πίνακας 6.6: Μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Boeing 737, 733 και 712 78
Πίνακας 6.7: Μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Boeing 752, 763, 772 78
Πίνακας 6.8: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Airbus A319 και A321 79
Πίνακας 6.9: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Boeing 737, 733 και 712 80
Πίνακας 6.10: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Boeing 752, 763 και 772 82

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Η επίδραση του δείκτη κόστους κατά την άνοδο 15
Εικόνα 2.2: Η επίδραση του δείκτη κόστους κατά την κάθοδο 16
Εικόνα 2.3: Διάτμηση του ανέμου και υψόμετρο 17
Εικόνα 2.4: Οι φάσεις της πτήσης 19
Εικόνα 2.5: Airbus A319 24
Εικόνα 2.6: Airbus A321 25
Εικόνα 2.7: Boeing 737-700 27
Εικόνα 2.8: Boeing 737-300 28
Εικόνα 2.9: Boeing 717-200 29
Εικόνα 2.10: Boeing 757-200 29
Εικόνα 2.11: Boeing 767-300 30
Εικόνα 2.12: Boeing 777-200 31
Εικόνα 2.13: Εναλλακτικές διαδρομές 32
Εικόνα 3.1: Οι ασκούμενες δυνάμεις στο αεροσκάφος κατά την άνοδο 34
Εικόνα 3.2: Οι ασκούμενες δυνάμεις στο αεροσκάφος 36
Εικόνα 3.3: Έλλειψη ακρίβειας της απλοϊκής μεθόδου 39
Εικόνα 4.1: Φύλλο καταγραφής στοιχείων πτήσης 43

1. Εισαγωγή

Στα χρόνια που ακολούθησαν το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η εξέλιξη της πολιτικής αεροπορίας ήταν ραγδαία. Ιδιαίτερα μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1970, σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην ταχύτητα πτήσης, στο εύρος απόστασης το οποίο μπορεί να καλύψει μια αεροπορική πτήση, αλλά και στην εξέλιξη των χρησιμοποιούμενων κατασκευαστικών υλικών. Τα επόμενα χρόνια, οι τεχνολογικές εξελίξεις οδήγησαν στην ενσωμάτωση ψηφιακών συστημάτων που κατέστησαν τις αερομεταφορές ασφαλέστερες και οικονομικότερες. Ως απόρροια των παραπάνω, τις τελευταίες δεκαετιες η επιβατική κίνηση στις αερομεταφορές έχει αυξηθεί με εντυπωσιακά ταχύ ρυθμό. Στο παρακάτω διάγραμμα του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (**I**nternational **C**ivil **A**viation **O**rganization) παρουσιάζεται η εξέλιξη των εσόδων για τον εκάστοτε ετήσιο αριθμό επιβατοχιλιομέτρων παγκοσμίως, από το 1945 έως το 2012, με επισημάνσεις σε γεγονότα ορόσημα που επηρέασαν την παγκόσμια οικονομία.



Διάγραμμα 1.1: Η εξέλιξη των εσόδων για τον εκάστοτε ετήσιο αριθμό επιβατοχιλιομέτρων παγκοσμίως, από το 1945 έως σήμερα (http://i.cdn.turner.com/cnn/interactive/2014/07/travel/aviation-data/media/images/chart_04.jpg)

Από το άνωθεν διάγραμμα γίνεται κατανοητό ότι η αεροπορία είναι ένας διαρκώς αναπτυσσόμενος κλάδος, ενώ τα έσοδα της αεροπορικής βιομηχανίας για τον ετήσιο αριθμό επιβατοχιλιομέτρων του 2012 αγγίζουν τα 5,4 τρισεκατομμύρια δολάρια.

Η τροχιά που ακολουθείται από ένα αεροσκάφος εξαρτάται από μια πληθώρα παραγόντων, κάποιοι από τους οποίους είναι μεταβαλλόμενοι. Ο προσδιορισμός μιας μέσης, αντιπροσωπευτικής εναέριας πορείας ενός αεροσκάφους είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα που συχνά συγκεντρώνει το ενδιαφέρον όσων ασχολούνται στον τομέα της αεροπορίας. Αυτό, διότι

η πορεία πτήσης που θα ακολουθήσει ένα αεροσκάφος έχει άμεση επίδραση σε δύο τομείς οι οποίοι είναι μεγάλης σημασίας για την κάθε αεροπορική εταιρεία˙ στην κατανάλωση καυσίμου και στο συνολικό χρόνο πτήσης *(Merle, 2011)*.

Όσον αφορά την **κατανάλωση καυσίμου**, είναι εύλογο ότι οι αεροπορικές εταιρείες επιζητούν επίτευξη χαμηλής κατανάλωσης προκειμένου να μειώσουν το λειτουργικό κόστος. Κατά τη διάρκεια των περασμένων είκοσι (20) ετών η τιμή του βαρελιού πετρελαίου έχει παρουσιάσει αύξηση. Τον τελευταίο καιρό, λόγω της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης, παρουσιάζεται μια μετρίαση της αύξησης αυτής, και κατά περιόδους εμφανίζονται πτωτικές τάσεις στην τιμή του βαρελιού. Παρόλα αυτά, επειδή οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας δεν χρησιμοποιούνται ακόμη ευρέως, η ανθρωπότητα θα συνεχίσει να είναι ενεργειακά εξαρτημένη από το πετρέλαιο και τα παράγωγά του για τα επόμενα χρόνια. Για τις αεροπορικές εταιρείες το κόστος καυσίμου αποτελεί το 30% του λειτουργικού κόστους. Οι εταιρείες επιθυμούν να μειώσουν το κόστος πτήσης, συνεπώς προσπαθούν να βρουν αεροσκάφη οικονομικότερα και πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Σε μια οικονομικά δυσχερή περίοδο όπως αυτή που διανύουμε, η επένδυση μεγάλων ποσών για προσπάθειες κατασκευής αναβαθμισμένων κινητήρων με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου είναι συχνά ασύμφορη για τις εταιρείες. Αντ' αυτού, η στρατηγική τους με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της πορείας του αεροσκάφους. Γενικά, η φάση στην οποία το αεροσκάφος παρουσιάζει την μέγιστη κατανάλωση είναι αυτή της ανόδου (climb phase), χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι μια πιθανή μείωση κατά τη φάση της πτήσης (cruise phase) ή την κάθοδο (descent phase) θεωρείται αμελητέα. Αυτό, διότι έστω και μια μείωση μίας μόνο ποσοστιαίας μονάδας στη μέση κατανάλωση, μεταφράζεται σε σημαντικό χρηματικό ποσό για μια αεροπορική εταιρεία *(Merle, 2011)*.

Η πορεία που θα ακολουθήσει το αεροσκάφος κατά την πτήση καθορίζει την κατανάλωση που θα επιτευχθεί. Ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου είναι συνάρτηση της δύναμης έλξης, δηλαδή της δύναμης που αντιστέκεται στην κίνηση του αεροσκάφους, και της δύναμης ώθησης που πρέπει να παρέχεται από τις μηχανές του αεροσκάφους για να υπερνικά τη δύναμη έλξης. Φυσικά τα παραπάνω μεγέθη διαφέρουν αναλόγως με τον εκάστοτε τύπο αεροσκάφους. Μπορούμε όμως να πούμε ότι η φάση της απογείωσης απαιτεί τη μέγιστη δύναμη ώθησης από τη μηχανή και κατά συνέπεια και περισσότερο καύσιμο. Καθώς το αεροσκάφος ανεβαίνει σε μεγαλύτερο υψόμετρο, η δύναμη έλξης μειώνεται, όπως και ο ρυθμός κατανάλωσης. Η απόσταση που καλύπτει η πτήση είναι καθοριστικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου απαιτείται. Παρόλα αυτά, επειδή οι φάσεις ανόδου και καθόδου απαιτούν περισσότερο καύσιμο από τη φάση πλεύσης, οι **πτήσεις μικρού μήκους**, όπου η άνοδος και η κάθοδος αποτελούν ένα μεγάλο τμήμα της συνολικής πτήσης, συνήθως παρουσιάζουν μεγαλύτερο ρυθμό κατανάλωσης σε σχέση με **πτήσεις μεσαίου ή μεγάλου μήκους**, όπου η άνοδος και η κάθοδος αποτελούν ένα μικρό τμήμα της πτήσης. Επιπροσθέτως, αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερο είναι το **υψόμετρο** στο οποίο βρίσκεται το αεροσκάφος, τόσο χαμηλότερη είναι η κατανάλωση. *(Merle, 2011)*.

Ένας δεύτερος σημαντικός λόγος για τον οποίο η πορεία του αεροσκάφους ενδιαφέρει τις εταιρείες είναι **ο παράγοντας του χρόνου**. Αυτό, διότι και ο χρόνος πτήσης έχει το κόστος του και δεν είναι δυνατόν να αγνοείται ως παράγοντας προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση. Για μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης, αυξάνονται αντίστοιχα και οι ώρες εργασίας των εργαζομένων. Επιπλέον, σε περίπτωση που υπάρχουν συστηματικά σημαντικές καθυστερήσεις σε πτήση μιας εταιρείας, αυτό θα δυσαρεστήσει και θα απομακρύνει τους πελάτες. Οι αεροπορικές εταιρείες πρέπει λοιπόν να ισορροπήσουν ανάμεσα στη χαμηλή κατανάλωση καυσίμου και σε έναν επιθυμητό χρόνο πτήσης.

Σημαντική επίσης είναι και η **επιλογή τύπου αεροσκάφους** για μια συγκεκριμένη πτήση. Γενικά, τα μεγάλα αεροσκάφη, διαθέτοντας μεγαλύτερη χωρητικότητα καυσίμου, χρησιμοποιούνται για πτήσεις μεγάλου μήκους και τα μικρότερα αεροσκάφη προσφέρονται για μικρότερες αποστάσεις. Η επιλογή τύπου αεροσκάφους είναι μεγάλη σημασίας, καθώς ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου διαφοροποιείται ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών.

Επιπροσθέτως, κάθε πτήση πρέπει υποχρεωτικά να συμβαδίζει με τους κανονισμούς του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO), οι οποίοι θέτουν όρια για τη μέγιστη κλίση κατά την απογείωση και την προσγείωση του αεροσκάφους, προκειμένου να διατηρούνται ανεκτές συνθήκες για τους επιβάτες.

Πριν την αναχώρηση μιας πτήσης μορφώνεται το λεγόμενο **σχέδιο πτήσης (flight plan)**, στο οποίο προσδιορίζεται η ακριβής διαδρομή που θα ακολουθήσει το αεροσκάφος. Το σχέδιο πτήσης περιλαμβάνει και άλλες βασικές πληροφορίες όπως τα αεροδρόμια αναχώρησης και αφίξεως, την εκτιμώμενη διάρκεια πτήσης, εναλλακτικά αεροδρόμια για προσγείωση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και τα στοιχεία των πιλότων. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το σχέδιο πτήσης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους του οποίου οι βασικές παράμετροι είναι η κατανάλωση καυσίμου και ο χρόνος. Όμως, ο σχεδιασμός της εναέριας πορείας οφείλει να λαμβάνει υπόψιν και άλλες παραμέτρους όπως οι **απαιτήσεις του Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας (Air Traffic Control)** και οι **καιρικές συνθήκες**. Αυτές οι παράμετροι συχνά δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν με την επιθυμητή ακρίβεια και ως απόρροια αυτού του γεγονότος, η τελική πραγματοποιούμενη πορεία του αεροσκάφους εμφανίζει διαφοροποιήσεις συγκριτικά με το αρχικό σχέδιο πτήσης.

Οι απαιτήσεις του Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας έχουν ως βασικό στόχο να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο σύγκρουσης μεταξύ δύο διαφορετικών αεροσκαφών. Κατά συνέπεια, το αεροσκάφος πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένη πορεία εντός ελεγχόμενων εναέριων χώρων, ακολουθώντας τους λεγόμενους αεροδιαδρόμους, ακόμα και αν η πορεία που προκύπτει είναι μεγαλύτερη σε μήκος, άρα και πιο ασύμφορη οικονομικά από την ευθεία πορεία μεταξύ των δύο σημείων. Ο κυβερνήτης του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια της πτήσης βρίσκεται σε επικοινωνία με το Κέντρο Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας και ακολουθει τις οδηγίες που δέχεται από αυτό. Συμβαίνει συχνά το αεροσκάφος να αποκλίνει από τη σχεδιασμένη πορεία είτε λόγω εκτάκτων συνθηκών είτε λόγω ύπαρξης δυνατότητας να ακολουθηθεί μια συντομότερη διαδρομή.

Ο σχεδιασμός μιας πτήσης απαιτεί ακριβή μετεωρολογική πρόβλεψη. Η εκτίμηση της θερμοκρασίας του αέρα και των πνέοντων ανέμων, καθώς και η έγκυρη πρόβλεψη ακραίων καιρικών φαινομένων είναι ζωτικής σημασίας, όχι μόνο για την οικονομία μιας πτήσης αλλά και για την ασφάλειά της. Παρόλα αυτά, είναι δύσκολο οι προβλέψεις αυτές να είναι πάντοτε ακριβείς κι έτσι οι καιρικές συνθήκες είναι ένας από τους βασικότερους λόγους για τους οποίους ένα αεροσκάφος αποκλίνει από την πορεία που ορίζει το σχέδιο πτήσης.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι η ακολουθούμενη εναέρια πορεία ενός αεροσκάφους αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα, καθώς εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, εκ των οποίων κάποιες είναι μεταβαλλόμενες. Ο προσδιορισμός ενός μέσου προφίλ πτήσης, δηλαδή μιας μέσης εναέριας τροχιάς για ένα αεροσκάφος η οποία να είναι αντιπροσωπευτική των πραγματοποιούμενων πτήσεων μπορεί να **παρέχει με άμεσο τρόπο πληροφορίες** για τη διάρκεια πτήσης, το υψόμετρο πλεύσης και τους ρυθμούς ανόδου και καθόδου του αεροσκάφους, αλλά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό του μέσου ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται να υπολογιστεί η **μέση τροχιά ανά τύπο αεροσκάφους και ανά εύρος απόστασης** και να εξαχθούν **συμπεράσματα** με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Επίσης, η εργασία αυτή αποτελεί το πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό της μέσης κατανάλωσης και της εκπομπής ρύπων για τα ευρέως χρησιμοποιούμενα αεροσκάφη, το οποίο αποτελεί αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα.

Αρχικά παρουσιάζονται κάποιες απαραίτητες γενικές έννοιες και στη συνέχεια εξετάζονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι εξαγωγής της μέσης τροχιάς. Από αυτές επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η τρίτη ˙**στατιστική επεξεργασία ύστερα από ευθυγράμμιση των δεδομένων**. Περιγράφονται οι διαδικασίες συλλογής, καταγραφής και επεξεργασίας των δεδομένων, οι οποίες οδηγούν στην εξαγωγή των μέσων τροχιών των αεροσκαφών. Τέλος, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την εναέρια πορεία του αεροσκάφους

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στους παράγοντες που επηρεάζουν την εναέρια πορεία του αεροσκάφους. Αρχικά,πρέπει να τονιστεί ότι η πορεία που ακολουθεί ένα αεροσκάφος ανάμεσα στο σημείο αναχώρησης και στο σημείο άφιξης, δεν είναι η ευθεία μεταξύ των δύο αυτών σημείων, η οποία είναι η συντομότερη διαδρομή, αλλα μια καμπύλη γραμμή μεταξύ των σημείων αυτών, όπως εξηγείται και ακολούθως.

Μήκος πτήσης και τύπος αεροσκάφους

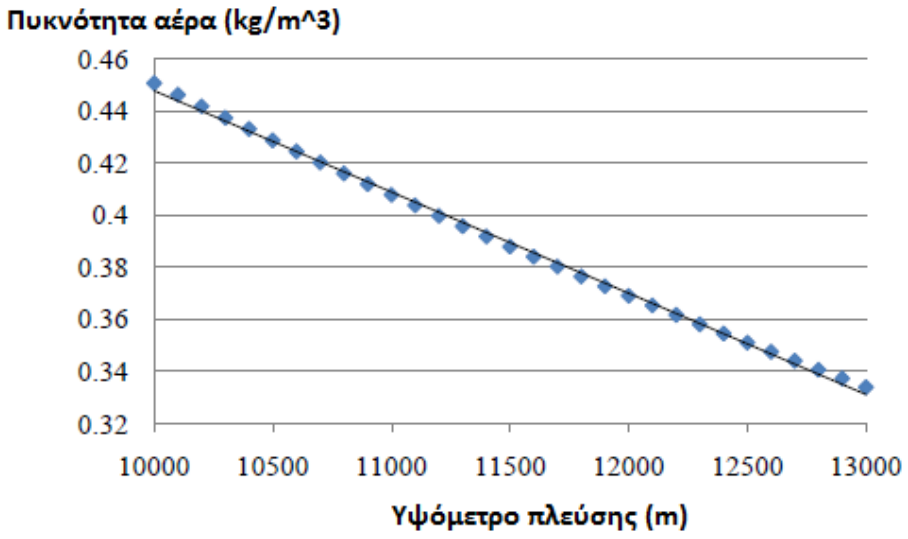
Το μήκος της απόστασης της πραγματοποιούμενης πτήσης καθορίζει τον τύπο αεροσκάφους που θα χρησιμοποιηθεί. Γενικά, τα μεγάλα αεροσκάφη, διαθέτοντας μεγαλύτερη χωρητικότητα καυσίμου, χρησιμοποιούνται για πτήσεις μεγάλου μήκους που απαιτούν κατανάλωση μεγάλης ποσότητας καυσίμου και τα μικρότερα αεροσκάφη προσφέρονται για μικρότερες αποστάσεις. Όμως, αν κάποιο δρομολόγιο είναι μεσαίας απόστασης αλλά παρουσιάζει αυξημένη ζήτηση, μπορεί να πραγματοποιηθεί και από μεγάλου μεγέθους αεροσκάφος. Η επιλογή τύπου αεροσκάφους είναι μεγάλη σημασίας, καθώς, όπως παρουσιάστηκε και στην ενότητα 2.2, διαφορετικοί τύποι αεροσκαφών έχουν και διαφορετικές δυνατότητες και χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, ένα Airbus A319 έχει τη δυνατότητα πτήσης σε μεγαλύτερο υψόμετρο από ότι ένα Boeing 717-200. Φυσικά, υπάρχουν και διαφοροποιήσεις στην κατανάλωση καυσίμου ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών. Κατά συνέπεια, ανάλογα με το μήκος της απόστασης της πραγματοποιούμενης πτήσης διαφοροποιείται και η ακολουθούμενη εναέρια πορεία του αεροσκάφους.

Κόστος: κατανάλωση καυσίμου και διάρκεια πτήσης

Είναι προφανές ότι οι αεροπορικές εταιρείες επιζητούν χαμηλή κατανάλωση προκειμένου να μειώσουν το λειτουργικό κόστος. Το κόστος του καυσίμου αποτελεί το 30% του συνολικού λειτουργικού κόστους *(Merle, 2011),* επομένως γίνεται κατανοητό ότι μια μείωση στο ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου επιδρά άμεσα και στη μείωση του συνολικού κόστους. Για αυτό το λόγο, η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης είναι ένας από τους βασικούς άξονες γύρω από τους οποίους γίνεται ο σχεδιασμός της πτήσης. Ο μέγιστος ρυθμός κατανάλωσης εντοπίζεται στη φάση της απογείωσης και στη φάση της ανόδου. Παρόλα αυτά, το αν η μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου θα απαιτηθεί κατά τη διάρκεια της φάσης ανόδου ή της φάσης πλεύσης εξαρτάται από το αν πρόκειται για πτήση μικρής, μεσαίας ή μεγάλης απόστασης. Αυτό διότι στις πτήσεις μικρής απόστασης η φάση πλεύσης μπορεί να αποτελεί ένα μικρό χρονικό τμήμα της

συνολικής διάρκειας και να μην απαιτείται μεγάλη ποσότητα καυσίμου κατά τη διάρκειά της. Αντίθετα, για πτήσεις μεσαίων και μεγάλων αποστάσεων η φάση πλεύσης αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της πτήσης και κατά συνέπεια κατά τη φάση αυτή απαιτείται η μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμων.

Επιζητείται να γίνει βελτιστοποίηση του υψομέτρου κατά τη διάρκεια της φάσης πλεύσης. Όσο το υψόμετρο αυξάνεται, η πυκνότητα του αέρα μειώνεται *(Lovegren, 2011).* Η δύναμη του βάρους του αεροσκάφους είναι ανάλογη της πυκνότητας του αέρα *(Merle, 2011).* Επομένως, το βάρος του αεροσκάφους μειώνεται όταν το υψόμετρο αυξάνεται και απαιτείται μικρότερη δύναμη ανύψωσης (Lift force). Ως απόρροια των παραπάνω, έχουμε ότι ένα αεροσκάφος παρουσιάζει μικρότερο ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας σε μεγάλο υψόμετρο, από ό,τι σε μικρό.



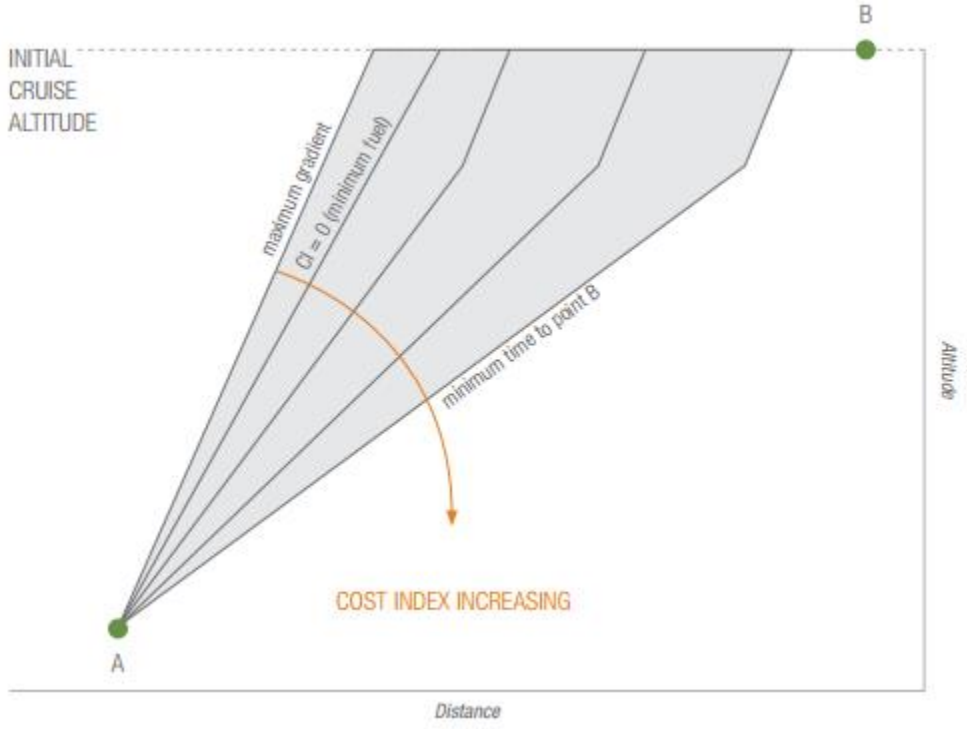
Διάγραμμα 2.1: Πυκνότητα αέρα συναρτήσει του υψομέτρου (Merle, 2011)

Όμως, ο σχεδιασμός μιας πτήσης με μοναδικό γνώμονα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου δεν είναι βέβαιο ότι θα αποφέρει κέρδος στην εκάστοτε αεροπορική εταιρεία, καθώς η πιο οικονομική πορεία συχνά οδηγεί σε μια σημαντικά αυξημένη διάρκεια πτήσης, γεγονός το οποίο επίσης δημιουργεί ζημία, καθώς για μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης, αυξάνονται αντίστοιχα και οι ώρες εργασίας των εργαζομένων. Επιπλέον, εάν μια εταιρεία προσφέρει σε συστηματική βάση πτήσεις εμφανώς μεγαλύτερης διάρκειας από τις αντίστοιχες των ανταγωνιστριών εταιρειών, αυτό θα αποτρέψει τους πελάτες από το να την επιλέξουν, άρα θα έχει μειωμένη ζήτηση. Οι αεροπορικές εταιρείες καλούνται να ισορροπήσουν ανάμεσα στη χαμηλή κατανάλωση καυσίμου και σε έναν επιθυμητό χρόνο πτήσης. Για παράδειγμα, η εταιρεία Boeing, αλλά και άλλες εταιρείες, χρησιμοποιεί το δείκτη κόστους (Cost Index). Ο δείκτης κόστους είναι μια συνάρτηση κόστους καυσίμου και κόστους χρόνου και στοχεύει στο να

βοηθήσει την εταιρεία να ελαχιστοποιήσει το λειτουργικό κόστος. Ο δείκτης κόστους (CI) είναι ο λόγος του κόστους που σχετίζεται με τη χρονική διάρκεια της πτήσης και του κόστους καυσίμου.

$$\mathrm{CI} = \frac{time\ cost\ \$/hr}{fuel\ cost\ cents/lb}$$

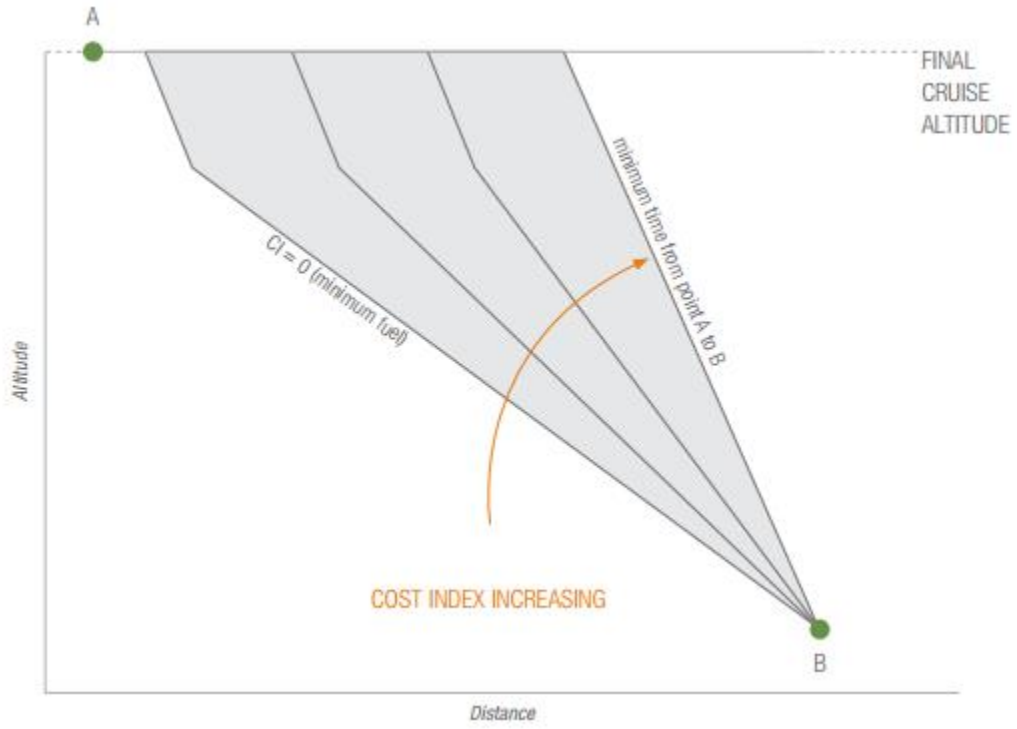
Ο δείκτης κόστους εισάγεται στον Υπολογιστή Διαχείρισης Πτήσης (Flight Management Computer), και αυτός χρησιμοποιεί το δείκτη και άλλες παραμέτρους για να υπολογίσει οικονομική άνοδο, πλεύση και κάθοδο για το αεροσκάφος. Για όλους τους τύπους αεροσκαφών, αν ο δείκτης κόστους που επιλεγεί είναι ίσος με μηδέν, έχουμε την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση, έχοντας όμως αγνοήσει τον παράγοντα του χρόνου. Αντιθέτως, αν ο δείκτης κόστους είναι μέγιστος, ο χρόνος της πτήσης ελαχιστοποιείται, το αεροσκάφος έχει τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα, αλλά αγνοείται η κατανάλωση καυσίμου. Στην πράξη, οι ακραίες τιμές του δείκτη CI δεν χρησιμοποιούνται *(Merle, 2011)*. Στις ακόλουθες εικόνες φαίνεται η επίδραση της επιλογής τιμής δείκτη κόστους στην πραγματοποιούμενη πορεία του αεροσκάφους κατά την άνοδο και την κάθοδο.



Εικόνα 2.1: Η επίδραση του δείκτη κόστους κατά την άνοδο (http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_02_10/pdfs/AERO_FuelConsSeries.pdf)

Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει το υψόμετρο (altitude), ενώ ο οριζόντιος τη διανυόμενη απόσταση. Κατά την άνοδο, η πιο απότομη κλίση αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή του

δείκτη κόστους και κατά συνέπεια σε ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου, ενώ η λιγότερο απότομη αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του δείκτη κόστους και στον ελάχιστο χρόνο μεταξύ των σημείων Α και Β. Κατά την κάθοδο, ισχύει το αντίθετο, δηλαδή η πιο απότομη κλίση εκφράζει τη μέγιστη τιμή του δείκτη κόστους και τον ελάχιστο χρόνο μεταξύ των σημείων Α και Β, ενώ η ηπιότερη κλίση όλων εκφράζει τη μηδενική τιμή του δείκτη κόστους καιτην ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου. Τα στοιχεία αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι για να μετριάζεται η κατανάλωση καυσίμου είναι συμφέρον η κλίση κατά την άνοδο να είναι απότομη, ενώ κατά την κάθοδο ήπια.

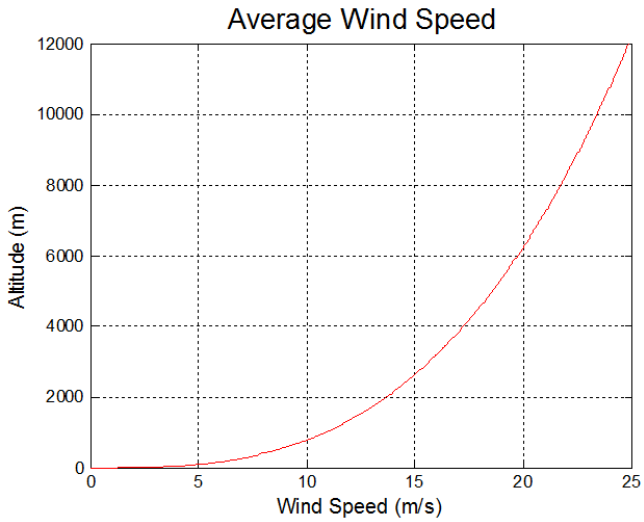


Εικόνα 2.2: Η επίδραση του δείκτη κόστους κατά την κάθοδο (http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_02_10/pdfs/AERO_FuelConsSeries.pdf)

<u>Καιρικές συνθήκες</u>

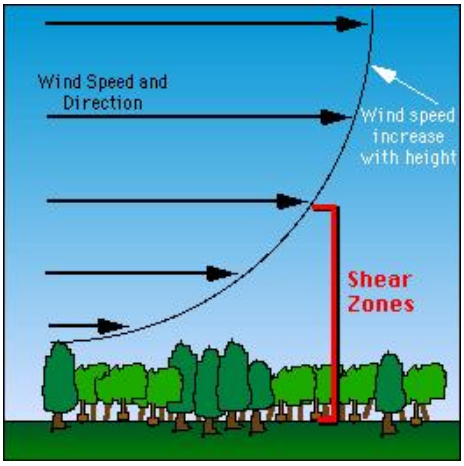
Η εναέρια πορεία του αεροσκάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Η εκτίμηση της θερμοκρασίας του αέρα και των ανέμων που πνέουν, καθώς και η πρόβλεψη ακραίων καιρικών φαινομένων όπως καταιγίδων και τυφώνων είναι μεγάλης σημασίας για την οικονομία και την ασφάλειά μιας πτήσης. Παρόλα αυτά, συχνά οι προβλέψεις αυτές δεν είναι ακριβείς κι έτσι το αεροσκάφος αναγκάζεται να αποκλίνει από την πορεία που ορίζει το αρχικό σχέδιο πτήσης.

Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του υψομέτρου, όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.2: Ταχύτητα ανέμου συναρτήσει του υψομέτρου (http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/gerrard1/images/f2big.png)

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό θα περίμενε κανείς ότι σε όσο μεγαλύτερο υψόμετρο βρίσκεται ένα αεροσκάφος, τόσο πιο ασταθής είναι η πορεία του, λόγω των ισχυρότερων ανέμων. Το γεγονός αυτό όμως, όχι μόνο δεν ισχύει, αλλά συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Στα πιο **χαμηλά υψόμετρα** παρατηρείται το φαινόμενο των **διατμητικών ανέμων** (**wind shear effect**), δηλαδή της επιβολής διατμητικών τάσεων στο αεροσκάφος από τους πνέοντες ανέμους. Αυτό συμβαίνει διότι το μέτρο ή/και το μέγεθος της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται πιο απότομα σε χαμηλό υψόμετρο, όπως μπορεί να δει κανείς στην παρακάτω εικόνα. Άρα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.2 που έχει βαθμονομημένους άξονες, η ζώνες διάτμησης του ανέμου εμφανίζονται κυρίως έως το υψόμετρο των 6 χιλιομέτρων, που αντιστοιχεί σε 20000 πόδια.



Εικόνα 2.3: Διάτμηση του ανέμου και υψόμετρο (https://www.shodor.org/os411/courses/411c/module06/unit02/page05.html)

Επιπροσθέτως, η ύπαρξη διατμητικών ανέμων σε χαμηλό υψομετρο επηρεάζεται και από τους ακόλουθους παράγοντες.

- Τα ακραία σημεία κρύων μαζών αέρα που προσφάτως έχουν αποκολληθεί από κάποια καταιγίδα (gust fronts)
- Κύματα αέρα τα οποία προκαλούνται από τη θαλάσσια αύρα (sea-breezes)
- Την ύπαρξη ορεινού αναγλύφου. Η πτήση κοντά σε ορεινούς όγκους διαταράσσεται από ανέμους που αλλάζουν κατεύθυνση.

Γι' αυτό το λόγο, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια, οι πτήσεις σε χαμηλότερο υψόμετρο παρουσιάζουν συχνά εμφανείς ανωμαλίες στην πορεία τους.

Έλεγχος Εναέριας Κυκλοφορίας (Air Traffic Control

Οι επιταγές του Κέντρου Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας έχουν ως βασικό στόχο να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος σύγκρουσης μεταξύ αεροσκαφών. Κατά συνέπεια, το αεροσκάφος πρέπει να ακολουθήσει συγκεκριμένη πορεία εντός ενός ελεγχόμενου εναέριου χώρου. Στον εανέριο αυτό χώρο υπάρχουν καθορισμένα «μονοπάτια» στα οποία κινούνται τα αεροσκάφη και ονομάζονται αεροδιάδρομοι. Κατά τη διάρκεια της πτήσης ο κυβερνήτης του αεροσκάφους βρίσκεται σε επικοινωνία με το Κέντρο Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας και ακολουθει τις οδηγίες που δέχεται από αυτό. Συμβαίνει συχνά το αεροσκάφος να αποκλίνει από τη σχεδιασμένη πορεία, πάντοτε αφότου προηγηθεί συνεννόηση με το Κέντρο Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας, είτε λόγω εκτάκτων συνθηκών είτε λόγω ύπαρξης δυνατότητας να ακολουθηθεί μια συντομότερη διαδρομή.

Άλλοι περιορισμοί

Τέλος, κάθε πτήση πρέπει υποχρεωτικά να συμβαδίζει με τους κανονισμούς του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO), οι οποίοι θέτουν όρια για τη μέγιστη κλίση κατά την απογείωση και την προσγείωση του αεροσκάφους, προκειμένου να διατηρούνται ανεκτές συνθήκες για τους επιβάτες.

Από τους παραπάνω παράγοντες, αυτοί που μπορούν να αναλυθούν πλήρως είναι το μήκος της πτήσης και ο τύπος αεροσκάφους, κατηγοριοποιώντας τις πτήσεις ανά ταύπο αεροσκάφους και ανά εύρος απόστασης. Είναι δυνατό να διερευνηθεί εμμέσως το πώς εφαρμόζονται οι στρατηγικές των αεροπορικών εταιρειών για μείωση του λειτουργικού κόστους, ενώ οι καιρικές συνθήκες και οι μη προγραμματισμένες οδηγίες από το Κέντρο Ελέγχου Διαχείρισης Εναέριας Κυκλοφορίας δεν είναι δυνατόν να εξεταστούν. Όμως, συχνά η επιρροή των δύο αυτών

παραγόντων μπορεί να επηρεάσει με καταλυτικό τρόπο την εναέρια πορεία του αεροσκάφους, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

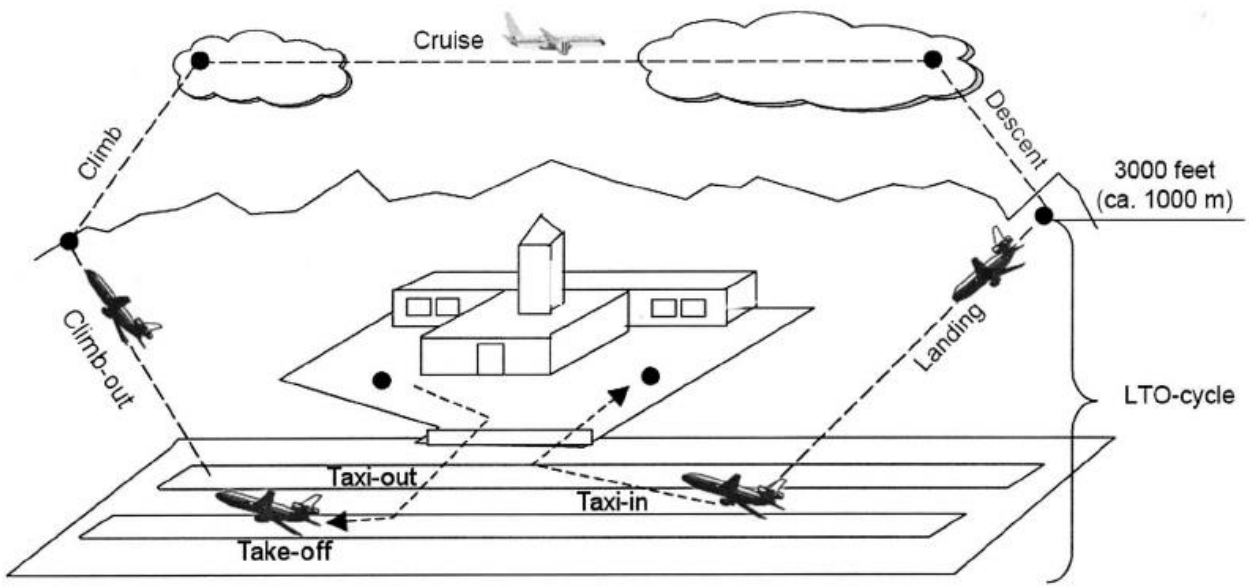
2.2 Οι φάσεις της πτήσης

Προτού προχωρήσουμε, είναι απαραίτητο να εξηγηθούν πρώτα κάποιες βασικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η κάθε πτήση ακολουθεί τις παρακάτω φάσεις, σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (**I**nternational **C**ivil **A**viation **O**rganization).

Συγκεκριμένα, οι φάσεις πτήσεις χωρίζονται σε:

Απογείωση (Take-off)	0-3000 ft
Άνοδος (Climb)	>3000 ft
Φάση πτήσης (Cruise ή En route)	Υψόμετρο πτήσης (Flight altitude)
Κάθοδος (Descent)	>3000 ft
Προσγείωση (Landing)	3000-0 ft

Πίνακας 2.1: Οι φάσεις της πτήσης (http://dev.ulb.ac.be/ceese/ABC_Impacts/glossary/lto.php)



Εικόνα 2.4: Οι φάσεις της πτήσης (http://dev.ulb.ac.be/ceese/ABC_Impacts/glossary/images_glossary/flight.png)

Δηλαδή, έως το ύψος των 3000 ποδιών, έχουμε την φάση απογείωσης, ενώ από τα 3000 πόδια και έπειτα και έως το αεροσκάφος να φτάσει το επιλεγμένο ύψος πτήσης, έχουμε την φάση ανόδου. Για όσο διάστημα το υψόμετρο πτήσης παραμένει σταθερό ή παρουσιάζει μικρές μόνο διακυμάνσεις, θεωρείται η φάση πτήσης. Καθώς πλησιάζει στον προορισμό, το αεροσκάφος ξεκινά να κατεβαίνει σε ύψος. Από το σημείο που ξεκινάει αυτή η κατάβαση έως και το ύψος των 3000 ποδιών ορίζεται η φάση καθόδου. Τέλος, από τα 3000 έως τα 0 πόδια, έχουμε την φάση της προσγείωσης.

Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποιες πληροφορίες για την καθεμιά από τις παραπάνω φάσεις

Απογείωση (Take-off)

Η απογείωση είναι η φάση της πτήσης κατά την οποία το αεροσκάφος μεταβαίνει από την κίνηση στο έδαφος, σε εναέρια πτήση, χρησιμοποιώντας το διάδρομο απογείωσης. Συνήθως ο μηχανές λειτουργούν στη μέγιστη ισχύ τους κατά την απογείωση. Όταν το αεροσκάφος πάρει θέση στο διάδρομο απογείωσης και πριν απογειωθεί, γίνεται έλεγχος για πιθανή μηχανική βλάβη. Το κυβερνητικό πλήρωμα λειτουργεί τις μηχανές σε μεγάλη ισχύ προκειμένου να εξακριβώσει ότι δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα. Αυτός ο έλεγχος είναι μια αρκετά θορυβώδης διαδικασία. Όταν ο πιλότος ελευθερώσει την πέδηση, το αεροσκάφος ξεκινάει να επιταχύνει ώσπου να φτάσει την απαιτούμενη για απογείωση ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή είναι συνάρτηση της πυκνότητας του αέρα, καθώς και του βάρους του αεροσκάφους και των χαρακτηριστικών του. Για τη διαδικασία της απογείωσης, έχουν οριστεί οι έννοιες των ταχυτήτων απογείωσης V_1 και V_2. Οι τα χύτητες αυτές εξαρτώνται από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν, αλλά και από το μήκος και την κλίση του διαδρόμου. Για ταχύτητες μικρότερες της V_1. Η απογείωση πρέπει να ματαιώνεται. Για τιμές ταχύτητας μεγαλύτερες της V_1 αλλά μικρότερες της V_2 η οποία θεωρείται η ασφαλής ταχύτητα απογείωσης, το αεροσκάφος απογειώνεται και αμέσως επιστρέφει για προσγείωση. Οι τυπικές ταχύτητες απογείωσης για αεριωθούμενα αεροσκάφη (jetliners) κυμαίνονται ανάμεσα στα 240 με 285 χιλιόμετρα την ώρα. Μετά την απογείωση, και κατά τη μετάβαση στη φάση ανόδου (σε ύψος 3000 ποδιών), οι τροχοί του αεροσκάφους αποσύρονται εντός του σώματος.

Άνοδος (climb)

Μετά την απογείωση το αεροσκάφος [ρέπει να αναρριχηθεί σε ένα συγκεκριμένο υψόμετρο, στο οποίο θα μπορεί να πλεύσει με ασφαλή και οικονομικό τρόπο. Το υψόμετρο πλεύσης διαφέρει ανάλογα με το μήκος ταξιδίου και τον τύπο αεροσκάφους και ορίζεται κατά το σχεδιασμό της εκάστοτε πτήσης. Μπορεί να κυμαίνεται από τα 10000 πόδια έως και τα 40000 πόδια. Κατά την άνοδο, η δύναμη έλξης υπερνικά το βάρος του αεροσκάφους κι έτσι αυτό αυξάνει το υψόμετρό του. Η αύξηση της δύναμης έλξης μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας τη γωνία προσβολής των φτερών, τη δύναμη έλξης των μηχανών, την επιφάνεια των φτερών, ή με κάποιο συνδυασμό των παραπάνω.

Φάση πλεύσης (cruise)

Κατά τη φάση πλεύσης, υπό κανονικές συνθήκες, το αεροσκάφος διατηρεί σχετικά σταθερό το υψόμετρο και την ταχύτητά του και αποκτά κατεύθυνση προς τον προορισμό του. Η ταχύτητα πλεύσης διαφέρει αναλόγως τον τύπο αεροσκάφους, το υψόμετρο και το εκάστοτε σχέδιο πτήσης, αλλά μια συνήθης τιμή για πτήσεις μεγάλων αποστάσεων είναι τα 900 χιλιόμετρα την ώρα. Όπως και στις υπόλοιπες φάσεις της πτήσης, κατά την πλεύση, το κυβερνητικό πλήρωμα βρίσκεται σε επικοινωνία με το Κέντρο Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας (Air Traffic Control). Δεν είναι σπάνιο να υπάρχουν αποκλίσεις στην πορεία του αεροσκάφους από το σχέδιο πτήσης, για λόγους καιρικών συνθηκών, αναταράξεων ή λόγους Διαχείρισης Εναέριας Κυκλοφορίας, πάντα ύστερα από επικοινωνία και το Κέντρο Ελέγχου. Η φάση πλεύσης διαρκεί ώσπου το αεροσκάφος να πλησιάσει αρκετά τον προορισμό του και να μεταβεί στη φάση καθόδου και έπειτα σε αυτή της προσγείωσης.

Κάθοδος (descent)

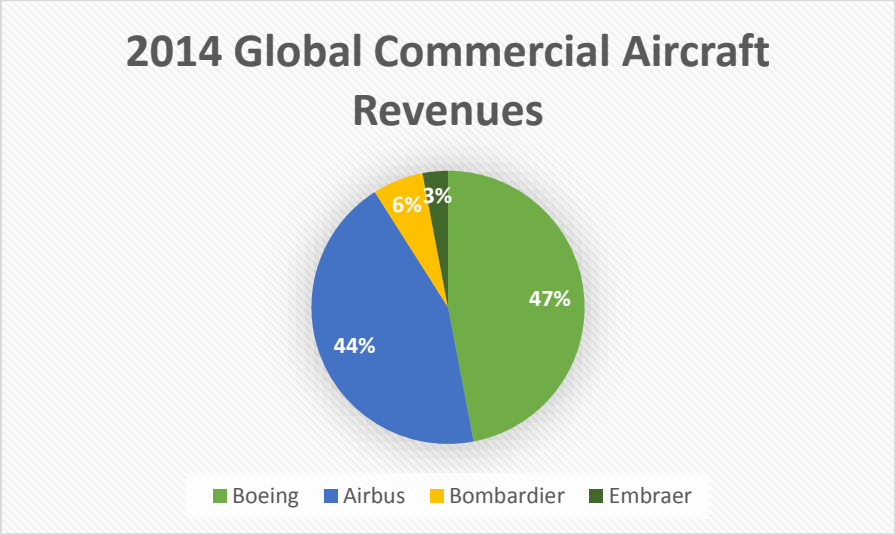
Κατά τη φάση καθόδου το υψόμετρο του αεροσκάφους μειώνεται. Συνήθως η κάθοδος πραγματοποιείται υπό σταθερή γωνία κλίσης. Ο πιλότος ελέγχει τη γωνία κλίσης αλλάζοντας την ισχύ της μηχανής και τη γωνία του μπροστινού άκρου του αεροσκάφους, για να κρατήσει σταθερή την ταχύτητα. Κατά την έναρξη και κατά τη διάρκεια της καθόδου φάσης, ο θόρυβος του κινητήρα μειώνεται καθώς οι κινητήρες λειτουργούν σε χαμηλή ισχύ. Στα 3000 πόδια, το αεροσκάφος μεταβαίνει στη φάση προσγείωσης.

Προσγείωση (Landing)

Η προσγείωση είναι η τελευταία φάση της πτήσης, κατά την οποία το αεροσκάφος επιστρέφει στο έδαφος, χρησιμοποιώντας το διάδρομο του αεροδρομίου προορισμού. Η προσέγγιση μπορεί να είναι είτε ανόργανη, δηλαδή ο πιλότος να προσεγγίσει οπτικά το διάδρομο, είτε ενόργανη. Το σύστημα ενόργανης προσγείωσης (Instrument Landing System-ILS) είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο όταν επικρατούν συνθήκες περιορισμένης ορατότητας. Το ILS παρέχει στον κυβερνήτη του αεροσκάφους που προσγειώνεται μια ευθεία διαδρομή την οποία μπορεί να ακολουθήσει κατά την τελική προσέγγιση προς το διάδρομο. Υπάρχουν επίσης και τα Μικροκυματικά Συστήματα Προσγείωσης (Microwave Landing Systems-MLS) τα οποία προσφέρουν πιο ολοκλρωμένη καθοδήγηση στον κυβερνήτη κατά την προσγείωση. Καθώς το αεροσκάφος προσεγγίζει το έδαφος, η ταχύτητα και ο ρυθμός καθόδου μειώνονται προκειμένου οι τροχοί να αγγίξουν ομαλά το διάδρομο. Τα πτερύγια των φτερών χρησιμοποιούνται ώστε η αντίσταση του αέρα να λειτουργήσει ευνοϊκά για την επιβράδυνση του αεροσκάφους και σε συνδυασμό με την πέδηση, επιτυγχάνεται ακινητοποίηση του αεροσκάφους.

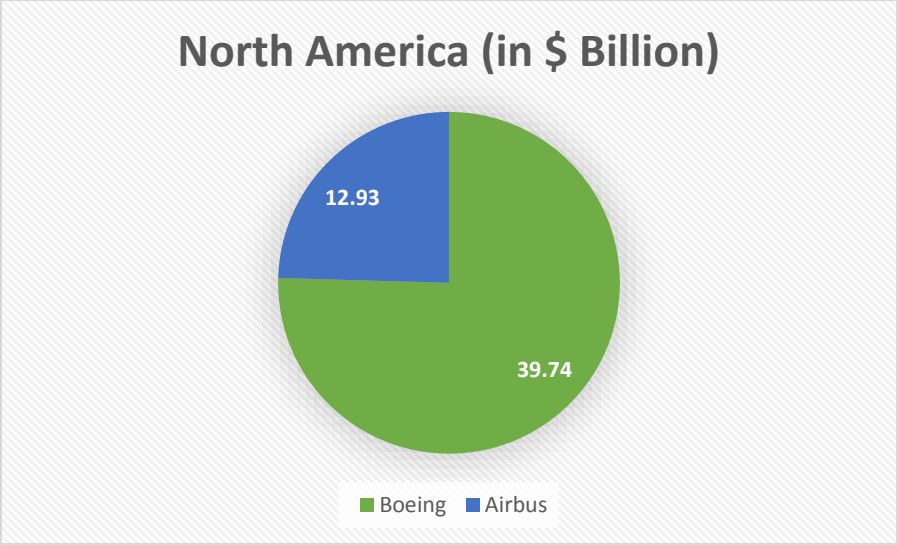
2.3 Εξεταζόμενοι τύποι αεροσκαφών

Εν συνεχεία παρουσιάζονται συνοπτικά οι τύποι αεροσκαφών, πτήσεις των οποίων εξετάστηκαν. Οι τύποι αεροσκαφών που επιλέχθηκαν είναι οι πιο δημοφιλείς, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να αντικατοπτρίζουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της αγοράς. Μελετήθηκαν αεροσκάφη Airbus και Boeing, ο οποίες είναι οι κυρίαρχες κατασκευάστριες εταιρείες παγκοσμίως, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν.

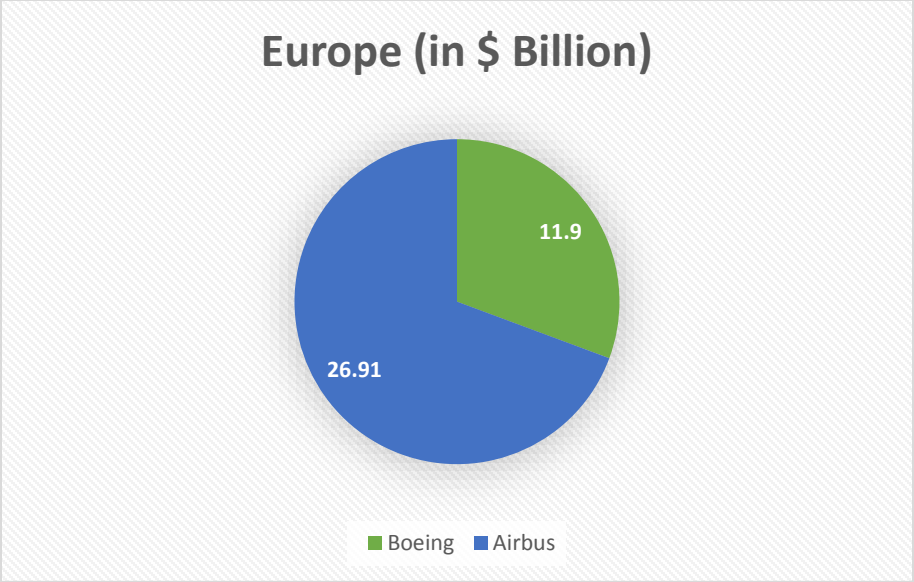


Διάγραμμα 2.3: Μερίδιο κέρδους από την πώληση εμπορικών αεροσκαφών στην παγκόσμια αγορά για το 2014 (http://bidnessetcnews.tumblr.com/post/130827205611/airbus-vs-boeing-which-stocks-gaining-altitude)

Παρατηρούμε στο διάγραμμα 2.1 ότι Airbus και Boeing κατείχαν το 2014 μερίδιο κέρδους ύψους 91% στην παγκόσμια αγορά από την πώληση εμπορικών αεροσκαφών. Στα διαγράμματα 2.2 και 2.3 βλέπουμε ότι στην Ευρώπη η Airbus επικρατεί ολοφάνερα της Boeing, ενώ στη Βόρειο Αμερική η εικόνα αντιστρέφεται. Όπως εξηγείται και στη συνέχεια, για την παρούσα εργασία συλλέχθηκαν αποκλειστικά στοιχεία πτήσεων για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, επομένως μελετήθηκαν περισσότερα αεροσκάφη Boeing από ό,τι Airbus.



Διάγραμμα 2.4: Μερίδιο κέρδους από την πώληση εμπορικών αεροσκαφών στην αγορά της Βορείου Αμερικής για το 2014 (http://bidnessetcnews.tumblr.com/post/130827205611/airbus-vs-boeing-which-stocks-gaining-altitude)



Διάγραμμα 2.5: Μερίδιο κέρδους από την πώληση εμπορικών αεροσκαφών στην αγορά της Ευρώπης για το 2014 (http://bidnessetcnews.tumblr.com/post/130827205611/airbus-vs-boeing-which-stocks-gaining-altitude)

Αεροσκάφη Airbus

	Airbus A319	Airbus A321
Μήκος	33.84 m	44.50 m
Άνοιγμα φτερών	35.80 m	34.10 m
Ύψος	11.76 m	11.80 m
Επιφάνεια φτερών	122.4 m²	122.4 m²
Αριθμός επιβατών	124-150	185-220
Πλάτος καμπίνας	3.70 m	3.70 m
Μέγιστο βάρος απογείωσης	64,000-75,500 kg	83,000-93,500 kg
Μέγιστο βάρος προσγείωσης	61,000-62,500 kg	73,500-77,800 kg
Βάρος χωρίς φορτίο	40,300 kg	48,100 kg
Χωρητικότητα καυσίμου	23,860-29,840 lt	23,700-29,680 lt
Εύρος απόστασης	4,700-6,800 km	5,000-5,500 km
Ταχύτητα πλεύσης	820 km/h	840 km/h
Μέγιστη ταχύτητα	890 km/h	890 km/h
Μέγιστο υψόμετρο πτήσης	11,900 m (40,000 ft)	11,900 m (40,000 ft)

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά αεροσκαφών Airbus

Εικόνα 2.5: Airbus A319 (http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/)

Τα αεροσκάφη A319 και A321 ανήκουν στην οικογένεια A320 της Airbus. Είναι επιβατικά αεροσκάφη στενής ατράκτου, τζετ με δύο κινητήρες (twin-engine jet). Η οικογένεια A320 είναι διαθέσιμη στην αγορά από το 1984 και ως τις 31 Ιανουαρίου του 2016 είχαν πωληθεί συνολικά 6,892 αεροσκάφη, από τα οποία τα 6,951 ήταν ακόμη σε υπηρεσία. Πρόκειται για ιδιαίτερα δημοφιλή οικογένεια αεροσκαφών, με μοντέλα που ανταγωνίζονται τα Boeing 737, καθώς και τα Boeing 752, αεροσκάφη τα οποία επίσης εξετάζονται. Η αεροπορική

εταιρεία American Airlines, στοιχεία πτήσεων της οποίας χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς στην παρούσα εργασία, την 31η Ιανουαρίου 2016 ήταν η εταιρεία με τα περισσότερα αεροσκάφη της οικογένειας A320, λειτουργώντας συνολικά 361 αεροσκάφη. Το πρώτο αεροσκάφος της οικογένειας ήταν το ομώνυμο A320. Το A321 προέκυψε προσπαθώντας να διευρυνθεί το αρχικό A320, έχοντας αυξημένη επιφάνεια φτερών, αυξημένο μήκος και μεγαλύτερη χωρητικότητα καυσίμου. Αντιθέτως, το A319 αποτελεί μια συρρικνωμένη έκδοση του A320 που στόχο είχε την ανταγωνιστικότητα με το αντίστοιχης κατηγορίας αεροσκάφος Boeing 737. Πράγματι, από τη διαδικασία συλλογής στοιχείων για τις ανάγκες της εργασίας, έγινε φανερό ότι τα δύο ανταγωνιζόμενα μοντέλα αεροσκαφών πραγματοποιούσαν παρόμοιου εύρους πτήσεις˙ ξεκινώντας από τα 200 μίλια περίπου και φτάνοντας έως και τα 2500. Τα αεροσκάφη της Airbus κατασκευάζονται στην Τουλούζ της Γαλλίας και στο Αμβούργο της Γερμανίας. Η οικογένεια A320 είναι η πιο δημοφιλής της εταιρείας Airbus και τα αεροσκάφη που την αποτελούν είναι πρώτα σε πωλήσεις παγκοσμίως.

Εικόνα 2.6: Airbus A321 (http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/)

Αεροσκάφη Boeing

	Boeing 737-700	Boeing 737-300	Boeing 717-200
Μήκος	33.60 m	33.40 m	37.80 m
Άνοιγμα φτερών	34.30 m	28.90 m	28.50 m
Ύψος	12.50 m	11.10 m	8.90 m
Επιφάνεια φτερών	125 m²	105.40 m²	93.00 m²
Αριθμός επιβατών	146-171	128-149	106
Πλάτος καμπίνας	3.54 m	3.53 m	3.33 m
Μέγιστο βάρος απογείωσης	60,330-70,000 kg	56,450-63,300 kg	49,900 kg
Μέγιστο βάρος προσγείωσης	58,060 kg	51,700-52,550 kg	45,400 kg
Βάρος χωρίς φορτίο	38,140 kg	32,820 kg	30,600 kg
Χωρητικότητα καυσίμου	26,020 lt	23,830 lt	13,900 lt
Εύρος απόστασης	6,040 km	2,300-2,900 km	2,600 km
Ταχύτητα πλεύσης	850 km/h	795 km/h	811 km/h
Μέγιστο υψόμετρο πτήσης	12,500 m (41,000 ft)	11,300 m (37,000 ft)	11,300 m (37,000 ft)

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά αεροσκαφών Boeing 737-700, Boeing 737-300, Boeing 717-200

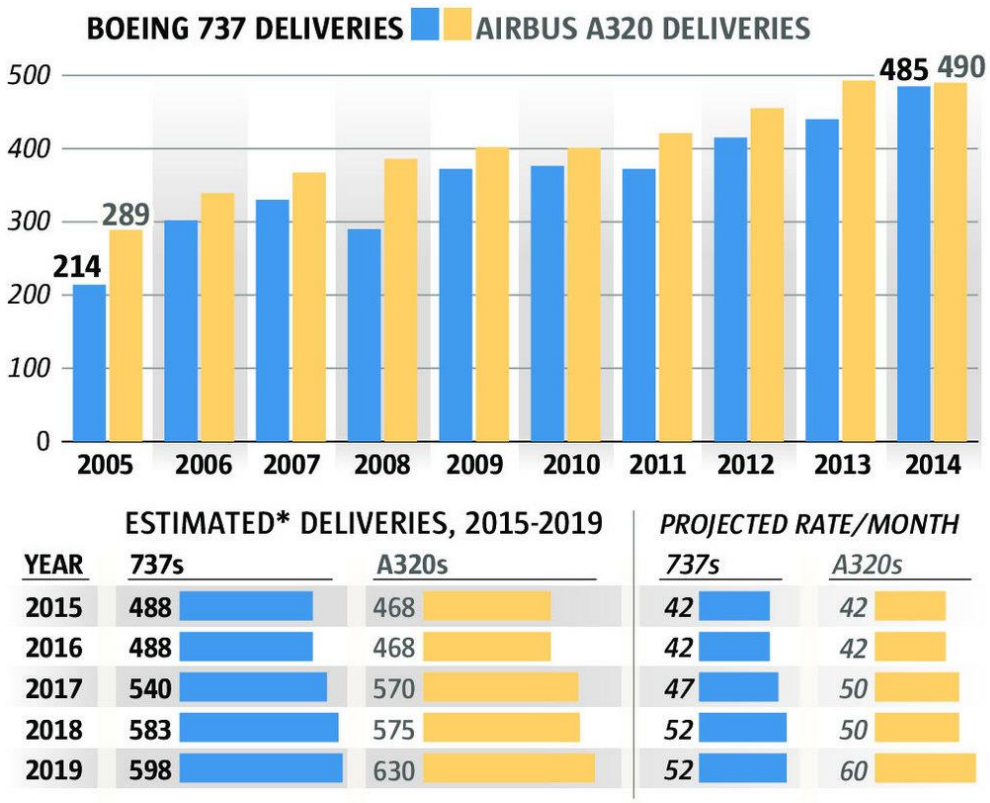
	Boeing 757-200	Boeing 767-300	Boeing 777-200
Μήκος	47.3 m	54.9 m	63.7 m
Άνοιγμα φτερών	38.0 m	47.6 m	64.8 m
Ύψος	13.6 m	15.8 m	18.6 m
Επιφάνεια φτερών	185.2 m²	283.30 m²	436.8 m²
Αριθμός επιβατών	224	328	440
Πλάτος καμπίνας	3.54 m	4.72 m	5.87 m
Μέγιστο βάρος απογείωσης	98,880 kg	158,760 kg	322,050 kg
Μέγιστο βάρος προσγείωσης	89,900 kg	136,080 kg	220,900 kg
Βάρος χωρίς φορτίο	58,390 kg	86,070 kg	155,580 kg
Χωρητικότητα καυσίμου	43,490 lt	63,200 lt	202,500 lt
Εύρος απόστασης	5,500 km	9,700 km	15,040 km
Ταχύτητα πλεύσης	850 km/h	910 km/h	905 km/h
Μέγιστο υψόμετρο πτήσης	12,800 m(42,000 ft)	13,100 m (43,000 ft)	13,100 m (43,000 ft)

Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά αεροσκαφών Boeing 757-200, Boeing 767-300, Boeing 777-200

Τα αεροσκάφη Boeing κατασκευάζονται στην πόλη Ρέντον που βρίσκεται κοντά στο Σιάτλ, στην πολιτεία Ουάσιγκτον των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Επειδή τα αεροσκάφη της Boeing κατασκευάζονται στις ΗΠΑ, σε αντίθεση με τα ευρωπαϊκά Airbus, συχνά προτιμώνται από τις αμερικανικές αεροπορικές εταιρείες. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία πτήσεων αποκλειστικά από τις ΗΠΑ, κατά συνέπεια η παρουσία των αεροσκαφών Boeing υπήρξε ισχυρότερη εκείνης των Airbus. Παρόλα αυτά αξίζει να αναφερθεί ότι από το 2011 και έπειτα η Airbus έχει αρχίζει να κερδίζει έδαφος στις πωλήσεις αεροσκαφών τόσο στην παγκόσμια αγορά, όσο και στις ΗΠΑ.

Εικόνα 2.7: Boeing 737-700 (http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/)

Το Boeing 737 είναι από τα δημοφιλέστερα επιβατικά αεροσκάφη μέσων αποστάσεων - στενής ατράκτου στον κόσμο. Κατασκευάζεται από την εταιρεία Boeing Commercial Airplanes χωρίς διακοπή από το 1967. Το αρχικό μοντέλο ήταν το Boeing 737-100, το οποίο εν συνεχεία επιμηκύνθηκε και αποτέλεσε το 737-200 . Τη δεκαετία του 1980 κατασκευάστηκαν και τα βελτιωμένα μοντέλα 737-300, 737-400 και 737-500. Τη δεκαετία του 1990 η Boeing παρουσίασε τη Νέα Γενιά 737 (737 Next Generation) που αποτελείται από τα τέσσερα μοντέλα 737-600, 737-700, 737-800 και 737-900, με μήκος από 31.09 μέτρα έως 42.06 μέτρα. Από το 1967 που εισήχθη στην κυκλοφορία έως και τον Ιανουάριο του 2016, η σειρά 737 έχει πουλήσει 8,880 αεροσκάφη. Η αεροπορική Southwest Airlines, στοιχεία πτήσεων της οποίας χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για την εργασία αυτή, είναι ο πρώτος χρήστης των μοντέλων 737-300, 737- 500 και 737-700 και δεν χρησιμοποιεί άλλους τύπους αεροσκαφών. Στον παρόν πόνημα εξετάστηκαν πτήσεις των 737-300 και 737-700 από την σειρά 737. Η οικογένεια Boeing 737 ανταγωνίζεται την οικογένεια A320 της Airbus. Μία συνοπτική απεικόνιση αυτής της εμπορικής «μάχης» αποτυπώνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.6 Παραδόσεις Boeing 737 και Airbus A320 (http://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/boeing-races-to-keep-up-with-airbus-on-single-aisle-jet-production/)

Στο διάγραμμα 2.4 φαίνεται ότι από το 2005 έως το 2014 η οικογένεια των A320 υπήρξε σταθερά πιο δημοφιλής από εκείνη των 737, όμως το 2014 η διαφορά μεταξύ τους μειώθηκε σε μόλις 5 αεροσκάφη.

Εικόνα 2.8: Boeing 737-300 (http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/)

Εικόνα 2.9: Boeing 717-200 (http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/)

Το Boeing 717-200 είναι αεροσκάφος στενής ατράκτου και δύο κινητήρων, σχεδιασμένο για την αγορά των 100 θέσεων. Ο αρχικός σχεδιασμός ήταν της αεροπορικής εταιρείας McDonnell Douglas, όμως μετά τη συγχώνευση της εταιρείας με την Boeing τον Αύγουστο του 1997, μετονομάστηκε σε Boeing 717-200. Όμως ο αυξημένος ανταγωνισμός από αεροσκάφη μικρών αποστάσεων Embraer E-jets και Bombardier CRJ, οδήγησε τη Boeing το 2005 να ανακοινώσει τον τερματισμό της παραγωγής νέων Boeing 717-200. Το αεροσκάφος Boeing 717-200 είναι το μόνο αεροσκάφος πτήσεων μικρών αποστάσεων (regional aircraft) που μελετήθηκε σε αυτή την εργασία καθώς, όπως θα εξηγηθεί και παρακάτω, τα προφίλ πτήσεων των αντίστοιχων αεροσκαφών δεν ήταν δυνατό να μελετηθούν με την επιλεγείσα μέθοδο.

Εικόνα 2.10: Boeing 757-200 (http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/)

Το Boeing 757-200 ανήκει στην οικογένεια 757 της Boeing και είναι ένα μεσαίου μεγέθους, στενής ατράκτου, δύο κινητήρων αεροσκάφος. Υπήρξε το μεγαλύτερο αεροσκάφος της Boeing που διέθετε ένα διάδρομο επιβατών στο εσωτερικό. Κατασκευάστηκε πρώτη φορά το 1981 και τελευταία το 2004. Χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα ευρέως για τις πτήσεις των μεγαλύτερων αποστάσεων εντός των ΗΠΑ (coast to coast). Ο συγκεκριμένος τύπος αεροσκάφους έχει καταγράψει οκτώ ατυχήματα κατά τα οποία το αεροσκάφος καταστράφηκε δίχως να επιδέχεται επισκευή (hull-loss accidents) και μάλιστα επτά από τα ατυχήματα αυτά ήταν θανατηφόρες συντριβές. Τον Ιούλιο του 2015, συνολικά 738 αεροσκάφη της οικογένειας 757 βρίσκονταν σε υπηρεσία, 138 από τα οποία ανήκαν στην αμερικανική αεροπορική εταιρεία Delta Air Lines, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερα αερομεταφορέα των Boeing 757.

Εικόνα 2.11: Boeing 767-300 (http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/)

Το 767-300 είναι αεροσκάφος, ευρείας ατράκτου, με δύο κινητήρες, μεσαίων και μεγάλων αποστάσεων. Κυκλοφόρησε στην αγορά πρώτη φορά το 1986 και το 2000 βελτιώθηκε αποκτώντας αυξημένο εύρος. Γενικά χρησιμοποιείται για πτήσεις έως και 6000 μιλίων. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πτήσεις έως και 4000 μιλίων, καθώς τα στοιχεία περιόριζαν την έρευνα εντός της εμβέλειας των ΗΠΑ. Η μεγαλύτερη εξεταζόμενη απόσταση ήταν αυτή μεταξύ των διεθνών αερολιμένων του Ντάλας και της Χονολουλού.

Εικόνα 2.12: Boeing 777-200 (http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/)

Το Boeing 777-200 ανήκει στην οικογένεια 777 της Boeing. Είναι αεροσκάφος ευρείας ατράκτου, με δύο κινητήρες, σχεδιασμένο για πτήσεις μεγάλων αποστάσεων. Αποτελεί το μεγαλύτερο αεροσκάφος με δύο κινητήρες και δύναται να καλύψει αποστάσεις μεγαλύτερες των 9000 μιλίων. Λόγω όμως του περιορισμού που αναφέρθηκε και για το Boeing 767-300, εξετάζονται πτήσεις εύρους έως και 4000 μιλίων.

2.4 Μήκος πτήσης

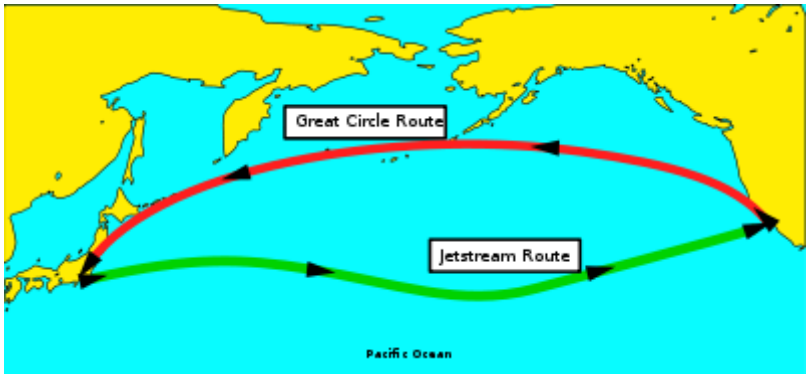
Μία πτήση σχεδιάζεται να ακολουθήσει μια συγκεκριμένη πορεία έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διανυόμενη από το αεροσκάφος απόσταση. Λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον εαυτό της, αλλά και της καμπυλότητάς της, η ευθεία απόσταση δύο αεροδρομίων όπως δίνεται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες, διαφέρει από την προβλεπόμενη να διανυθεί κατά την πτήση. Όμως και η τελευταία με τη σειρά της, στην πλειονότητα των περιπτώσεων διαφέρει από την απόσταση που τελικά πραγματοποιείται. Αυτό διότι συχνά προκύπτουν λόγοι ώστε το αεροσκάφος να παρεκκλίνει από την αρχικά σχεδιασμένη πορεία. Τέτοιοι λόγοι είναι οι έκτακτες καιρικές συνθήκες, λόγοι οικονομίας καυσίμου, καθώς και λόγοι Διαχείρισης Εναέριας Κυκλοφορίας. Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι d=ευθεία απόσταση, p=σχεδιασμένη απόσταση πτήσης και f=πραγματοποιούμενη απόσταση πτήσης μεταξύ δύο αεροδρομίων, ισχύει μεταξύ τους η παρακάτω σχέση:

$d \leq p \leq f$

Λόγω της περιστροφής της Γης, μια πτήση με κατεύθυνση προς τα δυτικά ή κυνηγώντας τον ήλιο», επιμηκύνεται, ενώ μια πτήση με κατεύθυνση προς τα ανατολικά γίνεται συντομότερη. Οι διαφορές αυτές δεν επηρεάζουν την κατηγοριοποίηση μιας πτήσης εάν αυτή είναι μικρής ή

μεσαίας απόστασης. Αντιθέτως, στις πτήσεις μεγάλης απόστασης, η περιστροφή της Γης δημιουργεί σημαντικές διαφοροποιήσεις.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η διαδρομή μεταξύ Σαν Φρανσίσκο και Τόκιο. Με την κόκκινη γραμμή αναπαρίσταται η πορεία της πτήσης από το Σαν Φρανσίσκο προς το Τόκιο (προς δυτικά), η οποία ακολουθεί την πιο άμεση απόσταση, τη λεγόμενη απόσταση ορθοδρομίας (great circle distance), ενώ με την πράσινη αναπαρίσταται η ακολουθούμενη πορεία από το Τόκιο προς το Σαν Φρανσίσκο (προς ανατολικά).



Εικόνα 2.13: Εναλλακτικές διαδρομές (https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_length)

Πτήσεις μικρών αποστάσεων

Οι ορισμοί που δίνονται για τις πτήσεις μικρών αποστάσεων διαφέρουν μεταξύ των αεροπορικών εταιρειών. Η αεροπορική εταιρεία Thomas Cook Airlines του Ηνωμένου Βασιλείου ορίζει ως πτήση μικρής απόστασης οποιαδήποτε πτήση ολοκληρώνεται εντός χρονικού διαστήματος τριών ωρών. Για την κινεζική Cathay Pacific πτήση μικρής απόστασης μπορεί να είναι μια πτήση μεταξύ Χονγκ-Κονγκ και Ταϊπέι (500 μίλια). Για την αραβική Etihad Airways στις πτήσεις μικρής απόστασης περιλαμβάνονται και οι πτήσεις από τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα προς την Ινδία.

Πτήσεις μεσαίων αποστάσεων

Μια πτήση μεσαίας απόστασης διαρκεί από τρεις έως έξι ώρες και οι συνήθεις τύποι αεροσκαφών που χρησιμοποιούνται είναι Airbus A321, Airbus A319 και Boeing 737-700. Ένα παράδειγμα πτήσης μεσαίας απόστασης είναι μεταξύ Λονδίνου και Κάιρο, που διαρκεί περίπου πέντε ώρες και τριάντα λεπτά. Σε χώρες μεγάλης έκτασης, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, υπάρχουν και πτήσεις εσωτερικού που είναι μεσαίας απόστασης.

Πτήσεις μεγάλων αποστάσεων

Μια πτήση μεγάλης απόστασης διαρκεί από έξι έως δώδεκα ώρες και πραγματοποιείται από αεροσκάφη μεγάλου τύπου, όπως Boeing 767, Boeing 777.

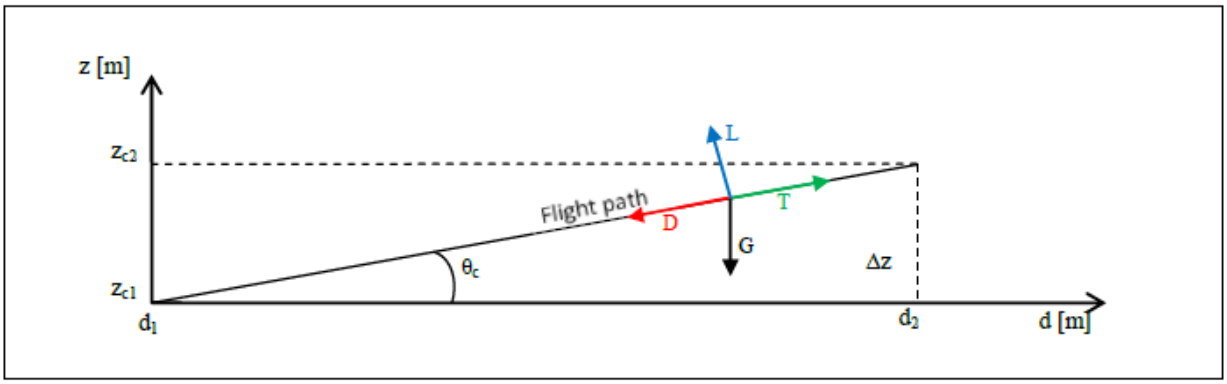
Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν κατά κύριο λόγο πτήσεις μικρών και μεσαίων αποστάσεων αλλά και κάποιες πτήσεις στο εύρος των μεγάλων αποστάσεων.

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και Επιλογή Μεθόδου

Στο πλαίσιο της εργασίας έγινε αναδρομή σε βιβλιογραφικές πηγές σχετικές με την εναέρια πορεία του αερασκάφους και τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιοριχμό της. Οι πηγές αυτές ήταν είτε δημοσιεύσεις έγκριτων επιστημονικών περιοδικών, είτε διπλωματικές εργασίες προπτυχιακών ή μεταπτυχιακών σπουδών σε Πανεπιστήμια από όλο τον κόσμο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί από τις εργασίες αυτές και μια σύντομη αναφορά στο περιεχόμενο ορισμένων εξ αυτών.

3.1 Μοντέλο Σημείου-Μάζας (Point-Mass Model)

Το πιο διαδεδομένο μοντέλο για τον προσδιορισμό ενός μέσου προφίλ πτήσης είναι αυτό του σημείου-μάζας (**point-mass model ή total energy model**) και έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε παρόμοια εγχειρήματα *(Zou, 2013); (Lovegren, 2011); (Merle, 2011)*. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, αρχικά καταγράφονται στοιχεία πτήσεων και διακρίνονται τρία ξεχωριστά στάδια της πτήσης˙ στάδιο ανόδου (climb), πτήσης (cruise) και καθόδου (descent). Για τον προσδιορισμό του μέσου ύψους πτήσης (cruise altitude), λαμβάνεται ο μέσος όρος των υψομέτρων πτήσης των συλλεχθέντων πτήσεων. Ο προσδιορισμός των μέσων καμπυλών ανάβασης και κατάβασης απαιτεί πιο πολύπλοκους χειρισμούς. Η γενική ιδέα είναι ότι υπολογίζεται το βάρος του αεροσκάφους –το οποίο είναι μεταβλητό (μειούμενο) λόγω της κατανάλωσης καυσίμου- για κάθε σημείο της πορείας του αεροσκάφους.



Εικόνα 3.1: Οι ασκούμενες δυνάμεις στο αεροσκάφος κατά την άνοδο (Merle, 2011)

Το μοντέλο αυτό περιγράφει τις δυνάμεις που ασκούνται στο κέντρο βάρους του αεροσκάφους και την επιρροή που αυτές έχουν στην επιτάχυνση του, κάνοντας κάποιες απλοποιητικές

παραδοχές. Υποτίθεται ότι τα διανύσματα της ώθησης (thrust) και έλξης (drag) είναι συγγραμικά με το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου και ότι η ανύψωση είναι κάθετη στα διανύσματα αυτά. Έτσι, προβάλλοντας τις δυνάμεις στον άξονα του διανύσματος της ταχύτητας του ανέμου, η επιτάχυνση μπορεί να εκφραστεί στον άξονα του διανύσματος της πραγματικής ταχύτητας ανέμου όπως στην παρακάτω σχέση:

$$a = \frac{dV_{\text{TAS}}}{dt}$$

$$m.a = T - D - m.g.sin(\gamma) \qquad (1)$$

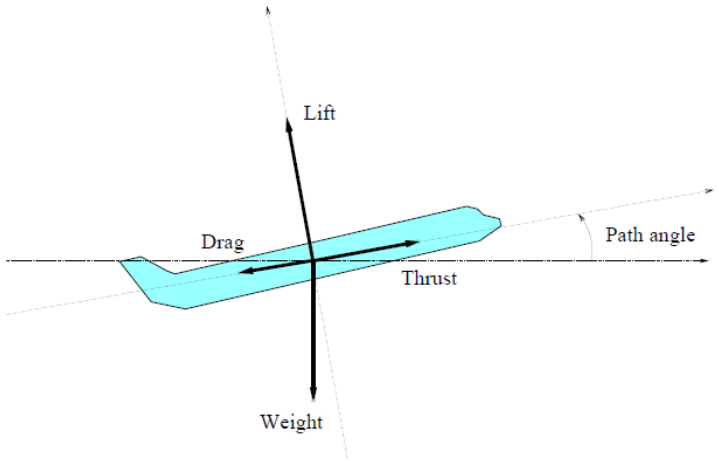
Όπου T είναι η συνολική ώθηση, D η αεροδυναμική έλξη των ατράκτων, m η μάζα του αεροσκάφους, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και γ η γωνία μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας του αέρα και της οριζόντιας προς την επιφάνεια της Γης εφαπτομένης του αεροσκάφους. Ο λόγος ανάβασης ή κατάβασης είναι

$$\frac{dh}{dt} = V_{\text{TAS}}.sin(\gamma)$$

όπου h είναι το υψόμετρο σε μέτρα. Έτσι, η εξίσωση (1) γράφεται ως ακολούθως:

$$(T - D).V_{\text{TAS}} = m.V_{\text{TAS}}.\frac{dV_{\text{TAS}}}{dt} + m.g.\frac{dh}{dt} \qquad (2)$$

Η χρήση αυτής της εξίσωσης για τον υπολογισμό της πορείας ανάβασης του αεροσκάφους προϋποθέτει τη γνώση μεγεθών όπως η μέγιστη ώθηση ανάβασης ανά τύπο αεροσκάφους και η μάζα του αεροσκάφους, οι οποίες πληροφορίες μπορούν να αντληθούν από το εγχειρίδιο χρήσης BADA Eurocontrol (*Eurocontrol BADA User Manual*). Κάνοντας την υπόθεση ότι το αεροσκάφος λειτουργεί σε συγκεκριμένο αριθμό Mach, ο υπολογισμός της πραγματικής ταχύτητας του αέρα απαιτεί τη γνώση των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία και πίεση). Υπό κανονικές συνθήκες, το αεροσκάφος λειτουργεί με μεταβαλλόμενο αριθμό Mach, ώσπου να φτάσει μία συγκεκριμένη τιμή, από τον οποία και μετά αποκτά σταθερό αριθμό Mach. *(Hamed et al., 2013)*



Εικόνα 3.2: Οι ασκούμενες δυνάμεις στο αεροσκάφος (Hamed et al., 2013)

Η Dorothée Merle στη μεταπτυχιακή εργασία της για το Νορβηγικό Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας «Flight path optimization for an airplane» τον Ιούνιο του 2011, επιχείρησε να προσδιορίσει μια βέλτιστη πορεία αεροσκάφους προκειμένου να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση καυσίμου. Στην εργασία της μελετώνται μια πτήση μικρού μήκους μεταξύ Τροντχάιμ και Όσλου, μια πτήση μεσαία απόστασης μεταξύ Τροντχάιμ και Νίκαιας και μια μεγάλου μήκους μεταξύ Παρισίου και Νέας Υόρκης. Χρησιμοποιούνται στοιχεία για την κατανάλωση των αεροσκαφών τα οποία αντλούνται από επίσημα έγγραφα της εταιρείας κατασκευής αεροσκαφών Airbus, καθώς και από τη διδακτορική διατριβή του Paul Arenzen *(Arenzen, 2001)*. Η Merle χρησιμοποιεί κώδικα Matlab που χρησιμοποιεί τις παραπάνω εξισώσεις προκειμένου να προσδιορίσει το βέλτιστο προφίλ πτήσης για τις τρεις κατηγορίες απόστασης που εξετάζει. Στο υπολογιστικό αυτό πρόγραμμα επιλέγεται από το χρήστη η διαδρομή (μία εκ των τριών που αναφέρθηκαν οαραπάνω) και ο τύπος αεροσκάφους Airbus A320 ή Boeing 737-800). Γίνεται υπολογισμός του προφίλ πτήσης του αεροσκάφους για τρεις διαφορετικούς ρυθμούς ανόδου και καθόδου, οι οποίες οδηγούν σε τρία διαφορετικά υψόμετρα πλεύσης του αεροσκάφους και στη συνέχεια γίνεται επιλογή βέλτιστου προφίλ πορείας του αεροσκάφους ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση καυσίμου. Για τις πτήσεις μικρής και μεσαίας απόστασης, το υψόμετρο πλεύσης του αεροσκάφους παραμένει σταθερό, ενώ για την πτήση μεγάλης απόστασης το υψόμετρο αυξάνεται γραμμικά με την πάροδο του χρόνου πτήσης.

Ο Zhihao Zou στην εργασία του μεταπτυχιακού του για το πολυτεχνείο της Βιρτζίνια, «A Computer Model to Estimate Commercial Aviation Fuel Consumption and Emissions in the Continental United States», το Νοέμβριο του 2012 ανέπτυξε ένα μοντέλο που υπολόγιζε την πορεία του αεροσκάφους προκειμένου να εξετάσει την κατανάλωση καυσίμου χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων Eurocontrol Base of Aircraft Data (BADA) για την άντληση στοιχείων και βάζοντας σε εφαρμογή το μοντέλο σημείου-μάζας (point-mass model).

Οι Jonathan A. Lovegren και R. John Hansman στη δημοσίευση τους για το MIT International Center for Air Transportation (ICAT) «Estimation of potential fuel burn reduction in cruise via speed and altitude optimization strategies», η οποία βασίστηκε στη μεταπτυχιακή εργασία του A. Lovegren, χρησιμοποίησαν το μοντέλο σημείου μάζας προκειμένου να υπολογίσουν το μέσο προφίλ πτήσης για τη φάση πλεύσης των τότε πραγματοποιούμενων πτήσεων και να το συγκρίνουν με ένα βέλτιστο για την κατανάλωση καυσίμου το οποίο οι ίδιοι δημιούργησαν. Σκόπος τους ήταν η διερεύνηση για την ύπαρξη δυνατότητας μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου.

Ο αριθμός Mach

Ο αριθμός Mach, με διεθνές σύμβολο Ma, είναι ο λόγος της ταχύτητας ενός αντικειμένου προς την τοπική ταχύτητα μετάδοσης του ήχου, είναι δηλαδή αδιάστατος αριθμός.

Υπενθυμίζεται ότι η ταχύτητα μετάδοσης του ήχου σε οποιοδήποτε μέσον δεν είναι πάντα σταθερή, αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την πυκνότητα, ειδικότερα στον αέρα, υπερκείμενο της Γης, εξαρτάται από το ύψος, την θερμοκρασία και την πίεση που επικρατούν κατά την μετάδοση. Έτσι λέγοντας τοπική ταχύτητα εννοούνται οι συνθήκες που επικρατούν στο ύψος που συμβαίνει η μετάδοση.

Ο αριθμός Mach χρησιμοποιείται για την ταχύτητα αεροσκαφών. Στο επίπεδο της θάλασσας, σε πρότυπες συνθήκες, Mach 1 είναι η ταχύτητα με αριθμητική τιμή 1.225 χλμ/ώρα (761,2 μίλια την ώρα).

Ο αριθμός Mach πήρε το όνομά του από τον Αυστριακό φυσικό και φιλόσοφο Ernst Mach.

Η βαθμονομημένη ταχύτητα αέρος

Η βαθμονομημένη ταχύτητα αέρος (CAS: Calibrated Airspeed) είναι η ταχύτητα που εμφανίζει ως ένδειξη ένας συμβατικός δείκτης ταχύτητας αέρος, μετά από διόρθωση για σφάλμα οργάνου και σφάλμα θέσης. Στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, υπό πρότυπες συνθήκες (15 °C, 1013 hPa, 0% υγρασία) η βαθμονομημένη ταχύτητα αέρος είναι ίδια με την ισοδύναμη ταχύτητα αέρος (equivalent airspeed) και την πραγματική ταχύτητα αέρος (true airspeed). Αν δεν πνέουν άνεμοι, είναι επίσης ίδια με την ταχύτητα εδάφους (ground speed). Υπό οποιεσδήποτε άλλες συνθήκες, η βαθμονομημένη ταχύτητα αέρος μπορεί να διαφέρει από τις άλλες ταχύτητες.

Η βαθμονομημένη ταχύτητα αέρος υπολογίζεται με βάση τις συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας που επικρατούν στο υψόμετρο και χρησιμοποιείται από μερικά μοντέλα προσδιορισμού θέσης του αεροσκάφους.

3.2 Μοντέλο παλινδρόμησης (Regression Model)

Στη βιβλιογραφία συναντάται και ο προσδιορισμός προφίλ πτήσης με χρήση μοντέλων παλινδρόμησης. *(Hamed et al., 2013)*

Στο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης υπάρχουν n ζευγάρια παρατηρήσεων (x,Y), όπου x είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και Y η μεταβλητή απόκρισης. Η μεταβλητή Y μια συνάρτηση f(x) με όρο σφάλματος ε, που ορίζεται ως:

$$Y_i = f(x_i) + \varepsilon_i, \ where \ E(\varepsilon_i) = 0. \qquad (3)$$

ή $\mathbf{Y} = X\beta + \varepsilon$

Το μοντέλο υποθέτει ότι τα σφάλματα ε είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Έτσι, ο σκοπός είναι να υπολογιστεί μια μέση συνάρτηση, όσο το δυνατόν πλησιέστερη στην f. Συνηθίζεται να υποτίθεται ότι η διακύμανση του σφάλματος είναι σταθερή. Αυτό είναι γνωστό ως υπόθεση **ομοσκεδαστικότητας**.

Προβλέπεται το υψόμετρο z[t] σε χρονική στιγμή $t>t_o$, όπου t_o είναι ο παρών χρόνος. Το x είναι διάνυσμα τιμών που εξάγεται από τις παρακάτω τιμές:

- Τις τρέχουσες και προηγούμενες καταστάσεις του αεροσκάφους, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τα z[k] και d[k], με k ϵ [-10, 0]. Οι προηγούμενη πορεία συλλέγεται ανά δt δευτερόλεπτα. Το z[k] υποδηλώνει την τιμή υψομέτρου z τη χρονική στιγμή $t= t_o+k*\delta t$. Έτσι, $z[0]=z(t_o)$ είναι το τρέχον υψόμετρο, z[-1] είναι το υψόμετρο πριν δt δευτερόλεπτα κοκ. Το ίδιο ισχύει για την απόσταση d.
- Η διαφορά μεταξύ της πραγματικής θερμοκρασίας αέρα στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας και της θερμοκρασίας αέρα που δίνεται από τον οργανισμό International Standard Atmosphere (ISA) για τη στάθμη της θάλασσας.
- Ο άνεμος κατά μήκος της τροχιάς και αντίρροπα αυτής και η θερμοκρασία t σε διαφορετικά υψόμετρα.
- Άλλες μεταβλητές, όπως τρέχουσα βαθμονομημένη ταχύτητα αέρος (CAS), αριθμός Mach, ταχύτητα εδάφους κλπ. και οι παράγωγοί τους ως προς το χρόνο.

Οι παράμετροι β υπολογίζονται βάσει ιστορικών στοιχείων, έτσι ώστε τα υπολογιζόμενα μεγέθη να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα παρατηρούμενα δεδομένα. Κάθε φορά προσδιορίζεται ένα μόνο μελλοντικό σημείο της πορείας του αεροσκάφους, αφήνοντας N βήματα για τη συνέχεια. *(Hamed et al., 2013)*

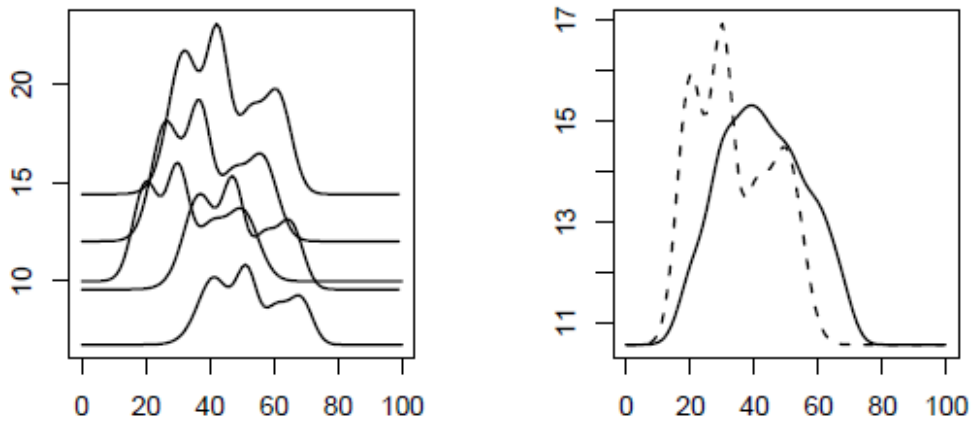
Οι Hamed, Gianazza, Serrurier και Durand υποστηρίζουν ότι το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη της πορείας του αεροσκάφους είναι πιο ακριβές από το μοντέλου σημείου-μάζας, καθώς το τελευταίο απαιτεί γνώση της ακριβούς μάζας και θέσης του

αεροσκάφους ανά πάσα στιγμή και εμπεριέχει σφάλμα όταν η πρόβλεψη δε γίνεται από τα υπολογιστικά συστήματα του ίδιου του αεροσκάφους που βρίσκεται εν πτήσει.

3.3 Επιλεχθείσα μέθοδος: Στατιστική επεξεργασία ύστερα από ευθυγράμμιση δεδομένων με τη χρήση χαρακτηριστικών σημείων (Landmark Registration)

Αρχικά ας εξηγήσουμε το πρόβλημα της **ευθυγράμμισης δεδομένων**. Τα διαγράμματα χρόνου-υψομέτρου που κατασκευάζονταν για κάθε εύρος απόστασης, παρουσίαζαν διαφορές κατά πλάτος. Αυτό, διότι οι πτήσεις ανήκαν μεν στο ίδιο εύρος απόστασης, αλλά διέφεραν κατά κάποια μίλια, αλλά κυριότερα, επειδή κάθε πτήση πραγματοποιείται υπό μοναδικό συνδυασμό συνθηκών. Δηλαδή, ακόμα και αν επαναληφθεί η ακριβώς ίδια πτήση πολλές φορές, η πορεία του αεροσκάφους κάθε φορά δεν θα είναι απολύτως όμοια με κάποια άλλη. Οι λόγοι που συμβάλλουν σε αυτό αναλύθυκαν στην παράγραφο 2.4 και περιλαμβάνουν τις καιρικές συνθήκες (άνεμος, καταιγίδα) τις οδηγίες της εκάστοτε αεροπορικής εταιρείας, για το αν θα δώσουν προτεραιότητα στην ταχύτητα ταξιδίου ή στην χαμηλή κατανάλωση, αλλά και τις οδηγίες της Διαχείρισης Εναέριας Κυκλοφορίας (Air Traffic Management).

Η προαναφερθείσα **διαφορά εύρους** είναι αυτή που καθιστά ανεπαρκή μια προσέγγιση, η οποία απλώς θα λάμβανε το μέσο όρο των υψομέτρων για κάθε χρονική στιγμή. Για την καλύτερη κατανόηση της αδυναμίας μιας τέτοιας απλουστευμένης προσέγγισης, ας δούμε το παρακάτω παράδειγμα *(Florence, 2011)*.



Εικόνα 3.3: Έλλειψη ακρίβειας της απλοϊκής μεθόδου (Florence, 2013)

Στο διάγραμμα αριστερά παρουσιάζονται κάποιες καμπύλες δεδομένων, ενώ στο διάγραμμα δεξιά, με συνεχή γραμμή, ο μέσος όρος των καμπυλών. Παρατηρούμε πως **έχουν «χαθεί» βασικά χαρακτηριστικά των καμπυλών**. Αντιθέτως, η διακεκομμένη γραμμή του διαγράμματος δεξιά, η οποία είναι ο μέσος όρος των ευθυγραμμισμένων δεδομένων, αναπαριστά με πολύ επαρκέστερο τρόπο το μέσο διάγραμμα των καμπυλών.

Για την παρούσα εργασία, αν λαμβανόταν απλώς ο μέσος όρος των συλλεχθέντων προφίλ, χωρίς να προηγηθεί ευθυγράμμιση, τότε το τελικό μέσο προφίλ δεν θα αναπαριστούσε δυνατή πορεία αεροσκάφους.

Η χρήση της μεθόδου απαιτεί τη χρήση προγραμματιστικού λογισμικού. Είναι σύνηθες να εφαρμόζεται η μέθοδος με χρήση **Matlab**. Έτσι, μέσω Matlab έγινε η εφαρμογή της μεθόδου και στην παρούσα εργασία.

Η μέθοδος ευθυγραμμίζει τις καμπύλες-συναρτήσεις που αναπαριστούν την πορεία του αεροσκάφους και τοποθετεί τα δεδομένα σε κοινή κλίμακα χρόνου, ώστε να είναι δυνατή η στατιστική επεξεργασία. Αυτό γίνεται με τη χρήση αυξουσών συναρτήσεων μετατροπής του άξονα του χρόνου, οι οποίες καλούνται **συναρτήσεις ύφανσης** (**warping functions**) .

Αυτές οι μετατροπές χρόνου στοχεύουν στο να εξαλείψουν τη διαφορά φάσεων ανάμεσα στις καμπύλες-συναρτήσεις και να μετατρέψουν τη χρονική κλίμακα της κάθε συνάρτησης σε ένα κοινό χρονικό διάστημα. Στόχος τα ποιοτικά χαρακτηριστικά να συμβαίνουν την ίδια χρονική στιγμή. Αναζητούμε $s_i=w_i(t)$ τέτοια ώστε τα $x_i(t)=x_i(s_i)$ να ευθυγραμμιστούν. Τα $w_i(t)$ ονομάζονται συναρτήσεις ύφανσης του χρόνου (warping functions) και υπολογίζονται με μέθοδο παρεμβολής (interpolation ή smoothing). Για κάθε καμπύλη xi(t) επιλέγουμε τα σημεία $t_{i1},\ldots,t_{ik}$. Χρειαζόμαστε σημεία αναφοράς, που συνήθως είναι τα σημεία μιας εκ των καμπυλών $t_{01},\ldots.,t_{0k}$, τα οποία ορίζουν τους περιορισμούς $w_i(t_{ij})=t_{0j}$.

Στη συνέχεια, πρέπει να ορισθούν τα ορόσημα (landmarks) στο διάγραμμα χρόνου-υψομέτρου. Αυτό μπορεί να γίνει είτε χειρωνακτικά «κλικάροντας» στα σημεία που αναγνωρίζονται ως ορόσημα, είτε υπολογιστικά, ορίζοντας ως ορόσημα τα σημεία μηδενισμού της δεύτερης παραγώγου της συνάρτησης καμπύλης.

Υπολογίζουμε τα $w_i^{-1}(t)$ έτσι ώστε $w_i^{-1}(w_i(t))=t$

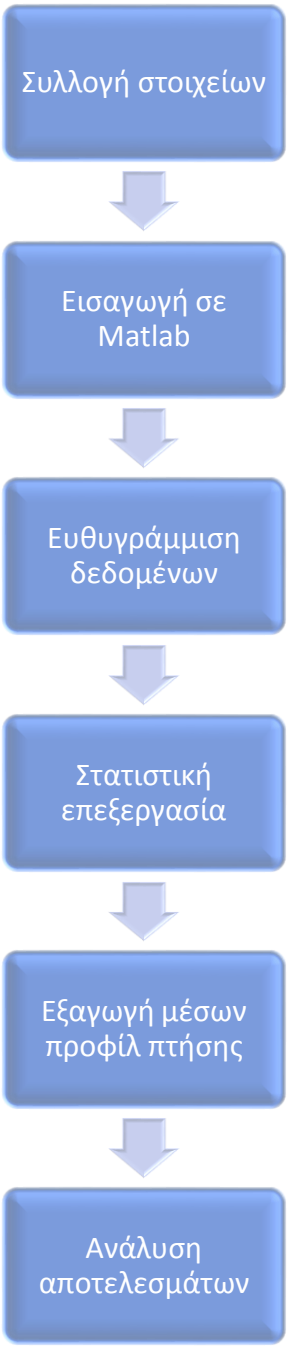
Αν υποθέσουμε ότι t είναι οι χρονικές παρατηρήσεις οι οποίες ανήκουν στο διάστημα [0, T], τότε οι συναρτήσεις ύφανσης $w_i(t)$ πρέπει να ικανοποιούν τους παρακάτω περιορισμούς:

- Αρχικές συνθήκες: $w_i(0)=0$, $w_i(T)=T$
- Ορόσημα: $w_i(t_{ij})=t_{0j}$
- Μονοτονία: Αν $t_1<t_2$, τότε $w(t_1)<w(t_2)$

Μετά τη χρήση των συναρτήσεων ύφανσης, καθένα από τα παραπάνω τρία γεγονότα ορόσημα, συμβαίνει την ίδια χρονική στιγμή για όλες τις εξεταζόμενες πτήσεις και ο στατιστικός μέσος όρος που λαμβάνεται μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικός, αφού είναι ακριβέστερος και δεν «χάνει» σημαντικά χαρακτηριστικά των επιμέρους διαγραμμάτων.

Έχοντας επιλέξει πλέον τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί, συντάσσουμε το διάγραμμα ροής της παρούσας εργασίας. Τη συλλογή στοιχείων θα διαδεχθεί η εισαγωγή τους σε Matlab, προκειμένου να γίνει ευθυγράμμιση των δεδομένων και στη συνέχεια να εξαχθούν στατιστικά τα μέσα προφίλ πτήσης. Έτσι τελικά, θα μπορεί να γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Ακολούθως φαίνεται η πορεία που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα ροής της διπλωματικής εργασίας

4. Συλλογή και Καταγραφή Στοιχείων Πτήσεων

4.1 Γενικά

Το απαραίτητο πρώτο βήμα αυτής της εργασίας ήταν η **καταγραφή στοιχείων πτήσεων**. Συνολικά συλλέχθηκαν στοιχεία για περισσότερες από 560 διαφορετικές πτήσεις των ακόλουθων τύπων αεροσκαφών:

- Airbus A319
- Airbus A321
- Boeing 737-700 (B737)
- Boeing 717-200 (B712)
- Boeing 737-300 (B733)
- Boeing 767-300 (B763)
- Boeing 757-200 (B752)
- Boeing 777-200 (B772)

Η συλλογή στοιχείων έγινε από την ιστοσελίδα www.flightaware.com. Η συγκεκριμένη ιστοσελίδα παρέχει στους χρήστες στοιχεία για **πτήσεις εντός των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής**. Αντίστοιχα στοιχεία για ευρωπαϊκές πτήσεις δεν δίνονται στη δημοσιότητα. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά στοιχεία που αφορούν πτήσεις εντός ΗΠΑ. Τα στοιχεία που συλλέγονταν, καταγράφονταν σε λογιστικά φύλλα τα οποία τελικά περιείχαν πληροφορίες για:

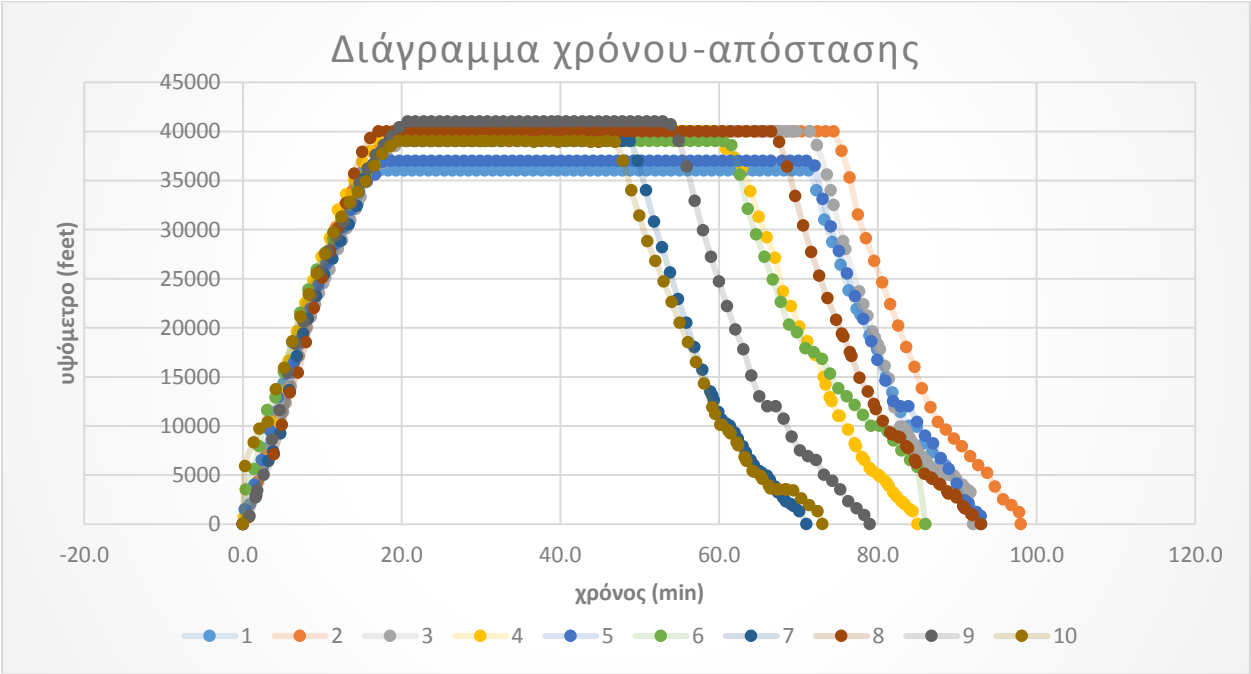
- Τον τύπο αεροσκάφους
- τις συντεταγμένες και το υψόμετρο του αεροσκάφους την κάθε χρονική στιγμή της πτήσης
- Την απόσταση σε ευθεία γραμμή (direct distance) των αεροδρομίων αναχώρησης και προορισμού (σε statute miles)
- Το μήκος του σχεδιασμένου ταξιδιού (planned distance)
- Το πραγματοποιηθέν μήκος ταξιδιού (flown distance)
- Την ημερομηνία πραγματοποίησης της πτήσης και την ημερομηνία καταγραφής
- Τη διαδοχή των φάσεων πτήσης (άνοδος, κύρια πτήση, κάθοδος)
- Ο συνολικός χρόνος ταξιδίου

Η συλλογή στοιχείων έγινε για **διάφορα εύρη αποστάσεων**. Αυτά τα διαφορετικά εύρη για τα οποία έγινε ο προσδιορισμός του μέσου προφίλ πτήσης επιλέχθηκαν βάσει σχετικού τεχνικού εγχειριδίου της Federal Aviation Administration (FAA Technical Manual, September 2005). Τα δεδομένα κάθε πτήσης καταγράφονταν σε ένα λογιστικό φύλλο Microsoft Excel. Για κάθε εύρος πτήσης συλλέγονταν δέκα διαφορετικές πτήσεις για τον καθένα από τους δύο εξεταζόμενους

τύπους αεροσκαφών και σε ένα ξεχωριστό λογιστικό φύλλο κατασκευαζόταν τα διαγράμματα χρόνου-υψομέτρου (στον άξονα Χ ο χρόνος και στον άξονα Υ το αντίστοιχο υψόμετρο). Η κατασκευή αυτών των διαγραμμάτων, αφενός παρείχε μια άμεση εικόνα της πορείας του αεροσκάφους και αφετέρου συνέβαλλε στο να διατηρείται η εποπτεία ότι δεν υπήρξε κάποιο χονδροειδές σφάλμα κατά την καταγραφή των δεδομένων. Στις ακόλουθες εικόνες φαίνονται ενδεικτικά όσα περιγράφηκαν παραπάνω.

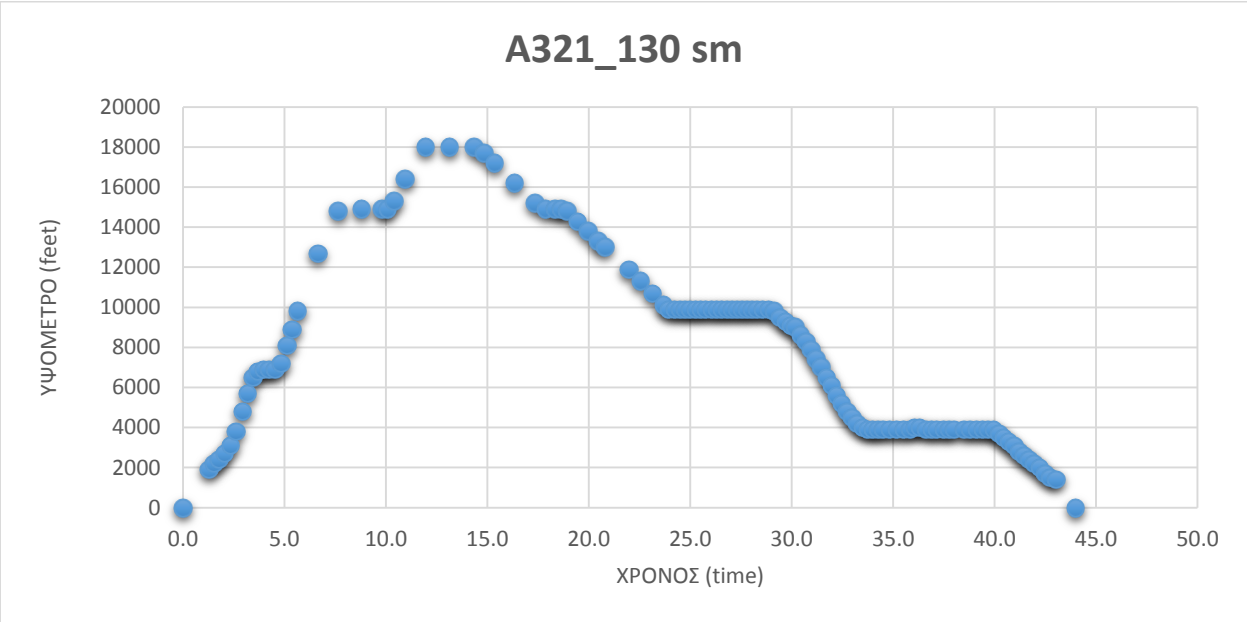
Aircraft type:	A319		Date of flight:	11-Nov-15														
			Date of release:	12-Nov-15														
Binned Distance [st]:	400																	
filed altitude [ft]:	32000		Source:	https://flightaware.com/live/flight/AAL817/history/20151112/0010Z/KPIT/KCLT/tracklog														
direct distance [st]:	367																	
planed distance [st]:	408		*from flightaware*															
flown distance [sm]:	507														FLIGHT INFORMATION			
Example of flight:	From	To													FL507-DIR367-TIME59			
	KPIT	KCLT																
Time	Position		Orientation		Groundspeed		Altitude											
EDT	Latitude	Longitude	Course	Direction	KTS	MPH	feet	Rate				FLIGHT PHASE	TIME	AXIS TIME	TIME IN MINUTES	TIME IN MINUTES		
Wed 07:19:00 PM							0					T-O	0.304861	0	0.0	19.0	0.0	
Wed 07:20:55 PM	40.4828	-80.3072	207°	Southwest	173	199	3,500					CL	0.306192	0.001331	1.9	20.9	1.92	
Wed 07:21:57 PM	40.4131	-80.3156	185°	South	243	280	6,300	3,145				CL	0.30691	0.002049	3.0	22.0	2.95	
Wed 07:22:59 PM	40.3364	-80.3264	186°	South	273	314	10,000					CL	0.307627	0.002766	4.0	23.0	3.98	

Εικόνα 4.1: Φύλλο καταγραφής στοιχείων πτήσης (παρατίθεται αναλυτικότερα στο παράρτημα)



Διάγραμμα 4.1: Προφίλ πτήσης αεροσκάφους

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τη συλλογή των δεδομένων αποφεύγονταν περιπτώσεις πτήσεων οι οποίες παρουσίαζαν εμφανείς ανωμαλίες στα διαγράμματα χρόνου-υψομέτρου και οι φάσεις ανόδου, πλεύσης και καθόδου δεν ήταν διακριτές. Η δυνατότητα για αυτή τη διαλογή υπήρξε στην εν λόγω εργασία, διότι η καταγραφή στοιχείων έγινε δια χειρός και χωρίς τη χρήση αυτοματοποιημένου προγράμματος. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και στην τρίτη παράγραφο του δευτέρου κεφαλαίου «Μήκος πτήσης», ο προσανατολισμός της εκάστοτε πτήσης επηρεάζει τη συνολική διανυόμενη απόσταση λόγω της περιστροφής της Γης. Αυτό δημιουργεί χρονικές διαφοροποιήσεις οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν αμυδρές για τις πτήσεις μικρών αποστάσεων, αμελητέες ή ήσσονος σημασίας για κάποιες πτήσεις μεσαίων αποστάσεων, αλλά για τις πτήσεις μεγάλων ή και σχεδόν μεγάλων αποστάσεων δημιουργούν σημαντικές χρονικές αποκλίσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται το παράδειγμα της πτήσης μεταξύ του Φοίνιξ της Αριζόνα και της Χονολουλού της Χαβάη, το μήκος της οποίας είναι 2916 μίλια. Μια πτήση που αναχωρεί από το Φοίνιξ με κατεύθυνση τη Χονολουλού, δηλαδή από την Ανατολή προς τη Δύση, διαρκεί περίπου 300 λεπτά, ενώ η πτήση του αντίστροφου δρομολογίου, που έχει κατεύθυνση από τη Δύση προς την Ανατολή, διαρκεί περίπου 390 λεπτά, προσθέτοντας μιάμιση επιπλέον ώρα ταξιδίου. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση αυτού του φαινομένου στην εγκυρότητα των συλλεχθέντων στοιχείων, για κάθε πτήση μεγάλης απόστασης, τα στοιχεία για κάθε δρομολόγιο συλλέγονταν και για την αντίστροφη πτήση.



Διάγραμμα 4.2: Πτήση με μη διακριτή διαδοχή φάσεων

4.2 Ομαδοποίηση πτήσεων με βάση το εύρος απόστασης

Ένα από τα προβλήματα που έπρεπε να αντιμετωπιστούν πριν την έναρξη συλλογής των δεδομένων, ήταν η **επιλογή του εύρους απόστασης**, ώστε να κατηγοριοποιηθούν οι πτήσεις κατ' αυτόν τον τρόπο. Γενικά, οι πτήσεις μικρών αποστάσεων παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, ακόμα και αν είναι παρόμοιας ή και ακριβώς ίδιας απόστασης. Αντίθετα, οι πτήσεις μεγαλύτερου μήκους πτήσεις τείνουν να έχουν ένα πιο σταθερό προφίλ. Για το λόγο αυτό, η κατηγοριοποίηση των πτήσεων έγινε ανά πολύ λιγότερα μίλια για τις πτήσεις μικρών αποστάσεων, από εκείνες των μεγαλύτερων αποστάσεων. Η ομαδοποίηση των αποστάσεων έγινε βάσει τεχνικού εγχειριδίου της Federal Aviation Administration (FAA). Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα εύρη αποστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

Εύρος απόστασης (σε statute miles)	Χαρακτηριστική Τιμή απόστασης (sm)
125-175	150
176-225	200
226-275	250
275-325	300
326-450	400
451-625	500
625-875	750
876-1225	1000
1226-1725	1500
1726-2225	2000
2226-2725	2500
2726-3225	3000
3225-4500	4000

Πίνακας 4.1 Ομαδοποίηση πτήσεων σε εύρη απόστασης

Σημείωση: Η ιστοσελίδα flightaware, από όπου έγινε η συλλογή στοιχείων, παρέχει τις αποστάσεις σε μονάδες statute miles (μίλια). Ισχύει ότι 1 sm= 1.60934 km.

Επειδή κάθε εξεταζόμενο εύρος απόστασης δεν εκτελείται και από τους 5 τύπους αεροσκαφών, στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι συνδυασμοί εύρους αποστάσεων με τύπους αεροσκαφών.

Χαρακτηριστική Τιμή Απόστασης (sm)	Τύποι Αεροσκαφών
150	A321, B712
200	A319, B733, B737
250	A319, A321, B712, B733, B737
300	A319, B712, B733, B737
400	A319, A321, B712, B733, B737
500	A319, A321, B712, B733, B737, B752
750	A319, A321, B712, B733, B737, B752
1000	A319, A321, B712, B733, B737, B752
1500	A319, A321, B733, B737, B752
2000	A319, A321, B733, B737, B752
2500	A319, A321, B752, B763, B772
3000	B763, B752
4000	B763, B772

Πίνακας 4.2: Συνδυασμοί εύρους αποστάσεων με τύπους αεροσκαφών

5. Επεξεργασία Στοιχείων

Μέσω κώδικα Matlab τα συλλεχθέντα στοιχεία επεξεργάζονται σύμφωνα με την ακόλουθη πορεία:

- Διαβάζεται το αρχείο Microsoft Excel
- Υπολογίζεται η διάρκεια κάθε πτήσης
- Προσδιορίζεται η πτήση με τη μεγαλύτερη διάρκεια και η τιμή αυτής
- Κατασκευάζεται το μητρώο-στήλη χρόνου t, το οποίο περιέχει ακέραιες τιμές λεπτών, από μηδέν έως τη μέγιστη διάρκεια πτήσης, με βήμα ίσο με τη μονάδα
- Καθώς τα στοιχεία δε δίνουν πληροφορία για το υψόμετρο του αεροσκάφους για τις συγκεκριμένες ακέραιες τιμές χρόνου, κάνοντας γραμμική παρεμβολή χρησιμοποιώντας την αμέσως προηγούμενη και την αμέσως επόμενη τιμή, βρίσκουμε το υψόμετρο που βρίσκεται το αεροσκάφος για την κάθε ακέραια τιμή. Η ακρίβεια αυτής της διαδικασίας είναι αρκούντως μεγάλη, καθώς οι διαφορές μεταξύ ακεραίων και μη τιμών είναι της τάξεως των μερικών δευτερολέπτων

Έτσι, έχουμε ένα μητρώο-στήλη t και ένα μητρώο υψομέτρων X, το οποίο έχει αριθμό σειρών όσες και οι πτήσεις του αρχείου Excel, δηλαδή δέκα (10), και αριθμό στηλών ίσο με το μήκος του μητρώου-στήλης t.

Στη συνέχεια γίνεται ευθυγράμμιση των δεδομένων, κάνοντας χρήση αυξουσών συναρτήσεων μετατροπής του άξονα του χρόνου, δηλαδή των συναρτήσεων ύφανσης (warping functions) . Η μετατροπή γίνεται ώστε τα ποιοτικά χαρακτηριστικά να συμβαίνουν την ίδια χρονική στιγμή. Τα ποιοτικά αυτά χαρακτηριστικά καλούνται ορόσημα (landmarks). Στην παρούσα εργασία ως ορόσημα ορίστηκαν τα παρακάτω τρία (3) σημεία:

- Η στιγμή κατά την οποία το αεροσκάφος μεταβαίνει από τη φάση ανόδου (climb) στη φάση πλεύσης (cruise)
- Η στιγμή κατά την οποία το αεροσκάφος μεταβαίνει από τη φάση πλεύσης (cruise) στη φάση καθόδου (descent)
- Η στιγμή της προσγείωσης (μηδενικό υψόμετρο)

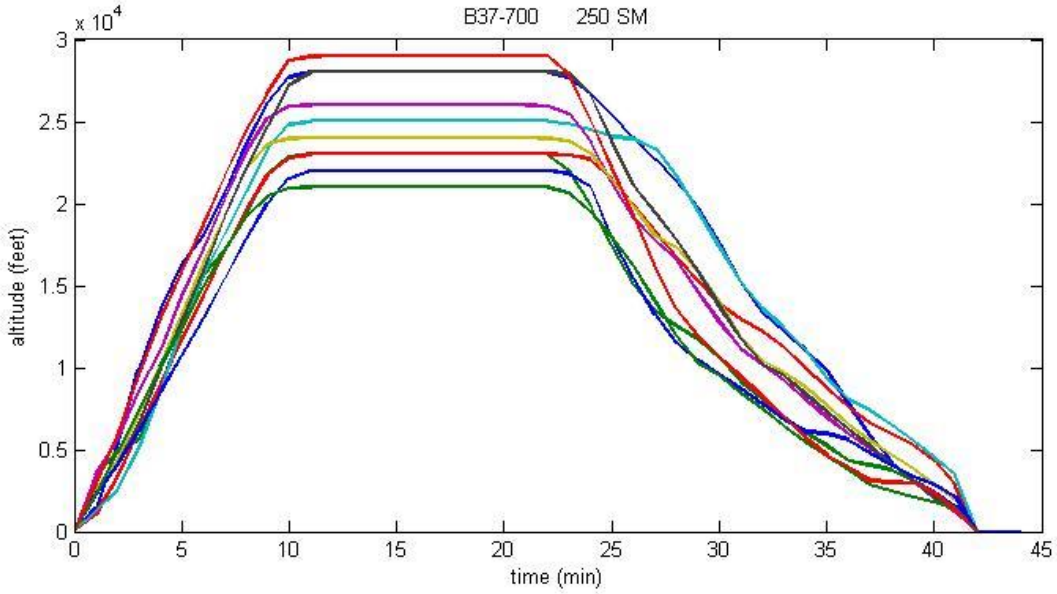
Μετά τη χρήση των συναρτήσεων ύφανσης, καθένα από τα παραπάνω τρία γεγονότα ορόσημα, συμβαίνει την ίδια χρονική στιγμή για όλες τις εξεταζόμενες πτήσεις.

Έπειτα κατασκευάζεται το διάγραμμα χρόνου-υψομέτρων για τα ευθυγραμμισμένα δεδομένα και από αυτό υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή (Interpolation) το μέσο διάγραμμα, δηλαδή το μέσο προφίλ πτήσης.

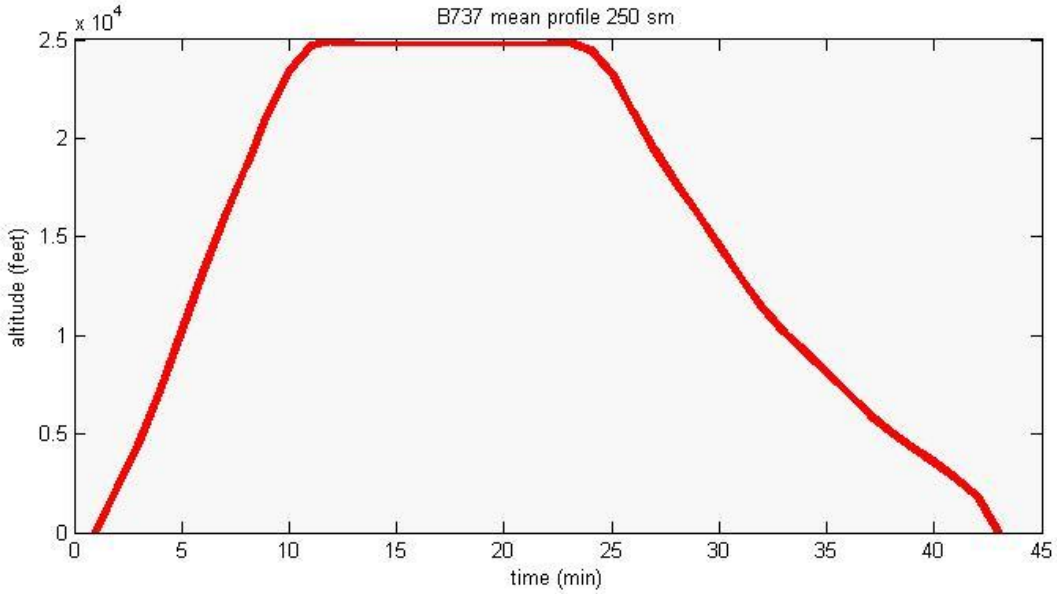
Ακολουθούν δύο παραδείγματα διαγραμμάτων ευθυγραμμισμένων δεδομένων και μέσου προφίλ πτήσης˙ ένα παράδειγμα για πτήση μικρού μήκους (Boeing B737-700, εύρος απόστασης 250 μιλίων) και ένα παράδειγμα για πτήση μεσαίου μήκους (Boeing B737-700, εύρος απόστασης 2000 μιλίων).

Στη συνέχεια, τα επεξεργασμένα δεδομένα εισάγονται και πάλι σε αρχείο Microsoft Excel προκειμένου να κατασκευαστούν σε ένα διάγραμμα κοινού εύρους απόστασης, τα μέσα προφίλ όλων των εξεταζόμενων τύπων αεροσκάφους.

❖ Boeing B737-700, 250 μίλια

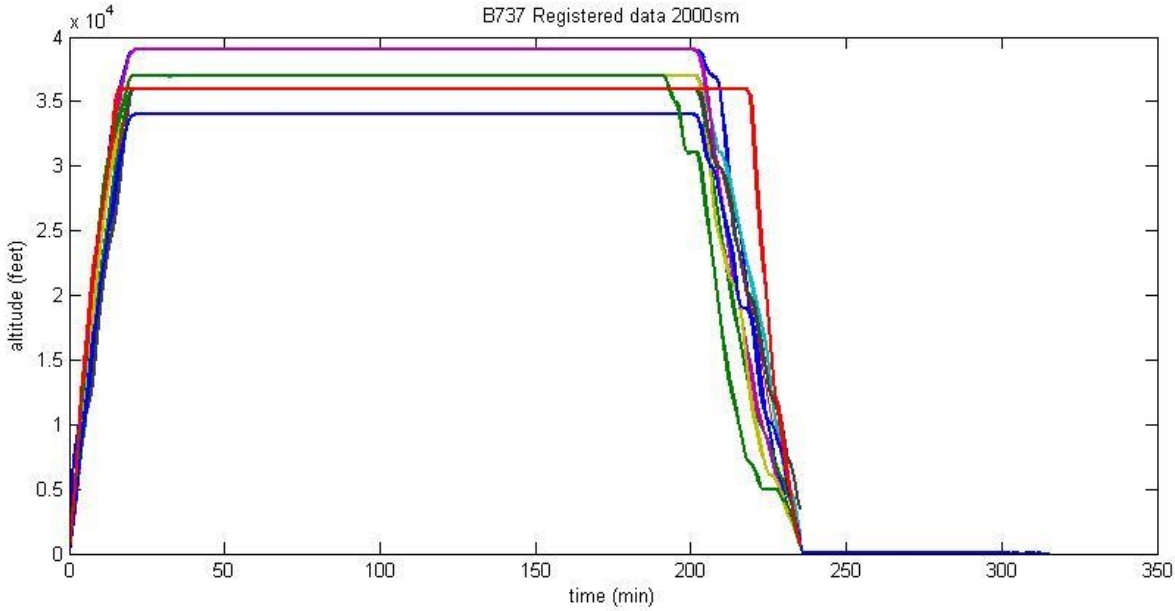


Διάγραμμα 5.1: Ευθυγραμμισμένα δεδομένα σε Matlab σε Boeing B737-700 για απόσταση 250 μιλίων

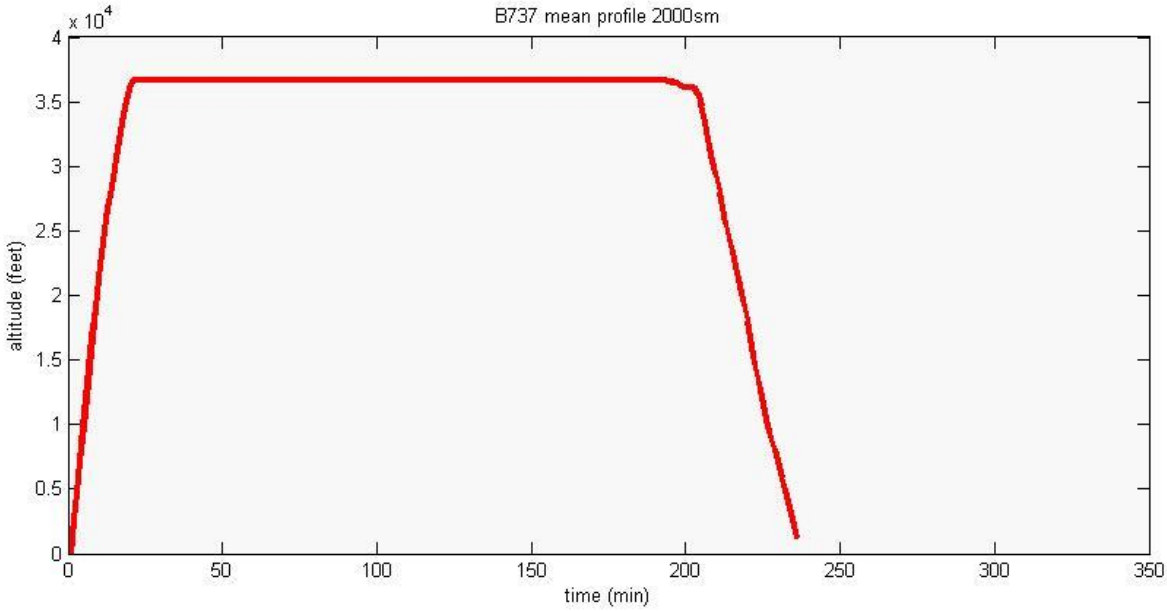


Διάγραμμα 5.2: Μέσο προφίλ πτήσης σε Matlab σε Boeing B737-700 για απόσταση 250 μιλίων

❖ Boeing B737-700, 2000 μίλια



Διάγραμμα 5.3: Ευθυγραμμισμένα δεδομένα σε Matlab σε Boeing B737-700 για απόσταση 2000 μιλίων



Διάγραμμα 5.4: Μέσο προφίλ πτήσης σε Matlab σε Boeing B737-700 για απόσταση 2000 μιλίων

6. Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

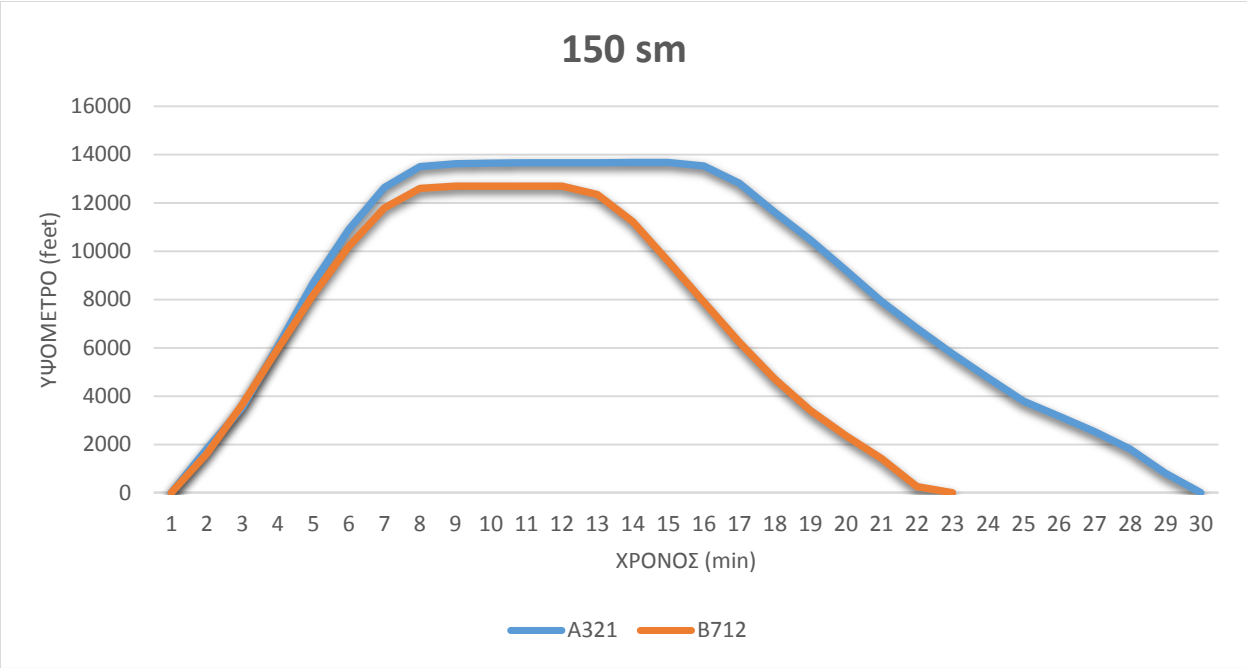
6.1 Προφίλ πτήσης τύπων αεροσκάφους ανά εύρος απόστασης

Παρουσιάζονται τα μέσα προφίλ, που έχουν προκύψει από τα ευθυγραμμισμένα πλέον στοιχεία, ανά εύρος απόστασης, έτσι ώστε να μπορούμε να κάνουμε παρατηρήσεις για τις διαφορές ανάμεσα στους εξεταζόμενους τύπους αεροσκαφών. Για λόγους συντομίας, οι τύποι αεροσκαφών θα γράφονται στη συνέχεια όπως φαίνεται ακολούθως:

Τύπος αεροσκάφους	Σύντομη γραφή
Airbus A319	A319
Airbus A321	A321
Boeing 737-700	B737
Boeing 737-300	B733
Boeing 717-200	B712
Boeing 767-300	B763
Boeing 757-200	B752
Boeing 777-200	B772

Πίνακας 6.1: Σύντομες γραφές τύπων αεροσκαφών

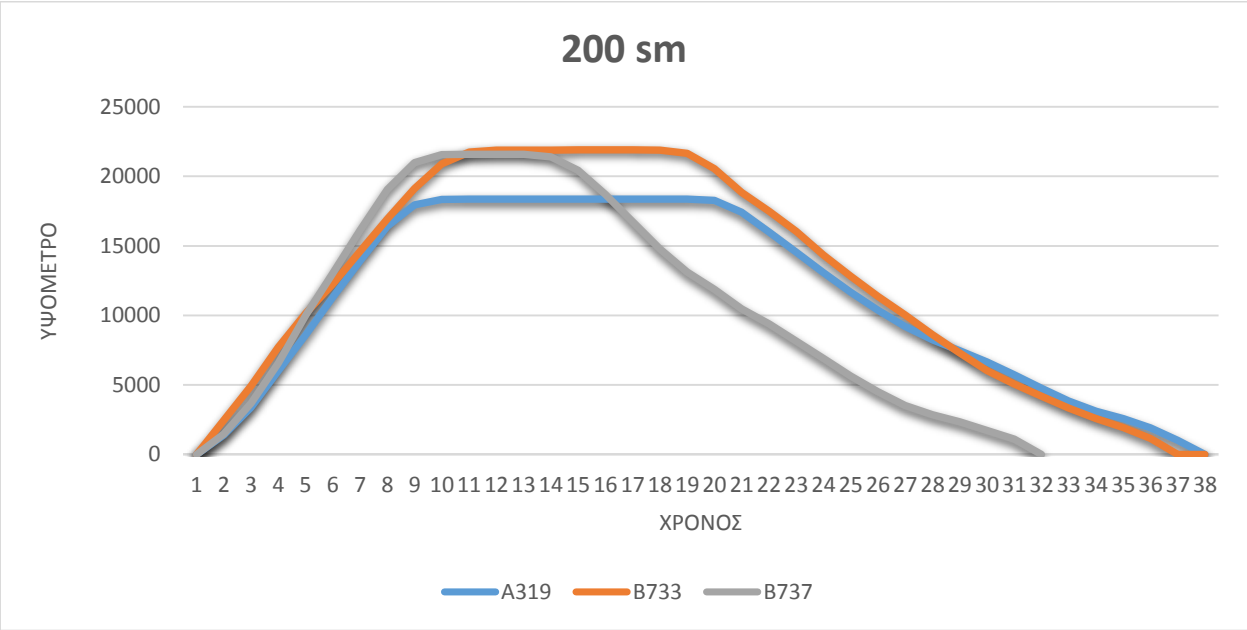
Απόσταση 150 sm



Διάγραμμα 6.1: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A321, B712

Για τις πτήσεις του μικρότερου εύρους απόστασης (150 μιλίων), δύο από τους πέντε τύπους αεροσκαφών εκτελούσαν δρομολόγιο ˙ το A321 και B712. Παρατηρούμε ότι το ύψος πλεύσης είναι χαμηλό και για τα δύο αεροσκάφη. Το A321 φτάνει κατά μέσο όρο σχεδόν τα 14000 πόδια, ενώ το B712 ξεπερνάει ελαφρώς τα 12000. Η κλίση κατά την άνοδο του αεροσκάφους είναι παρόμοια και για τους δύο τύπους, ενώ κατά την κάθοδο το B712 έχει ελαφρώς μεγαλύτερη κλίση. Η εμφανής χρονική απόκλιση οφείλεται στο ότι κατά τη συλλογή στοιχείων, για το ένα αεροσκάφος (A321) χρησιμοποιήθηκαν απόστάσεις ελαφρώς μεγαλύτερες των 150 μιλίων, ενώ για το άλλο (B712) αποστάσεις ελαφρώς μικρότερες των 150 μιλίων. Το τελικό υψόμετρο (υψόμετρο πλεύσης) επιτυγχάνεται μετά από περίπου 8 λεπτά ανόδου, ενώ η φάση καθόδου διαρκεί περίπου 10 λεπτά.

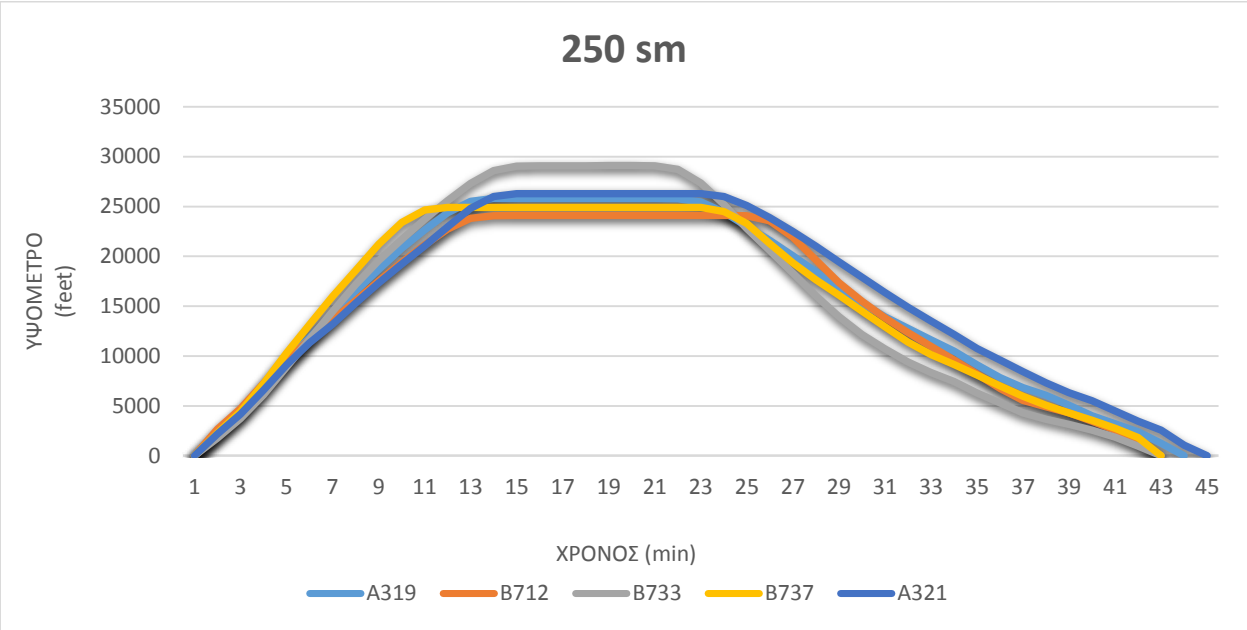
Απόσταση 200 sm



Διάγραμμα 6.2: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, B737, B733

Για το εν λόγω εύρος απόστασης έχουμε πτήσεις από τα αεροσκάφη A319, B737 και B733. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα προφίλ πτήσεων των αεροσκαφών A319 και B733 είναι παρόμοια˙ έχουμε παρόμοια κλίση στις φάσεις ανόδου και καθόδου, με την κλίση καθόδου να είναι πιο ήπια, ενώ το B733 πετάει κατά μέσο όρο σε μεγαλύτερο υψόμετρο (περίπου 22000 πόδια) από το A319 (18000 πόδια) για το συγκεκριμένο εύρος απόστασης. Ο χρόνος πλεύσης είναι περίπου ίδιος και στις δύο περιπτώσεις. Το μέσο προφίλ πτήσης του B737 διαφοροποιείται, καθώς όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα, παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη κλίση κατά την άνοδο και αναλογικά μικρότερο χρόνο στο ύψος πλεύσης (cruise time). Γενικά, για το συγκεκριμένο εύρος απόστασης, τα υψόμετρα πλεύσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από εκείνα του αμέσως μικρότερου εύρους (150 μιλίων). Ο μέσος χρόνος ανόδου είναι περίπου 10 λεπτά, ενώ ο μέσος χρόνος καθόδου 16 λεπτά. Η μέση συνολική διάρκεια πτήσης είναι περίπου 36 λεπτά.

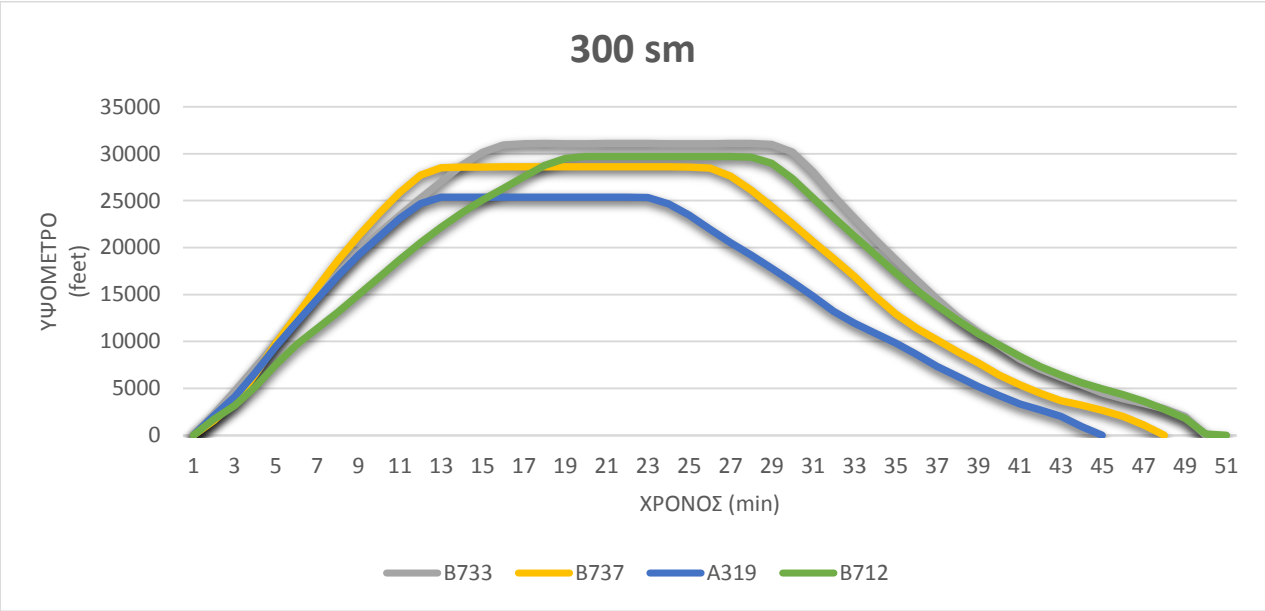
Απόσταση 250 sm



Διάγραμμα 6.3: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733

Σε αυτό το εύρος απόστασης διατίθενται στοιχεία και για τους πέντε εξεταζόμενους τύπους αεροσκαφών. Η γενική εικόνα του προφίλ πτήσης είναι παρόμοια για σχεδόν όλα τα αεροσκάφη. Τα A319, A321, B737, B712 στο υψόμετρο πλεύσης φτάνουν περίπου τα 2500 πόδια. Διαφοροποιείται το B733, το οποίο φτάνει σχεδόν τα 3000 πόδια κατά τη φάση πλεύσης, με συνέπεια να έχει αυξημένους χρόνους ανόδου και καθόδου σε σχέση με τα υπόλοιπα αεροσκάφη, άρα και μικρότερη διάρκεια της φάσης πλεύσης. Επίσης, το B737 έχει ελαφρώς μεγαλύτερη κλίση κατά τη φάση ανόδου συγκριτικά με τα υπόλοιπα αεροσκάφη. Και πάλι τα μέγιστα υψόμετρα που φτάνουν τα αεροσκάφη είναι μεγαλύτερα από εκείνα του προηγούμενου, μικρότερου εύρους απόστασης. Αυτό έχει ως συνέπεια να έχουν αυξηθεί οι μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου, οι οποίοι πλέον είναι προσεγγιστικά 13 και 20 λεπτά αντιστοίχως. Η μέση συνολική διάρκεια πτήσης είναι περίπου 43 λεπτά.

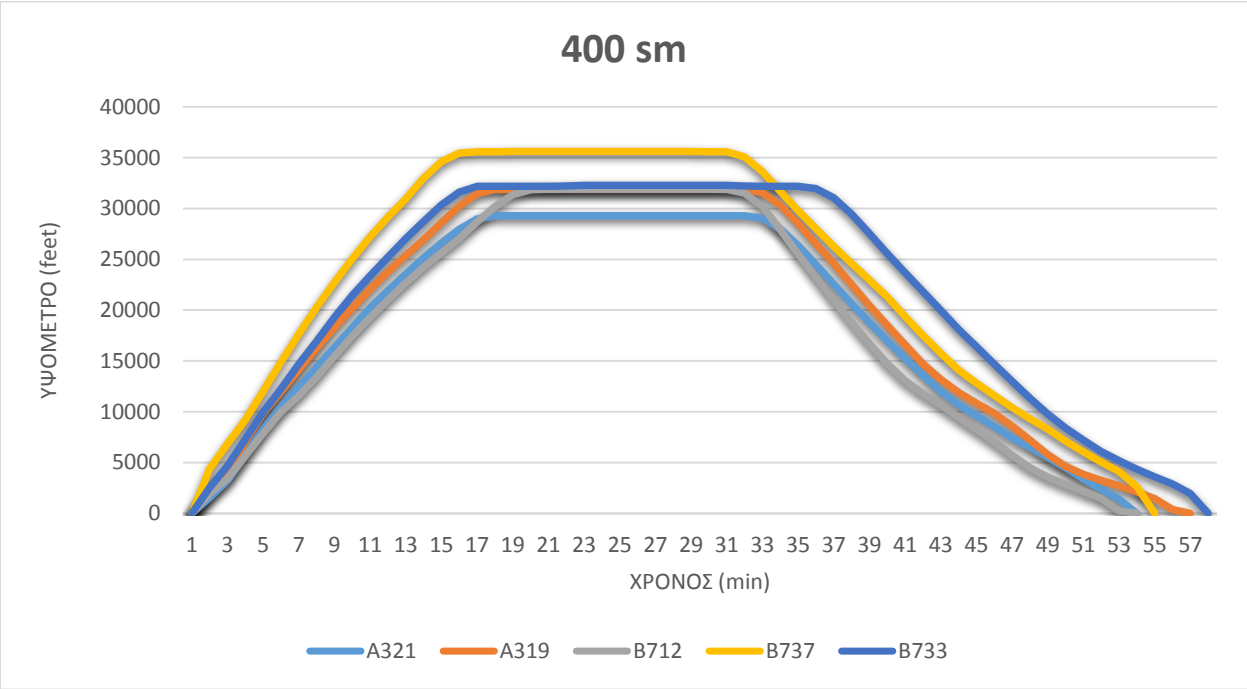
Απόσταση 300 sm



Διάγραμμα 6.4: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733

Για αυτό το εύρος απόστασης, παρατηρούμε ότι κανένα από τα προφίλ πτήσης δεν είναι πανομοιότυπο με κάποιο άλλο. Όσον αφορά τα υψόμετρα πλεύσης, το χαμηλότερο είναι εκείνο του A319, στα 25000 πόδια, ενώ το υψηλότερο είναι αυτό του B733, στα 31000 πόδια. Τα A319, B737, B733 παρουσιάζουν παρεμφερή κλίση κατά την άνοδο, ενώ σημαντικά ηπιότερη κλίση παρουσιάζει το B712. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι το B712 εμφανίζει κλίση καθόδου και υψόμετρο πλεύσης παρόμοια με των υπολοίπων, οδηγεί στο να έχει μικρότερο χρόνο πλεύσης. Κατά την κάθοδο, περισσότερο διαφοροποιείται το προφίλ του A319, παρουσιάζοντας μια ηπιότερη κλίση από τα υπόλοιπα αεροσκάφη. Οι μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου προσεγγιστικά είναι 15 και 20 λεπτά αντιστοίχως, ενώ η μέση συνολική διάρκεια πτήσης είναι περίπου 48 λεπτά.

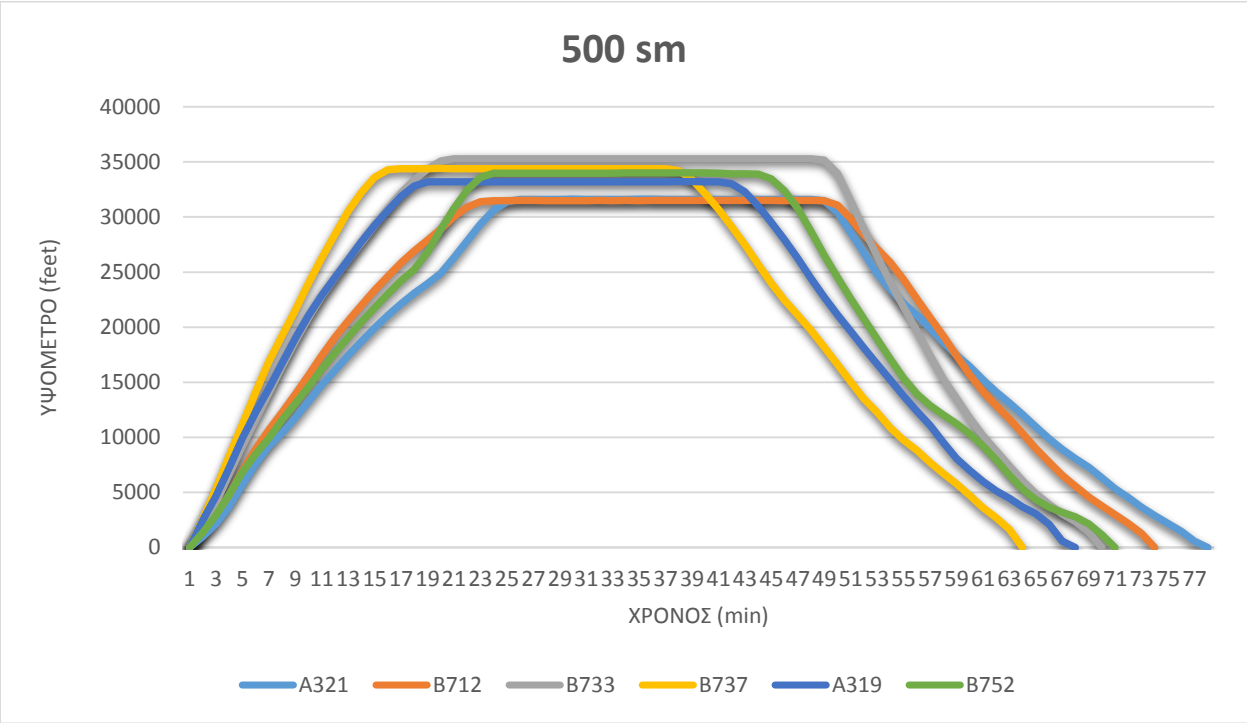
Απόσταση 400 sm



Διάγραμμα 6.5: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733

Για τις αποστάσεις της τάξης των 400 μιλίων, παρατηρούμε ότι σχεδόν όλα τα αεροσκάφη ξεπερνούν κατά μέσο όρο τα 30000 πόδια κατά τη φάση πλεύσης. Ελαφρώς πιο αυξημένο είναι το μέσο υψόμετρο πλεύσης για το B737, το οποίο φτάνει τα 35000 πόδια. Η μεγαλύτερη διάρκεια στη φάση πλεύσης είναι περίπου 25 λεπτά, για το αεροσκάφος B733. Κατά την άνοδο, διαφοροποιείται το B737 το οποίο παρουσιάζει αυξημένη κλίση συγκριτικά με τα υπόλοιπα αεροσκάφη. Κατά μέσο όρο, η φάση ανόδου διαρκεί 17 λεπτά και η φάση καθόδου 20. Η μέση συνολική διάρκεια πτήσης είναι περίπου 55 λεπτά. Στο σημείο αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι κλίση ανόδου τείνει να είναι σταθερά πιο απότομη από την κλίση καθόδου. Το γεγονός αυτό πιθανώς συνδέεται με τα στοιχεία σχετικά με το δείκτη κόστους (CI) που παρουσιάζονται στις εικόνες 2.12 και 2.13 της ενότητας 2.4. Δηλαδή, πιθανώς η στρατηγική αυτή ακολουθείται διότι είναι συμφέρουσα όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου.

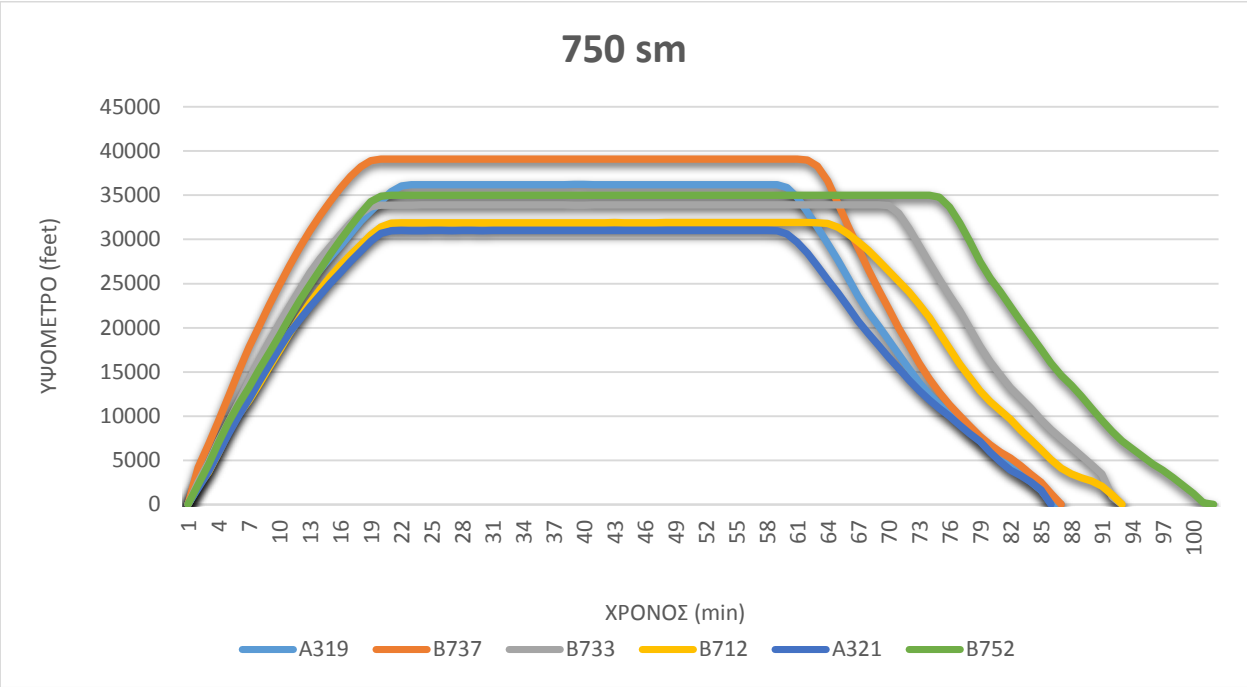
Απόσταση 500 sm



Διάγραμμα 6.6: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733, B752

Στο παρόν διάγραμμα είναι άξιο προσοχής το ότι υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τις κλίσεις ανόδου. Τη μεγαλύτερη κλίση παρουσιάζει το B737, με τα A319 και B733 να ακολουθούν. Ακόμη ηπιότερη κλίση ανόδου εμφανίζει το B712, ενώ η μικρότερη κλίση είναι αυτή του A321. Κατά την κάθοδο, οι κλίσεις των B737, A319 και A321 είναι περίπου ίδιες, με αυτή του B712 να είναι ελαφρώς πιο απότομη. Η μεγαλύτερη κλίση καθόδου είναι αυτή του B733, η οποία είναι εμφανώς πιο απότομη των υπολοίπων. Τα υψόμετρα πλεύσης κυμαίνονται ανάμεσα στα 30000 με 35000 πόδια. Λόγω των διαφοροποιήσεων μεταξύ των κλίσεων, διαφέρουν και οι αντίστοιχοι χρόνοι ανόδου και καθόδου, αφού τα υψόμετρα πλεύσης είναι παρεμφερή. Οι χρόνοι ανόδου είναι από 17 έως 23 λεπτά, ενώ οι χρόνοι καθόδου 18 έως 24 λεπτά. Η μέση συνολική διάρκεια πτήσης ξεπερνά για πρώτη φορά τη μία ώρα, φτάνοντας περίπου τα 70 λεπτά.

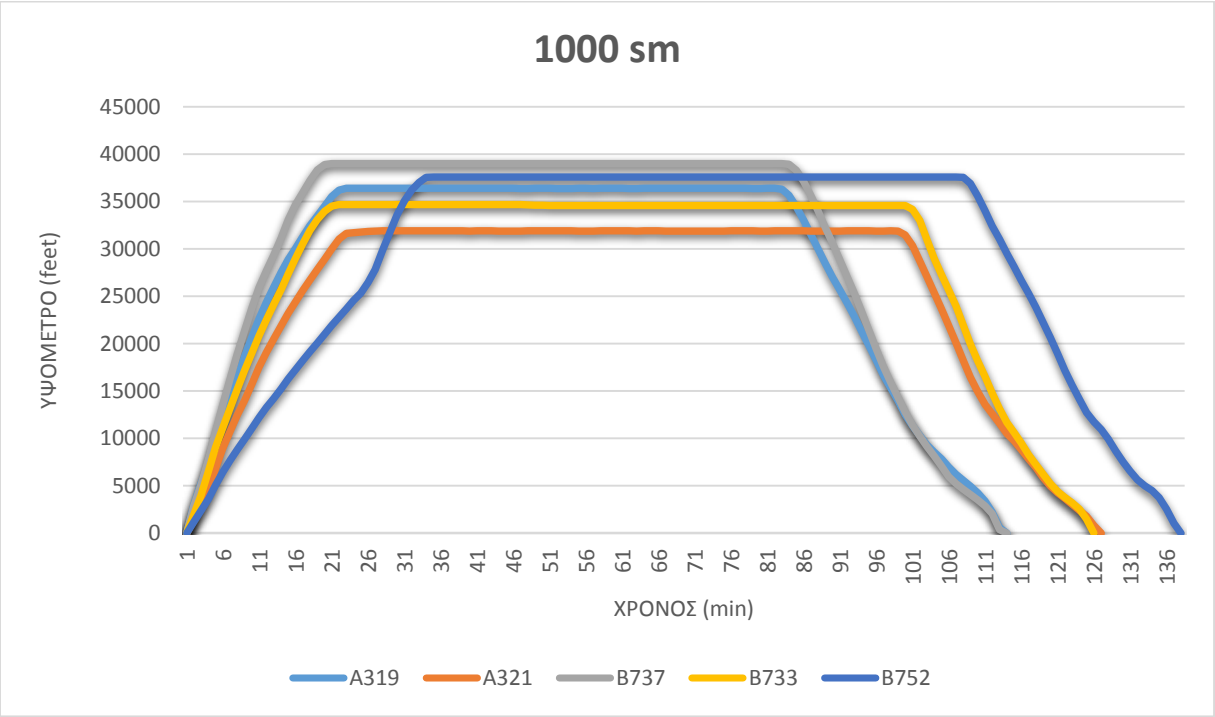
Απόσταση 750 sm



Διάγραμμα 6.7: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B712, B737, B733, B752

Για το εύρος απόστασης των 750 sm, τα υψόμετρα πλεύσης έχουν τιμές ανάμεσα στα 30000 και 40000 πόδια. Το υψόμετρο πλεύσης των 40000 ποδιών είναι αυτό του B737, το οποίο εκτός από το μεγαλύτερο υψόμετρο πλεύσης, παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη κλίση κατά τη φάση ανόδου. Οι κλίσεις των υπολοίπων αεροσκαφών είναι παρεμφερείς. Κατά την κάθοδο, το μόνο αεροσκάφος που διαφοροποιείται ελαφρώς είναι το B712, παρουσιάζοντας ηπιότερη κλίση. Οι μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου είναι αμφότεροι 20 λεπτά κατά προσέγγιση. Η μέση συνολική διάρκεια πτήσης είναι περίπου 88 λεπτά. Άξιο παρατήρησης είναι επίσης, το γεγονός ότι για πρώτη φορά η διάρκεια της φάσης πλεύσης είναι μεγαλύτερη από τη διάρκεια των φάσεων ανόδου και καθόδου.

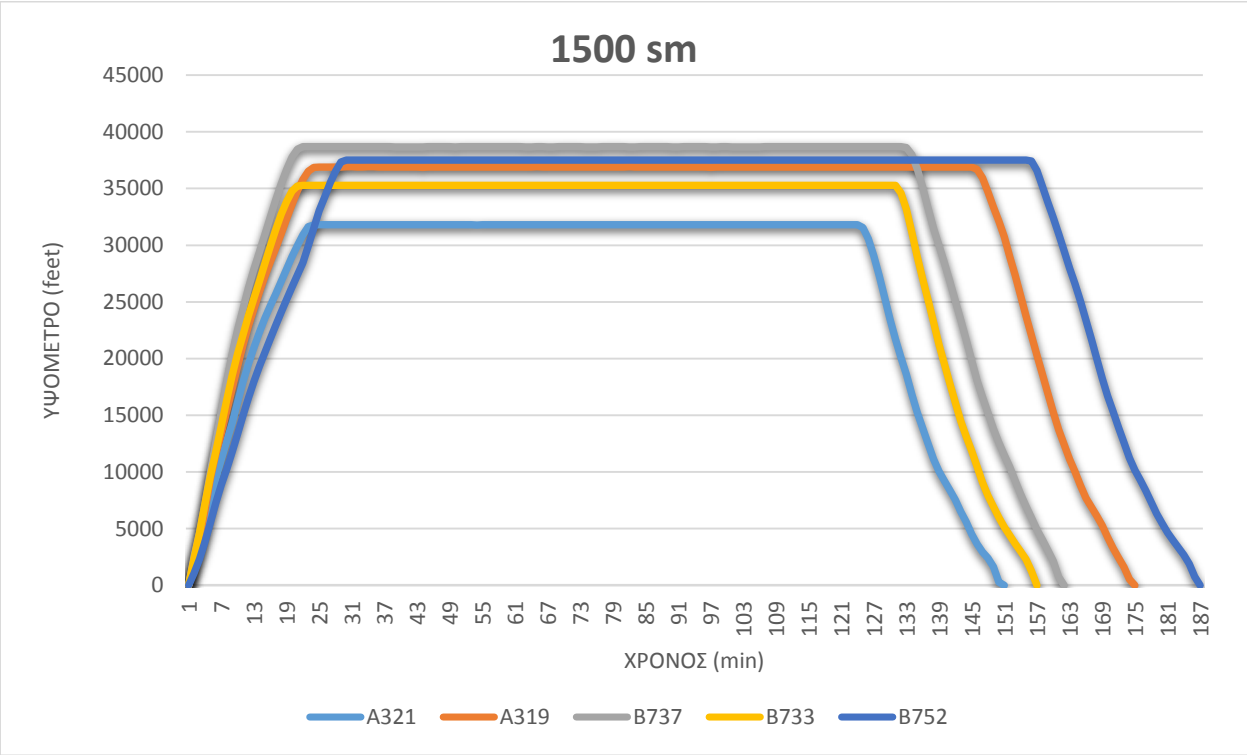
Απόσταση 1000 sm



Διάγραμμα 6.8: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B737, B733, B752

Όπως και για το προηγούμενο, για αυτό το εύρος, τα υψόμετρα πλεύσης των αεροσκαφών κυμαίνονται από 3000 έως 40000 πόδια. Τα προφίλ πλέον παρουσιάζουν ένα πιο σταθερό τραπεζοειδές σχήμα. Οι διαφοροποιήσεις στις κλίσεις καθόδου είναι αμυδρές, ενώ στις κλίσεις ανόδου, το B737 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη και το B752 εμφανώς τη μικρότερη. Η μέση διάρκεια των φάσεων ανόδου (περίπου 21 λεπτά) και καθόδου (περίπου 23 λεπτά) αποτελεί ένα ακόμη μικρότερο κλάσμα της μέσης συνολικής διάρκειας πτήσης, η οποία φτάνει τα 120 λεπτά, δηλαδή τις 2 ώρες.

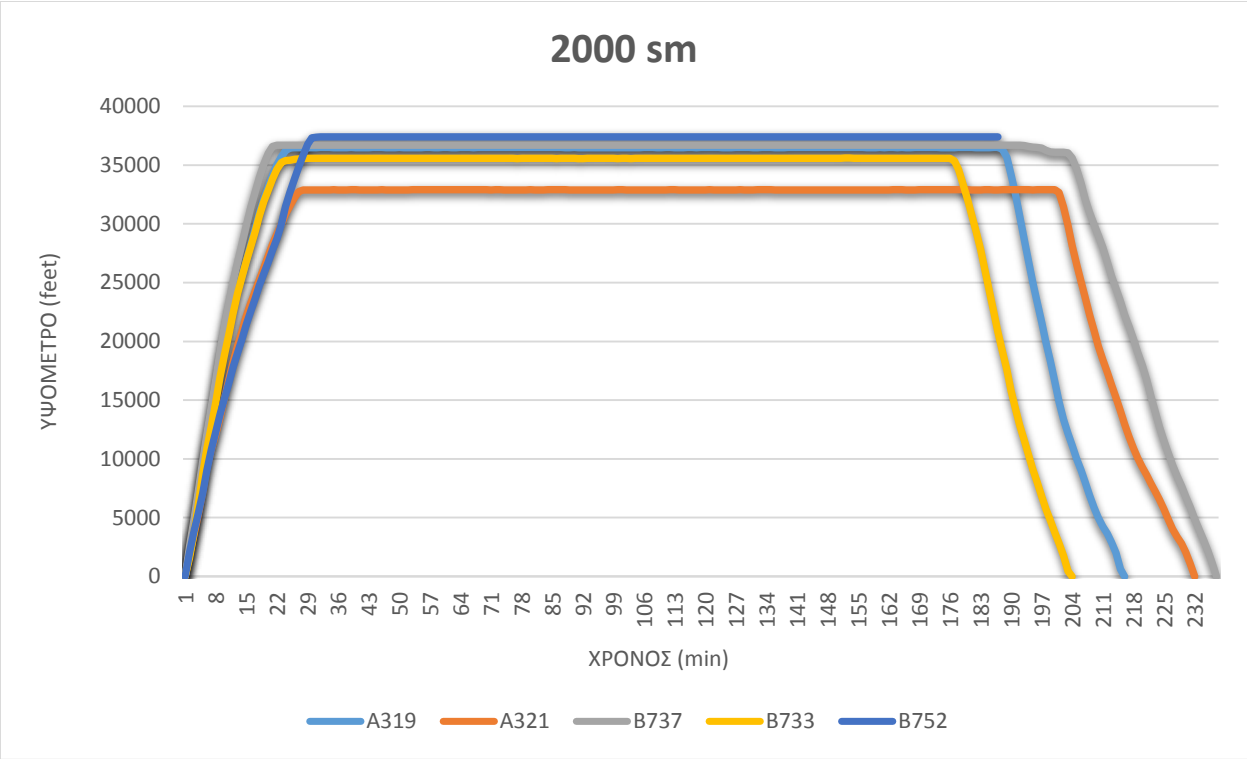
Απόσταση 1500 sm



Διάγραμμα 6.9: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B737, B733, B752

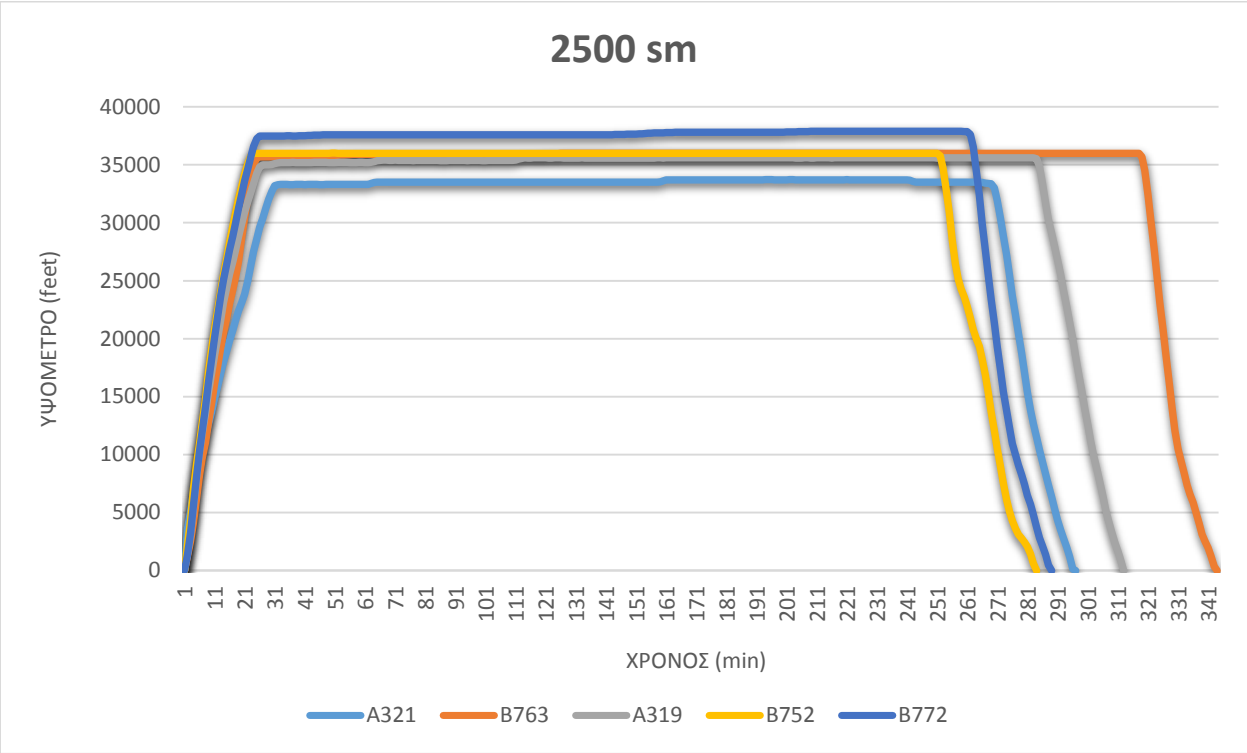
Και πάλι, τα υψόμετρα πλεύσης βρίσκονται ανάμεσα στα 30000 και στα 40000 πόδια και οι κλίσεις ανόδου και καθόδου δεν διαφοροποιούνται σημαντικά ανάμεσα στους τύπους αεροσκαφών. Ο μέσος χρόνος ανόδου είναι περίπου 20 λεπτά, ενώ ο αντίστοιχος μέσος χρόνος για την κάθοδο είναι 23 λεπτά. Είναι φυσικό αυτοί οι χρόνοι να είναι αυξημένοι σε σχέση με τους αντίστοιχους για τις μικρότερες αποστάσεις, αφού, όπως είναι εμφανές, το υψόμετρο πλεύσης των αεροσκαφών είναι μεγαλύτερο. Η μέση συνολική διάρκεια πτήσης είναι περίπου 160 λεπτά.

Απόσταση 2000 sm



Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τα προφίλ πτήσεων για αποστάσεις εύρους 2000 μιλίων. Οι διαφοροποιήσεις όσον αφορά το υψόμετρο πλεύσης και τις κλίσεις ανόδου και καθόδου, είναι μικρές. Η διάρκεια των φάσεων ανόδου και καθόδου αποτελούν πλέον ένα μικρό κλάσμα της συνολικής διάρκειας πτήσης, η οποία κατά μέσο όρο είναι περίπου 220 λεπτά. Η άνοδος διαρκεί περίπου 25 λεπτά, ενώ η κάθοδος 30. Η απόσταση εύρους 2000 μιλίων είναι η μεγαλύτερη στην οποία εκτελούν δρομολόγια τα αεροσκάφη Boeing της οικογένειας 737, δηλαδή τα Boeing 737-300 και 737-700.

Απόσταση 2500 sm

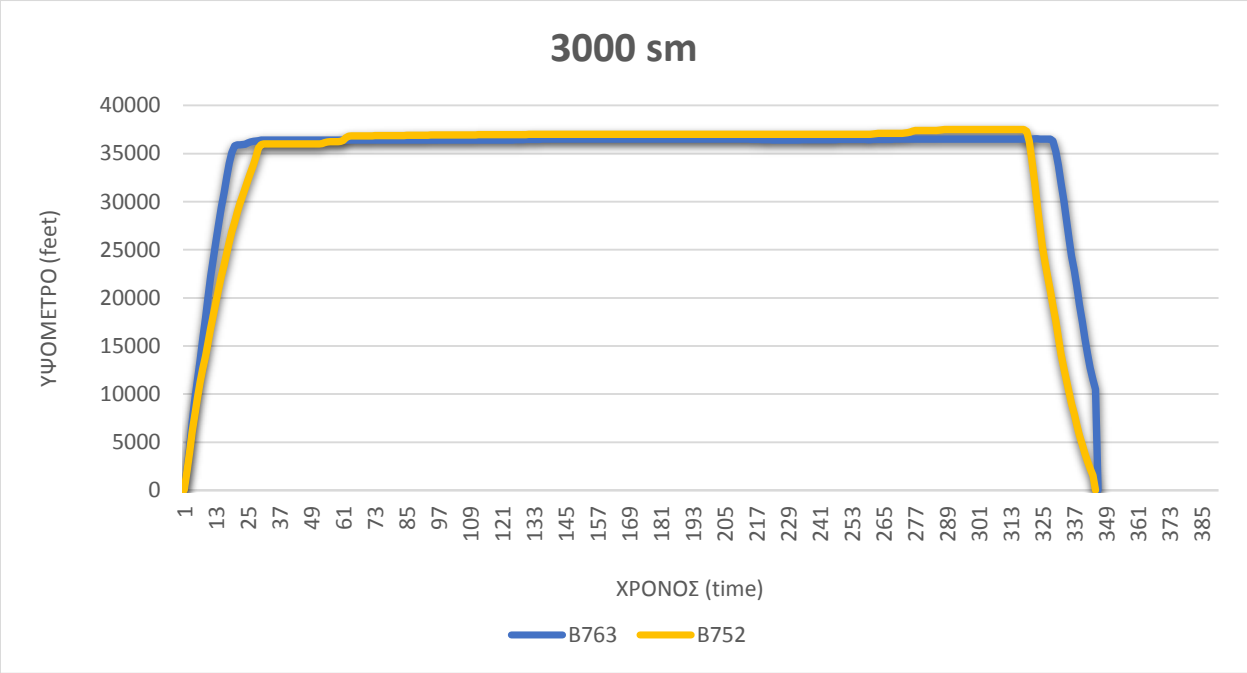


Διάγραμμα 6.10: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη A319, A321, B763, B752, B772

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τα προφίλ πτήσεων για αποστάσεις εύρους 2500 μιλίων. Η απόσταση εύρους 2500 μιλίων είναι η μεγαλύτερη στην οποία εκτελούν δρομολόγια τα αεροσκάφη Airbus της οικογένειας A320, δηλαδή τα Airbus A319 και A321, καθώς οι μεγαλύτερες αποστάσεις αποτελούν πτήσεις μεγάλων αποστάσεων (long haul flights), τις οποίες τα εν λόγω αεροσκάφη αδυνατούν να πραγματοποιήσουν. Για πρώτη φορά παρουσιάζονται στοιχεία για τα Boeing 763 και 772, τα οποία εκτελούν πτήσεις μεγάλων αποστάσεων. Το βασικότερο όμως που παρατηρεί κανείς, είναι ότι πλέον το μέσο υψόμετρο κατά τη φάση πλεύσης δεν παραμένει σταθερό, όπως στα μέσα προφίλ πτήσης για τις μικρότερες αποστάσεις, αλλά αυξάνεται ελαφρώς, σταδιακά με το χρόνο. Το γεγονός αυτό αποτελεί ενδιαφέρον εύρημα, καθώς έρχεται σε συμφωνία με την εικόνα του μέσου προφίλ πτήσης μεγάλων αποστάσεων που παρουσιάζεται από τη Dorothée Merle στην εργασία της, «Flight path optimization for an airplane» του 2011. Η σταδιακή αυτή ανύψωση του αεροσκάφους κατά τη φάση πλεύσης, όπως εξηγείται και στην πρώτη παράγραφο του 3^{ου} κεφαλαίου, οφείλεται στη μείωση του βάρους του αεροσκάφους που προκύπτει από την κατανάλωση καυσίμου και σε συνδυασμό με τη λειτουργία των κινητήρων σε σταθερή ισχύ, οδηγεί σε υπερίσχυση της κατακόρυφης συνιστώσας της δύναμης ανύψωσης, έναντι αυτής του βάρους. Διαπιστώθηκε

κατά τη συλλογή στοιχείων ότι η διαφοροποίηση αυτή παρουσιάζεται με διττό τρόπο στα μεμονωμένα προφίλ πτήσης ˙ είτε το αεροσκάφος διανύει κάποιο μέρος της φάσης πλεύσης σε σταθερό υψόμετρο και σε κάποιο σημείο ανεβαίνει ένα ή περισσότερα «σκαλοπάτια» της τάξεως των 2000 έως 3000 χιλιάδων ποδιών, είτε σπανιότερα, η ανύψωση είναι συνεχής από την αρχή έως το τέλος της φάσης πλεύσης. Τα μέσα υψόμετρα πλεύσης είναι γύρω στα 35000 πόδια, ενώ οι κλίσεις ανόδου και καθόδου είναι παρεμφερείς για όλους τους τύπους αεροσκαφών, εκτός από την κλίση ανόδου του Boeing 772 η οποία παρουσιάζει μια απότομη διαφοροποίηση περί τα 15000 πόδια.

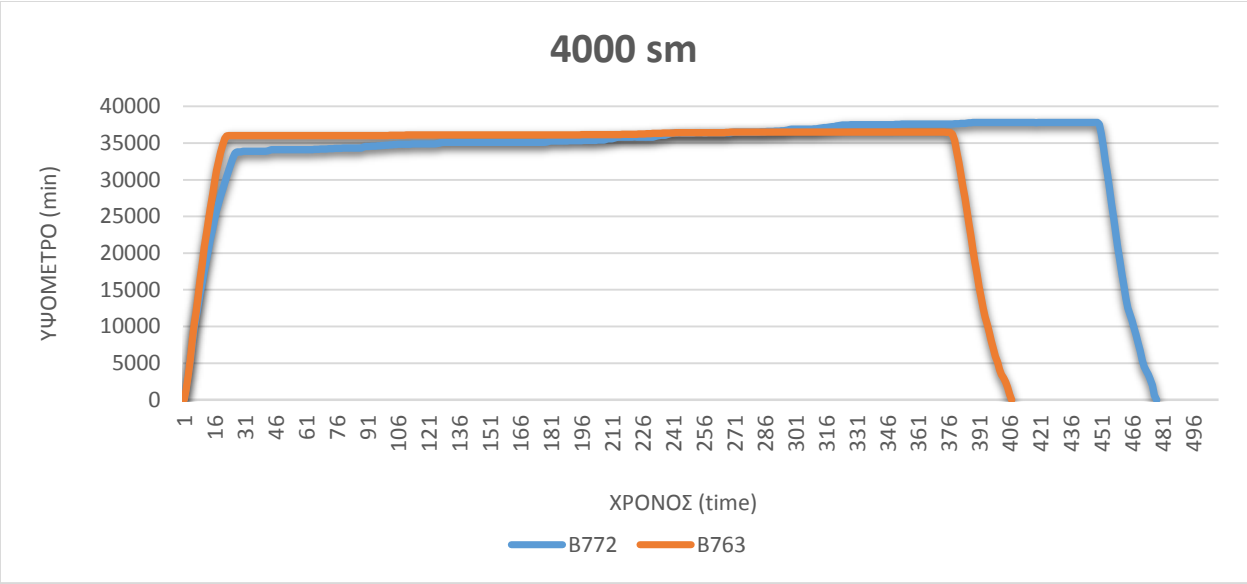
Απόσταση 3000 sm



Διάγραμμα 6.11: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη B763, B752

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τα προφίλ πτήσεων για αποστάσεις εύρους 3000 μιλίων, οι οποίες βρίσκονται στο κατώφλι των πτήσεων θεωρούμενων μεγάλης απόστασης (long haul), καθώς ξεπερνούν το χρονικό όριο των έξι ωρών. Όπως και στο ακριβώς προηγούμενο διάγραμμα, αυτό για τις αποστάσεις των 2500 μιλίων, παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση του υψομέτρου του αεροσκάφους κατά τη φάση πλεύσης.Το υψόμετρο πλεύσης είναι και πάλι περίπου 35000 πόδια και οι κλίσεις καθόδου πρακτικά ίδιες για τους δύο τύπους αεροσκαφών.

Απόσταση 4000 sm

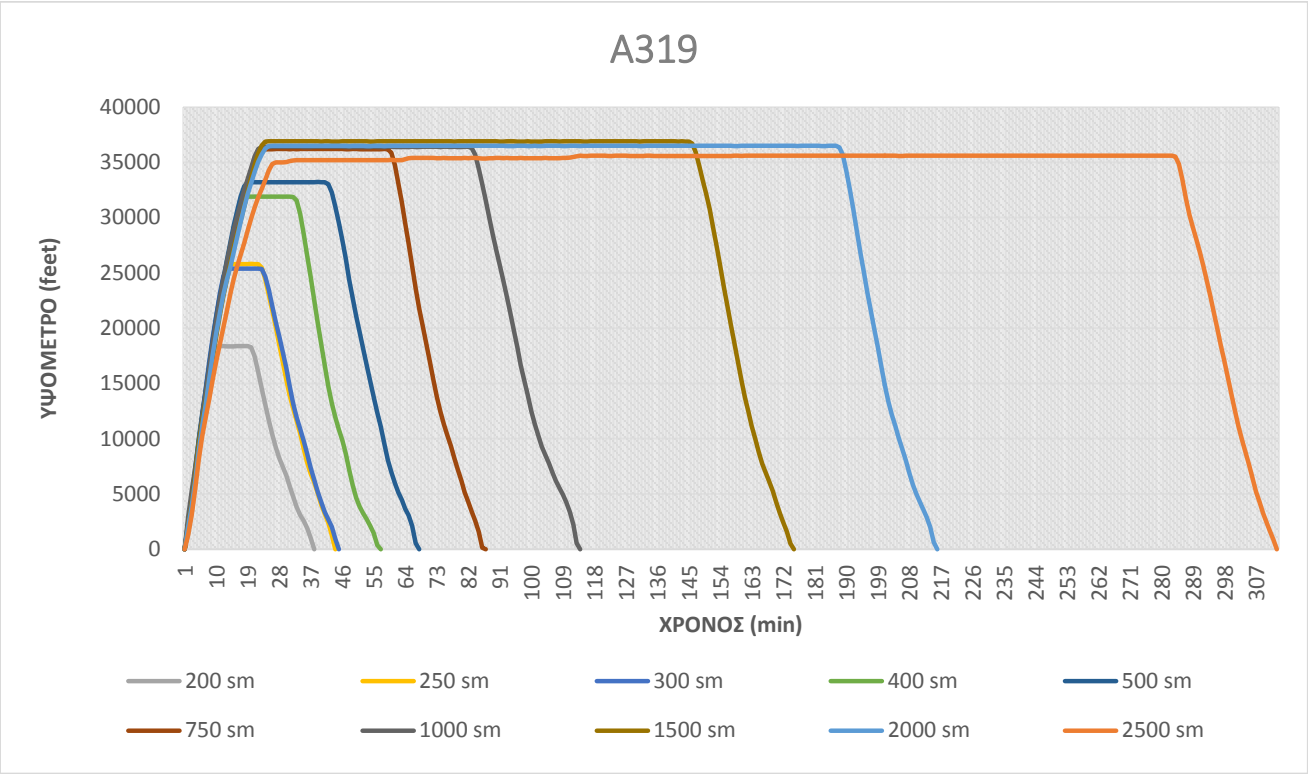


Διάγραμμα 6.12: Μέσο προφίλ πτήσης για τα αεροσκάφη B763, B772

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τα μέσα προφίλ πτήσης για το μεγαλύτερο εύρος απόστασης που εξετάζει η παρούσα εργασία˙ αυτό των 4000 μιλίων, στο οποίο ανήκουν πτήσεις μεγάλων αποστάσεων. Τα εξεταζόμενα αεροσκάφη B763 και B772 που είναι σχεδιασμένα για πτήσεις μεγάλων απόστασης εκτελούν τα δρομολόγια αυτά. Η συνολική διάρκεια πτήσης είναι επτά με οκτώ ώρες και εμφανίζεται και πάλι μια σταδιακή αύξηση του υψομέτρου του αεροσκάφους κατά τη φάση πλεύσης. Επίσης, το μέσο προφίλ πτήσης του B772 είναι αυτό με τη μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης και ταυτόχρονα αυτό που παρουσιάζει την εντονότερη ανοδική τάση αύξησης του υψομέτρου κατά την πλεύση. Το υψόμετρο πλεύσης κυμαίνεται πάλι κοντά στα 35000 πόδια και οι κλίσεις ανόδου και καθόδου παρόμοιες για τους δύο τύπους αεροσκαφών.

6.2 Προφίλ πτήσης σε κάθε εύρος απόστασης ανά τύπο αεροσκάφους

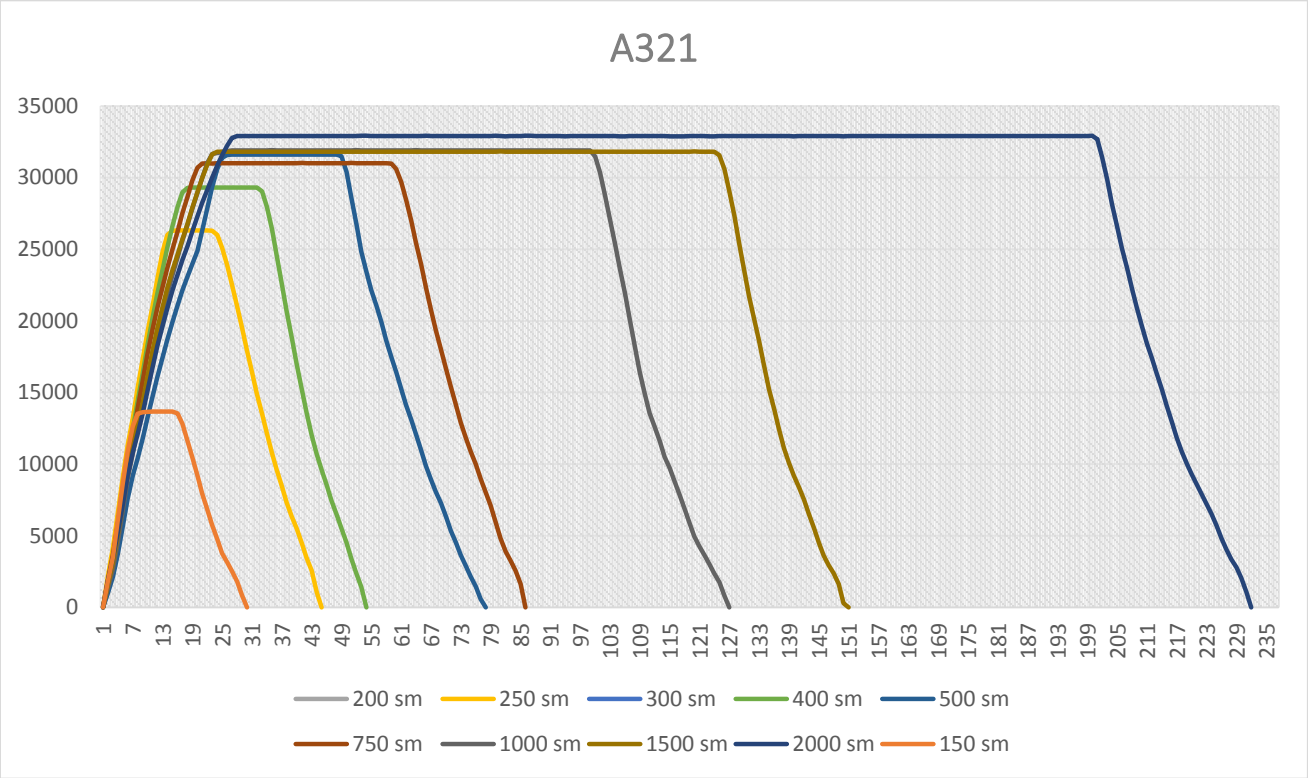
Airbus A319



Διάγραμμα 6.13: Προφίλ πτήσης A319

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται τα προφίλ πτήσης του αεροσκάφους A319 για τα διάφορα εύρη απόστασης. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το μήκος πτήσης, αυξάνεται και το υψόμετρο πλεύσης, μέχρι και το εύρος των 750 μιλίων, πάνω από το οποίο το υψόμετρο πλεύσης σταθεροποιείται περίπου στα 36000 πόδια. Η κλίση του αεροσκάφους κατά τη φάση ανόδου είναι παρεμφερής για όλα τα εύρη απόστασης. Το ίδιο ισχύει και για τη φάση καθόδου, με εξαίρεση ίσως τις μικρότερες αποστάσεις – του εύρους των 200 μιλίων - όπου η κλίση εμφανίζεται αμυδρώς ηπιότερη. Λόγω των παρόμοιων κλίσεων, οι αντίστοιχοι χρόνοι ανόδου και καθόδου αυξάνονται, όσο αυξάνεται και το υψόμετρο πλεύσης. Δηλαδή, οι χρόνοι ανόδου και καθόδου αυξάνονται έως και το εύρος απόστασης των 750 μιλίων, όπου σταθεροποιούνται προσεγγιστικά στα 23 και 28 λεπτά αντιστοίχως.

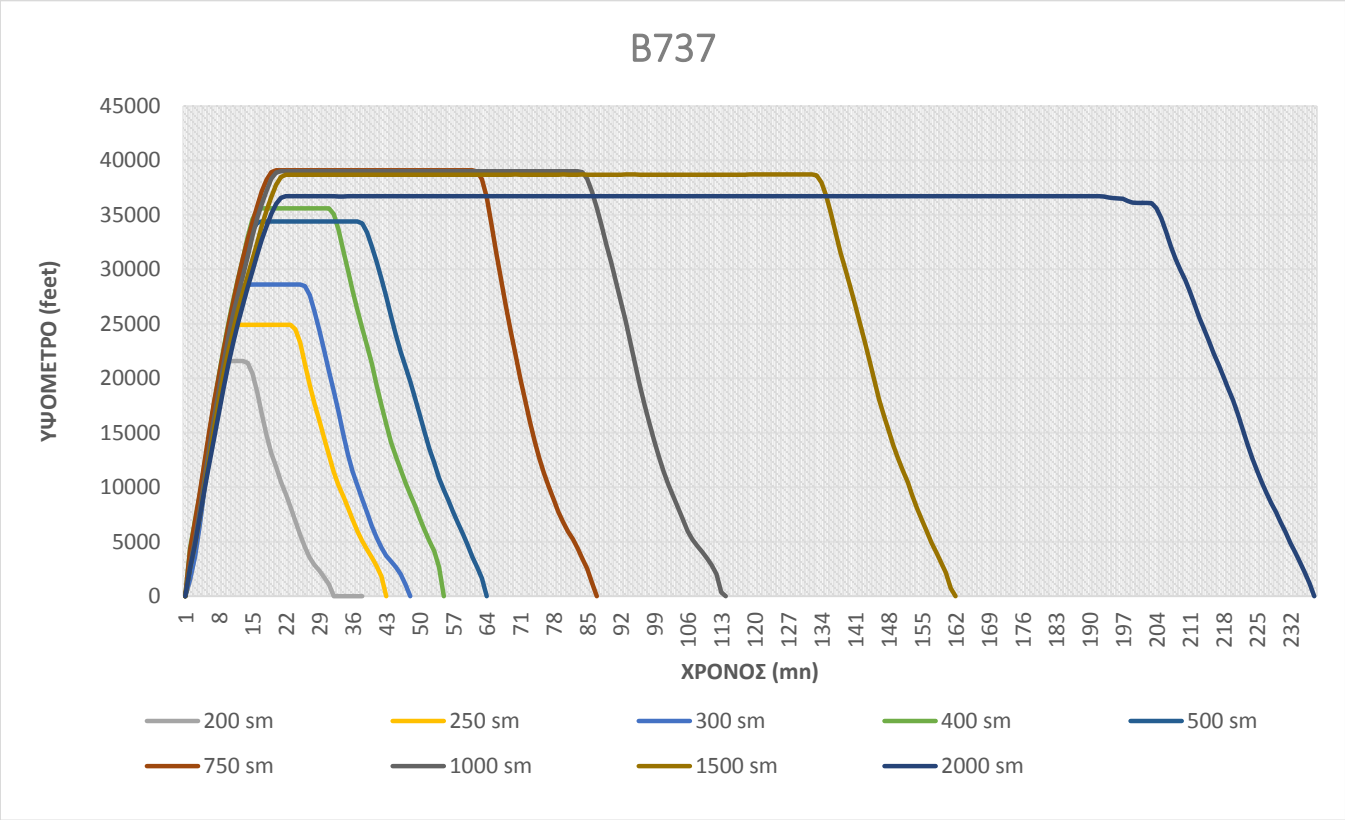
Airbus A321



Διάγραμμα 6.14: Προφίλ πτήσης A321

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται τα προφίλ πτήσης του αεροσκάφους A321 για τα διάφορα εύρη απόστασης. Και πάλι παρουσιάζεται η τάση αύξησης του υψομέτρου πλεύσης όσο μεγαλώνει το μήκος του ταξιδίου. Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 500 μιλίων, το υψόμετρο πλεύσης είναι σταθερά πάνω από την τιμή των 30000 ποδιών, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 33000 πόδια, για αποστάσεις της τάξης των 2000 sm. Οι κλίσεις κατά την κάθοδο είναι παρεμφερείς, ενώ κατά την άνοδο διαφοροποιούνται ελαφρώς. Η πιο απότομη κλίση ανόδου συναντάται στο μικρότερο εύρος απόστασης, ενώ η ηπιότερη στο μεγαλύτερο εύρος απόστασης. Το A321 χρειάζεται περίπου 8 λεπτά για να φτάσει στο υψόμετρο πλεύσης σε ένα δρομολόγιο απόστασης της τάξης των 150 μιλίων, και 23 λεπτά για να φτάσει στο υψόμετρο πλεύσης για αποστάσεις άνω των 750 μιλίων.

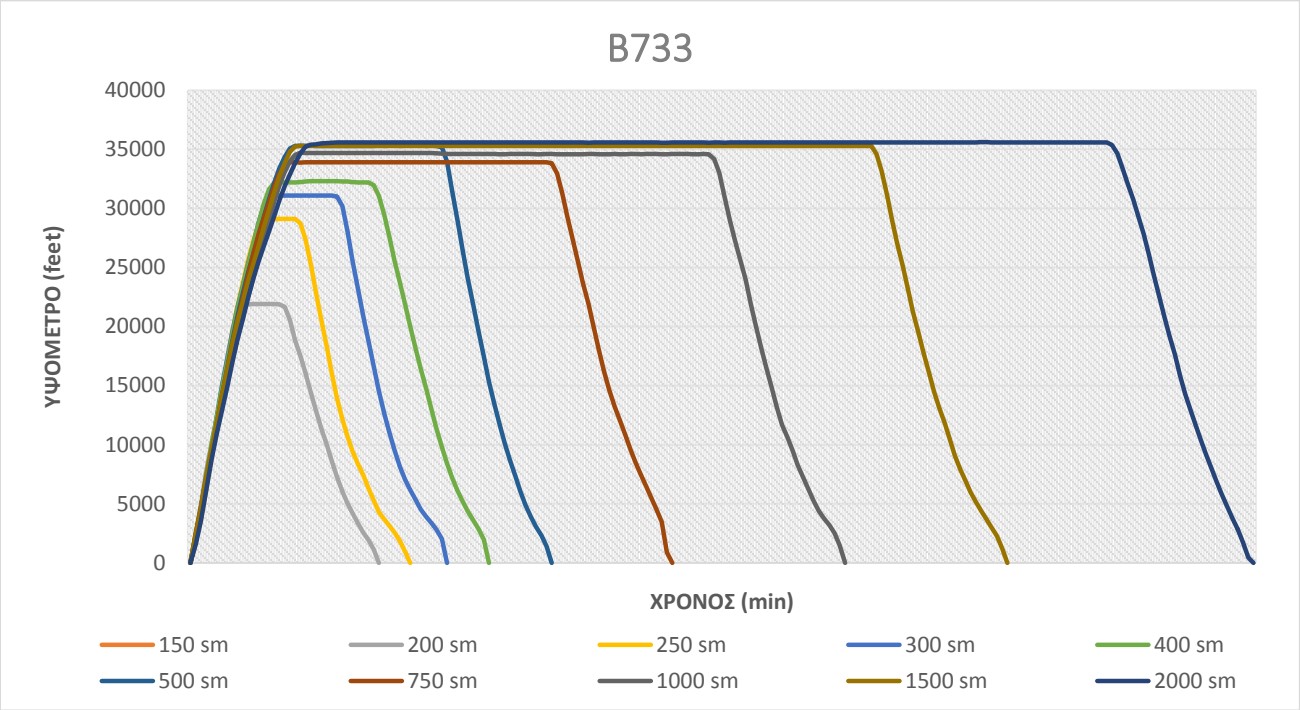
Boeing 737



Διάγραμμα 6.15: Προφίλ πτήσης B737

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται τα προφίλ πτήσης του αεροσκάφους B737 για τα διάφορα εύρη απόστασης. Η τάση που παρατηρήθηκε στα παραπάνω διαγράμματα για τα αεροσκάφη A319, A321, για αύξηση του υψομέτρου πλεύσης με την αύξηση του μήκους ταξιδίου, εδώ εμφανίζεται μέχρι και τα 400 μίλια, όπου εμφανίζεται η τιμή των 35000 ποδιών. Από τα 400 μίλια και για μεγαλύτερες αποστάσεις, το υψόμετρο πλεύσης παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις, κυμαινόμενο μεταξύ των 34000 και των 39000 ποδιών. Η κλίση του αεροσκάφους κατά τη φάση ανόδου είναι παρεμφερής για όλα τα εύρη απόστασης. Το ίδιο ισχύει και για τη φάση καθόδου. Έτσι, ο μέγιστος χρόνος ανόδου και καθόδου είναι αυτός που αντιστοιχεί σε πτήση με υψόμετρο πλεύσης τα 39000 πόδια και είναι προσεγγιστικά 20 και 23 λεπτά αντιστοίχως.

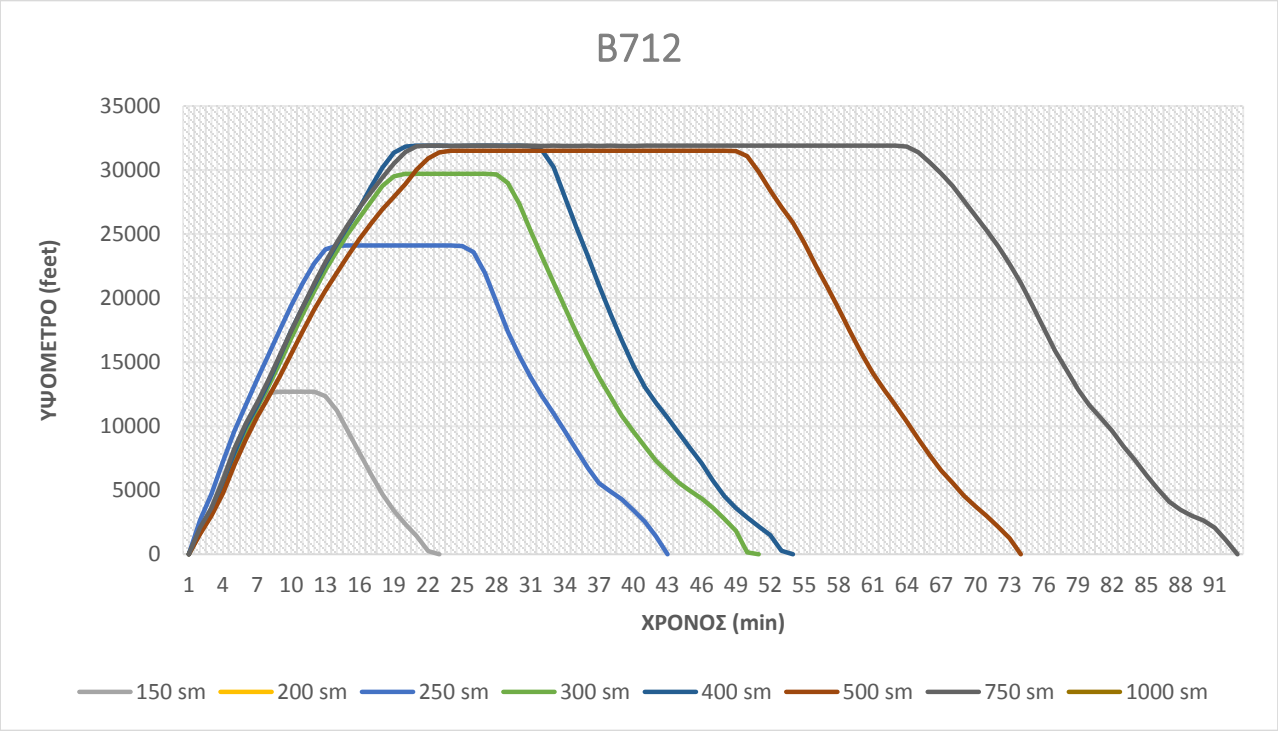
Boeing 733



Διάγραμμα 6.16: Προφίλ πτήσης B733

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται τα προφίλ πτήσης του αεροσκάφους B733 για τα διάφορα εύρη απόστασης. Για ακόμη μία φορά, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το μήκος πτήσης, αυξάνεται και το υψόμετρο πλεύσης, μέχρι και το εύρος των 500 μιλίων, πάνω από το οποίο το υψόμετρο πλεύσης σταθεροποιείται περίπου στα 35000 πόδια. Η κλίση του αεροσκάφους κατά τη φάση ανόδου είναι παρεμφερής για όλα τα εύρη απόστασης. Το ίδιο ισχύει και για τη φάση καθόδου, με εξαίρεση ίσως τις μικρότερες αποστάσεις – του εύρους των 150 μιλίων - όπου η κλίση εμφανίζεται αμυδρώς ηπιότερη. Λόγω των παρόμοιων κλίσεων, οι αντίστοιχοι χρόνοι ανόδου και καθόδου αυξάνονται, όσο αυξάνεται και το υψόμετρο πλεύσης. Δηλαδή, οι χρόνοι ανόδου και καθόδου αυξάνονται έως και το εύρος απόστασης των 750 μιλίων, όπου σταθεροποιούνται προσεγγιστικά στα 23 και 28 λεπτά αντιστοίχως.

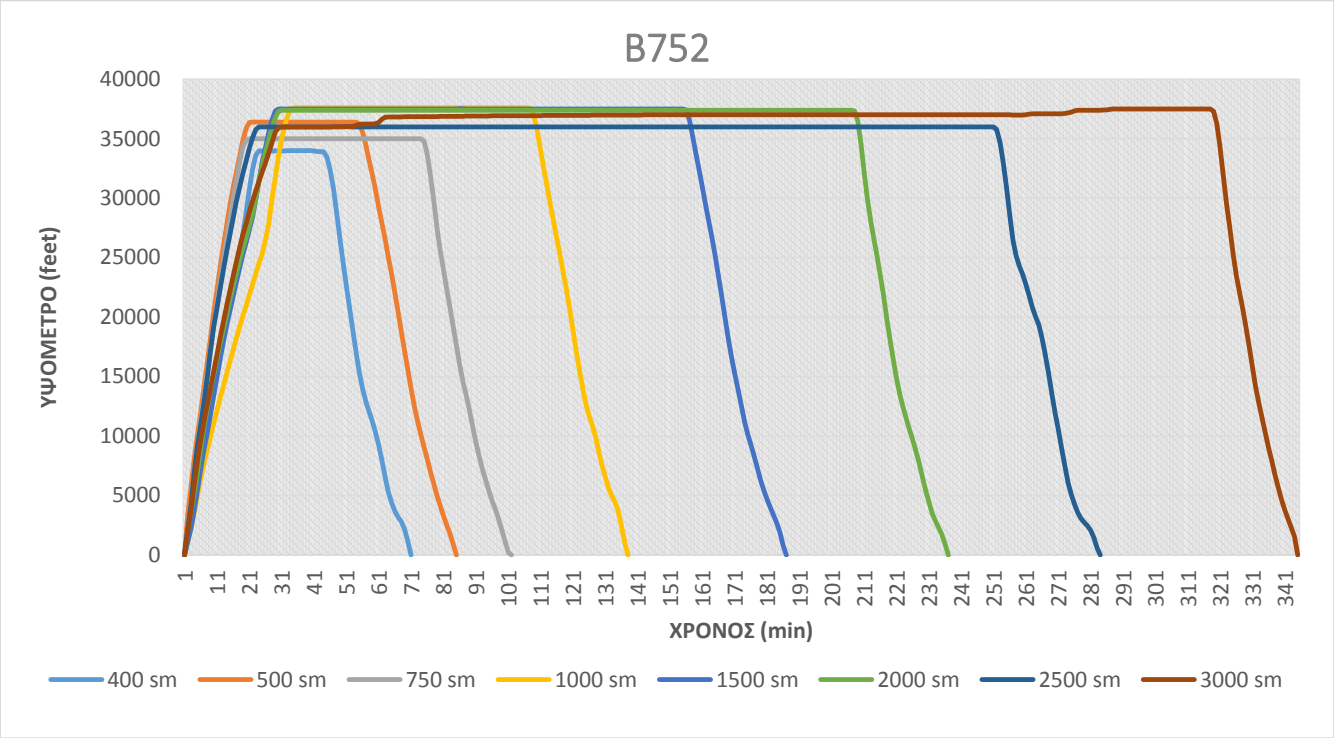
Boeing 712



Διάγραμμα 6.17: Προφίλ πτήσης B712

Το αεροσκάφος B712 πραγματοποιεί συνήθως πτήσεις μικρότερων αποστάσεων από ό,τι τα υπόλοιπα αεροσκάφη Airbus και Boeing. Η εικόνα των προφίλ πτήσης του είναι ελαφρώς πιο «άναρχη» από την αντίστοιχη των άλλων αεροσκαφών. Αυτό οφείλεται σε ένα γεγονός που παρατηρήθηκε και κατά τη συλλογή στοιχείων˙ οι πτήσεις μικρότερων αποστάσεων τείνουν να εμφανίζουν πιο «ασταθή» προφίλ. Για παράδειγμα, στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως έχουμε αλλαγή της κλίσης κατά την κάθοδο για τις πτήσεις των 250, 300 και 750 μιλίων. Το μεγαλύτερο υψόμετρο πλεύσης δεν ξεπερνά τα 32000 πόδια, ενώ το μικρότερο (για απόσταση 150 μιλίων) φτάνει μόλις τα 12500 πόδια.

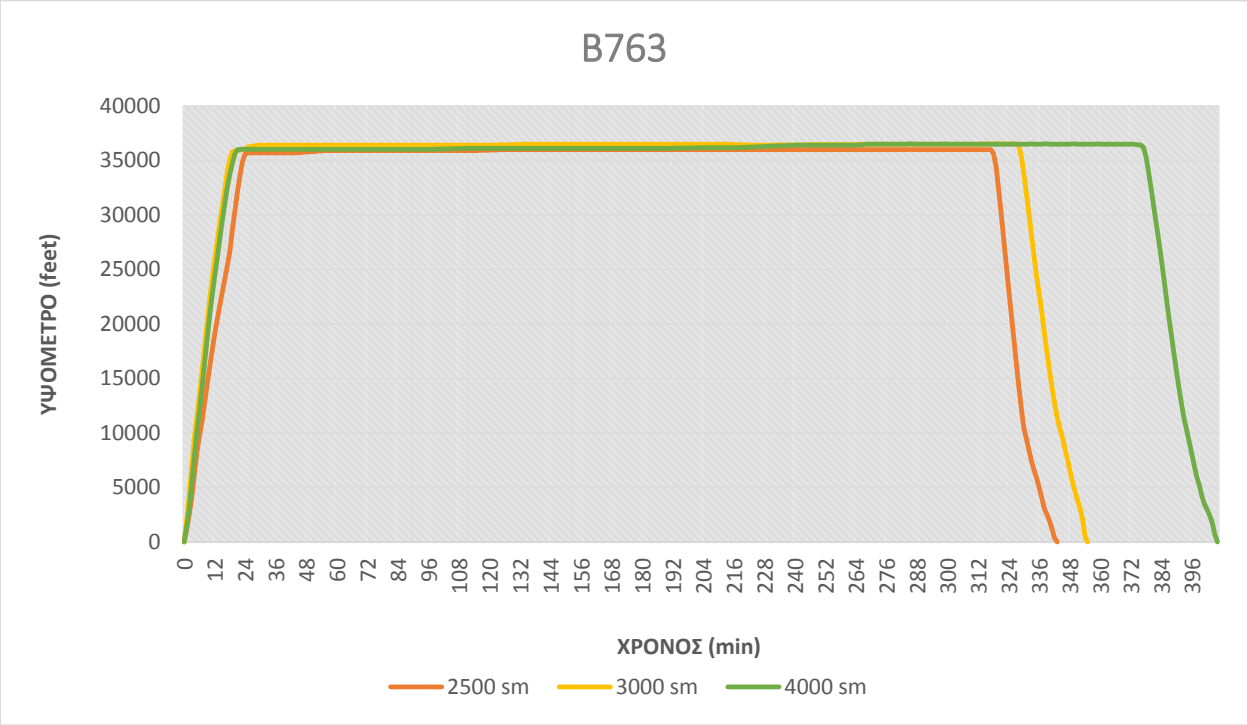
Boeing 752



Διάγραμμα 6.18: Προφίλ πτήσης B752

Το αεροσκάφος B763 πραγματοποιεί πτήσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους, ξεκινώντας από πτήσεις της τάξεως των 400 μιλίων και φτάνοντας να πραγματοποιεί δρομολόγια απόστασης της τάξεως των 3000 μιλίων. Η σταδιακή αύξηση του υψομέτρου πλεύσης που παρατηρήθηκε για όλα τα προηγούμενα αεροσκάφη (A319, A321, 737-700, 737-300, 717-200) δεν παρατηρείται στο παρόν διάγραμμα, καθώς από τη μικρότερη απόσταση το υψόμετρο πλεύσης πλησιάζει τα 35000 πόδια. Για τις αποστάσεις των 2500 και 3000 μιλίων έχουμε σταδιακή αύξηση του υψομέτρου πλεύσης. Οι κλίσεις ανόδου και καθόδου δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις.

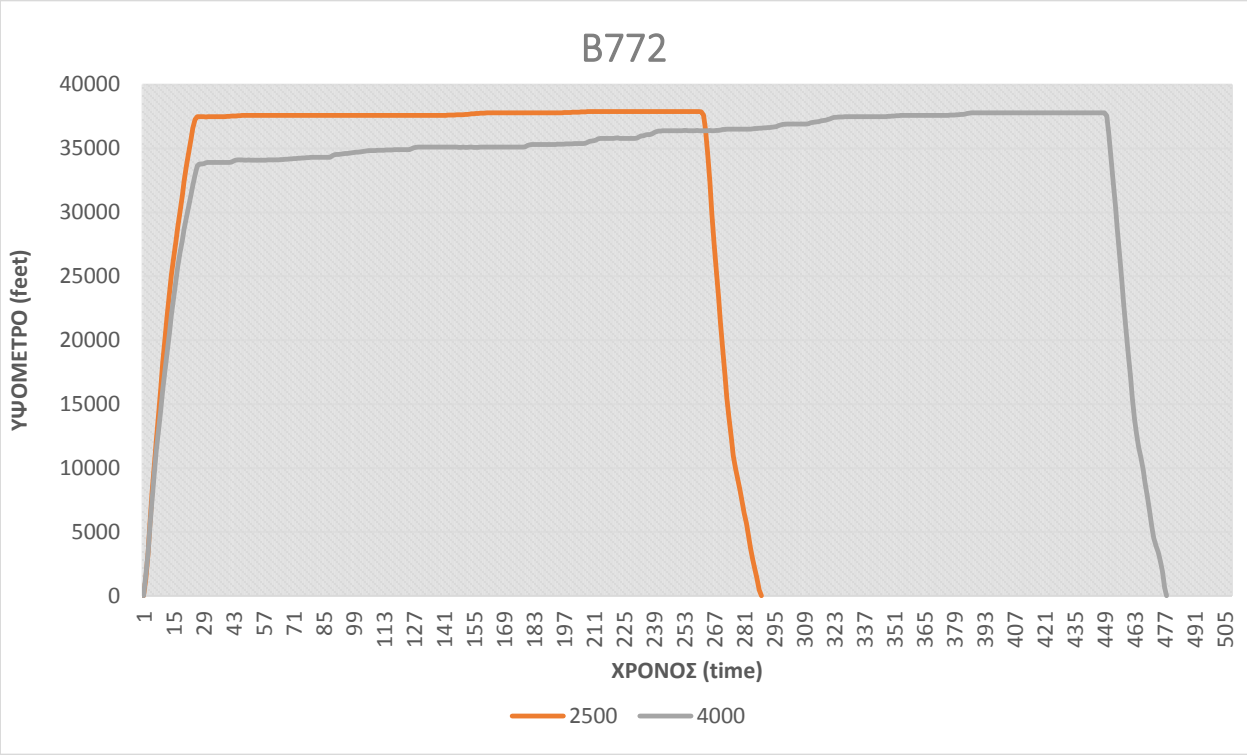
Boeing 763



Διάγραμμα 6.19: Προφίλ πτήσης B763

Το αεροσκάφος B763 πραγματοποιεί πτήσεις μεγάλου μήκους. Για τις πτήσεις αποστάσεων της τάξης των 3000 και 4000 μιλίων, που διαρκούν έξι με επτά ώρες περίπου, έχουμε σταδιακή ανύψωση του αεροσκάφους, όπως σχολιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οι κλίσεις κατά την άνοδο και την κάθοδο του αεροσκάφους B763 δε διαφοροποιούνται εμφανώς. Το υψόμετρο πλεύσης είναι περίπου 35000 πόδια και για τα τρία εύρη απόστασης.

Boeing 772



Διάγραμμα 6.20: Προφίλ πτήσης B772

Το αεροσκάφος B772 είναι το μεγαλύτερο σε μέγεθος αεροσκάφος που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και πραγματοποιεί πτήσεις μεγάλου μήκους. Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται τα μέσα προφίλ πτήσης για τις αποστάσεις 2500 και 4000 μιλίων. Στο μέσο προφίλ πτήσης των 2500 μιλίων γίνεται διακριτή μια τάση σταδιακής ανύψωσης του αεροσκάφους η οποία γίνεται εντονότερη στο μέσο προφίλ πτήσης των 4000 μιλίων. Το υψόμετρο πλεύσης είναι κυμαινόμενο ανάμεσα στις τιμές των 34000 και 37000 ποδιών. Οι κλίσεις κατά την άνοδο και την κάθοδο είναι παρεμφερείς.

6.3 Μέσα υψόμετρα πλεύσης ανά τύπο αεροσκάφους

Στο ακόλουθο κομμάτι της εργασίας παρουσιάζονται πίνακες με στοιχεία που εξήχθησαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα μέσα υψόμετρα πλεύσης ανά τύπο αεροσκάφους, ανά εύρος απόστασης.

- *Αεροσκάφη Airbus*

	A319	**A321**
απόσταση (μίλια)	Μέσο υψόμετρο πλεύσης (ft)	Μέσο υψόμετρο πλεύσης (ft)
150	-	13800
200	18400	-
250	25800	26300
300	25400	-
400	31900	29300
500	33200	31600
750	36200	31000
1000	36400	32000
1500	36900	31800
2000	36500	32900
2500	35400	33300

Πίνακας 6.2: Μέσο υψόμετρο πλεύσης αεροσκαφών Airbus A319 και A321

Ο παραπάνω πίνακας ποσοτικοποιεί αυτό που ποιοτικά μπορούσαμε να διακρίνουμε στα διαγράμματα που προηγήθηκαν στις ενότητες 6.1 και 6.2, δηλαδή το γεγονός ότι όσο αυξάνεται το μήκος πτήσης, αυξάνεται και το υψόμετρο πλεύσης, έως την απόσταση των 750 περίπου μιλίων, πάνω από την οποία οι τιμές των υψομέτρων πλεύσης σταθεροποιούνται. Ανάμεσα στα δύο εξεταζόμενα αεροσκάφη Airbus, παρατηρούμε πως το A319 πετάει σταθερά σε μεγαλύτερο υψόμετρο από το A321.

❖ *Αεροσκάφη Boeing*

	B737	B733	B712
απόσταση (μίλια)	Μέσο υψόμετρο πλεύσης (ft)	Μέσο υψόμετρο πλεύσης (ft)	Μέσο υψόμετρο πλεύσης (ft)
150	-	-	12700
200	21600	21900	-
250	24900	29100	24100
300	28600	31000	29700
400	35600	32300	31800
500	34400	35300	31500
750	39100	33900	31900
1000	39000	34700	-
1500	38700	35300	-
2000	36700	35600	-
2500	-	-	-

Πίνακας 6.3: Μέσο υψόμετρο πλεύσης αεροσκαφών Boeing 737, 733, 712

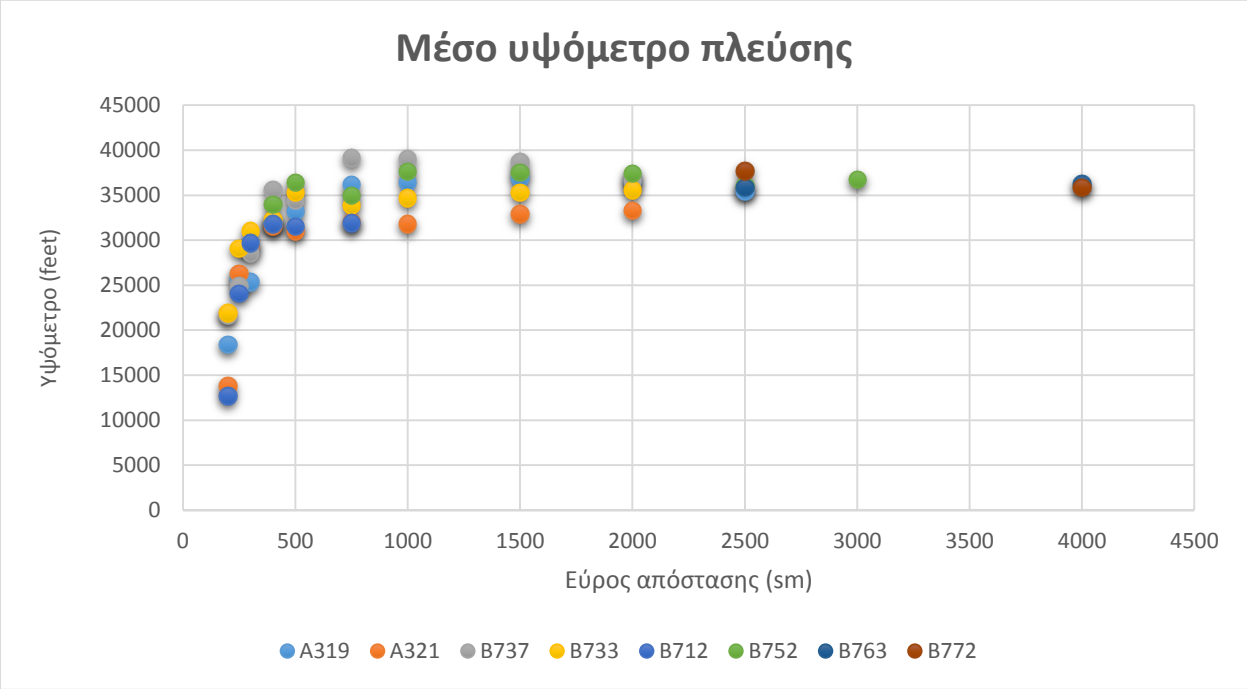
Ο άνω πίνακας επιβεβαιώνει την τάση που παρατηρήθηκε για τα αεροσκάφη Airbus A319 και A321. Κι εδώ, όσο αυξάνεται το μήκος πτήσης, αυξάνεται και το υψόμετρο πλεύσης, έως την απόσταση των 750 περίπου μιλίων, πάνω από την οποία οι τιμές των υψομέτρων πλεύσης σταθεροποιούνται. Βλέπουμε επίσης ότι τα υψόμετρα πλεύσης του Boeing 712 είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα των 737 και 733.

	B752		B763		B772	
απόσταση (μίλια)	Μέσο αρχικό υψόμετρο πλεύσης (ft)	Μέσο τελικό υψόμετρο πλεύσης (ft)	Μέσο αρχικό υψόμετρο πλεύσης (ft)	Μέσο τελικό υψόμετρο πλεύσης (ft)	Μέσο αρχικό υψόμετρο πλεύσης (ft)	Μέσο τελικό υψόμετρο πλεύσης (ft)
400	34000	34000	-	-	-	-
500	36400	36400	-	-	-	-
750	35000	35000	-	-	-	-
1000	37600	37600	-	-	-	-
1500	37500	37500	-	-	-	-
2000	37400	37400	-	-	-	-
2500	36000	36000	35700	36000	37500	37900
3000	36000	37500	35900	36500	-	-
4000	-	-	36000	36500	33900	37800

Πίνακας 6.4: Μέσο υψόμετρο πλεύσης αεροσκαφών Boeing 752, 763, 772

Ο άνωθεν πίνακας αναφέρεται σε στοιχεία που αφορούν τα αεροσκάφη Boeing 752, 763 και 772 τα οποία πραγματοποιούν πτήσεις μεγάλων αποστάσεων. Σε αυτήν την περίπτωση το μέσο υψόμετρο κατά τη φάση πλεύσης δεν παραμένει σταθερό όπως στα μέσα προφίλ πτήσης για τις μικρότερες αποστάσεις, αλλά αυξάνεται ελαφρώς, σταδιακά με το χρόνο. Πράγματι, διαπιστώνουμε ότι για πτήσεις μεγαλύτερες των 2500 μιλίων το υψόμετρο στο τέλος της φάσης πλεύσης είναι μεγαλύτερο από αυτό στο πέρας της. Ένας επιπλέον λόγος που έγινε αυτός ο διαχωρισμός για την αρχή και το πέρας της φάσης πλεύσης είναι να καταστεί δυνατό να γίνει ακριβέστερος υπολογισμός των κλίσεων ανόδου και καθόδου για τις συγκεκριμένες πτήσεις, ο οποίος ακολουθεί στην ενότητα 6.5.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνονται όσα αναλύθηκαν στους παραπάνω πίνακες. Διαπιστώνεται μια ραγδαία αύξηση του υψομέτρου πλεύσης με την αύξηση του μήκους πτήσης περίπου έως το εύρος απόστασης των 750 μιλίων.



Διάγραμμα 6.21: Μέσο υψόμετρο πλεύσης για όλους τους τύπους αεροσκαφών συναρτήσει του μήκους πτήσης

6.4 Διάρκεια φάσεων ανόδου και καθόδου ανά τύπο αεροσκάφους

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μέση διάρκεια των φάσεων ανόδου και καθόδου ανά τύπο αεροσκάφους, ανά εύρος απόστασης.

- *Αεροσκάφη Airbus*

	A319		**A321**	
απόσταση (μίλια)	Μέσος χρόνος ανόδου (min)	Μέσος χρόνος καθόδου (min)	Μέσος χρόνος ανόδου (min)	Μέσος χρόνος καθόδου (min)
150	-	-	8	13
200	9	17	-	-
250	12	19	13	19
300	12	19	-	-
400	17	21	17	21
500	18	23	21	26
750	21	25	20	23
1000	21	28	22	24
1500	24	27	24	24
2000	24	28	26	30
2500	26	29	29	31

Πίνακας 6.5: Μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Airbus A319 και A321

Από τον παραπάνω πίνακα που αναφέρεται στα εξεταζόμενα αεροσκάφη Airbus, μπορούμε να εντοπίσουμε τις ακόλουθες δύο τάσεις. Αφενός ότι η άνοδος διαρκεί λίγα λεπτά παραπάνω (περίπου τέσσερα) από την κάθοδο και αφετέρου ότι όσο μεγαλύτερο το εύρος απόστασης, τόσο αυξάνεται και η διάρκεια των φάσεων ανόδου και καθόδου. Αυτό συμβαίνει, διότι όπως έγινε φανερό από τα αντίστοιχα διαγράμματα της ενότητας 6.2, όσο αυξάνεται το μήκος πτήσης, αυξάνεται και το υψόμετρο πλεύσης.

❖ *Αεροσκάφη Boeing*

	B737		B733		B712	
απόσταση (μίλια)	Μέσος χρόνος ανόδου (min)	Μέσος χρόνος καθόδου (min)	Μέσος χρόνος ανόδου (min)	Μέσος χρόνος καθόδου (min)	Μέσος χρόνος ανόδου (min)	Μέσος χρόνος καθόδου (min)
150	-	-	-	-	7	10
200	9	16	10	18	-	-
250	12	20	13	20	18	22
300	13	20	15	20	19	21
400	15	22	16	20	19	20
500	15	24	19	20	23	24
750	19	23	19	20	20	25
1000	18	25	20	22	-	-
1500	20	22	20	22	-	-
2000	22	24	22	23	-	-
2500	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 6.6: Μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Boeing 737, 733 και 712

Παρόμοια εικόνα με τα αεροσκάφη Airbus A319 και A321 παρουσιάζουν και τα Boeing 737 και 733, γεγονός εύλογο καθώς πρόκειται για παρόμοιας κατηγορίας αεροσκάφη. Έτσι κι εδώ βλέπουμε ότι η άνοδος διαρκεί λίγα λεπτά παραπάνω από την κάθοδο και ότι όσο μεγαλύτερο το εύρος απόστασης, τόσο αυξάνεται και η διάρκεια των φάσεων ανόδου και καθόδου. Το αεροσκάφος Boeing 712, καθώς έχει γενικά χαμηλότερο υψόμετρο πλεύσης, οι φάσεις ανόδου και καθόδου του είναι πιο σύντομες.

	B752		B763		B772	
απόσταση (μίλια)	Μέσος χρόνος ανόδου (min)	Μέσος χρόνος καθόδου (min)	Μέσος χρόνος ανόδου (min)	Μέσος χρόνος καθόδου (min)	Μέσος χρόνος ανόδου (min)	Μέσος χρόνος καθόδου (min)
400	23	27	-	-	-	-
500	21	28	-	-	-	-
750	20	24	-	-	-	-
1000	33	30	-	-	-	-
1500	29	32	-	-	-	-
2000	30	30	-	-	-	-
2500	23	33	24	26	25	30
3000	32	27	29	31	-	-
4000	-	-	21	33	26	29

Πίνακας 6.7: Μέσοι χρόνοι ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Boeing 752, 763, 772

Ο άνωθεν πίνακας αναφέρεται σε στοιχεία που αφορούν τα αεροσκάφη Boeing 752, 763 και 772 τα οποία πραγματοποιούν πτήσεις μεγάλων αποστάσεων. Δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφοροποιήσεις, καθώς η μέση διάρκεια ανόδου και καθόδου είναι περίπου μισή ώρα. Επίσης, η φάση ανόδου δεν έχει μεγαλύτερη διάρκεια από αυτή της καθόδου σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει στον πίνακα οι δυο διάρκειες μπορεί όχι μόνο να εξισωθούν, αλλά και η διάρκεια της καθόδου να είναι μικρότερη αυτής της καθόδου.

6.5 Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου ανά τύπο αεροσκάφους

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μέση κλίση κατά τις φάσεις ανόδου και καθόδου ανά τύπο αεροσκάφους, ανά εύρος απόστασης.

- *Αεροσκάφη Airbus*

	A319		**A321**	
εύρος απόστασης (μίλια)	Μέσος ρυθμός ανόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός καθόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός ανόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός καθόδου (ft/min)
150	-	-	1725	1062
200	2044	-	-	-
250	2150	1358	2023	1384
300	2117	-	-	-
400	1876	1519	1724	1395
500	1844	1443	1505	1215
750	1724	1448	1550	1348
1000	1733	1300	1455	1333
1500	1538	1367	1325	1325
2000	1521	1304	1265	1097
2500	1362	1221	1148	1074

Πίνακας 6.8: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Airbus A319 και A321

Για τα αεροσκάφη Airbus A319 και A321, παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα: Αφενός, το ότι υπάρχει μια ισχυρή τάση η κλίση κατά την άνοδο να είναι μεγαλύτερη από αυτή κατά την κάθοδο και αφετέρου ότι για τις πτήσεις μικρών αποστάσεων έχουμε πιο απότομη άνοδο του αεροσκάφους συγκριτικά με πτήσεις μεγαλύτερων αποστάσεων. Μάλιστα, ο ρυθμός ανόδου μειώνεται με την αύξηση του μήκους πτήσης. Ο

ρυθμός καθόδου του αεροσκάφους συναρτήσει του μήκους πτήσης δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις.

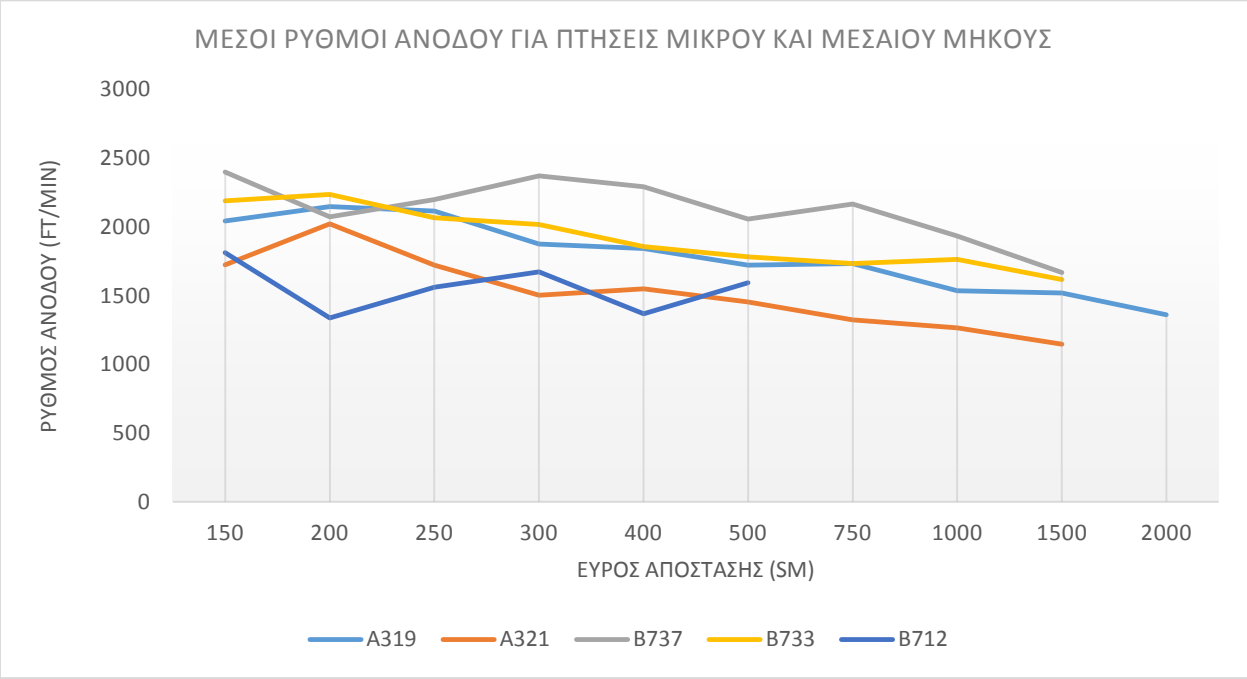
❖ *Αεροσκάφη Boeing*

	B737		**B733**		**B712**	
εύρος απόστασης (μίλια)	Μέσος ρυθμός ανόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός καθόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός ανόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός καθόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός ανόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός καθόδου (ft/min)
150	-	-	-	-	1814	1270
200	2400	1350	2190	1217	-	-
250	2075	1245	2238	1455	1339	1095
300	2200	1430	2067	1550	1563	1414
400	2373	1618	2019	1615	1674	1590
500	2293	1433	1858	1765	1370	1313
750	2058	1700	1784	1695	1595	1276
1000	2167	1560	1735	1577	-	-
1500	1935	1759	1765	1605	-	-
2000	1668	1529	1618	1548	-	-
2500	-	-	-	-	-	-

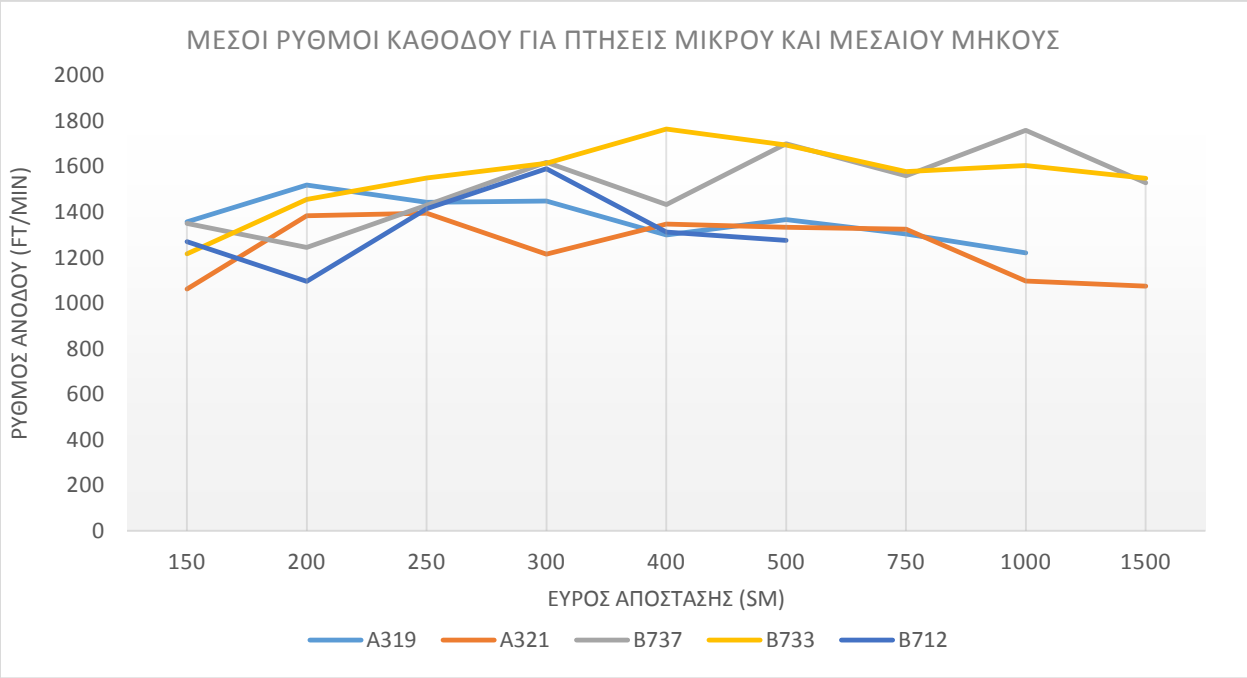
Πίνακας 6.9: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Boeing 737, 733 και 712

Για τα αεροσκάφη Boeing 737 και 733, παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι όπως και για τα αεροσκάφη Airbus, η κλίση κατά την άνοδο είναι μεγαλύτερη από αυτή κατά την κάθοδο και ότι για τις πτήσεις μικρών αποστάσεων έχουμε πιο απότομη άνοδο του αεροσκάφους συγκριτικά με πτήσεις μεγαλύτερων αποστάσεων, αν και η τάση αυτή είναι λιγότερο έντονη από ό,τι ήταν για τα αεροσκάφη Airbus. Επίσης δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή στην κλίση καθόδου, η οποία παρουσιάζει μια πολύ μικρή αύξηση όσο μεγαλώνει το μήκος πτήσης.

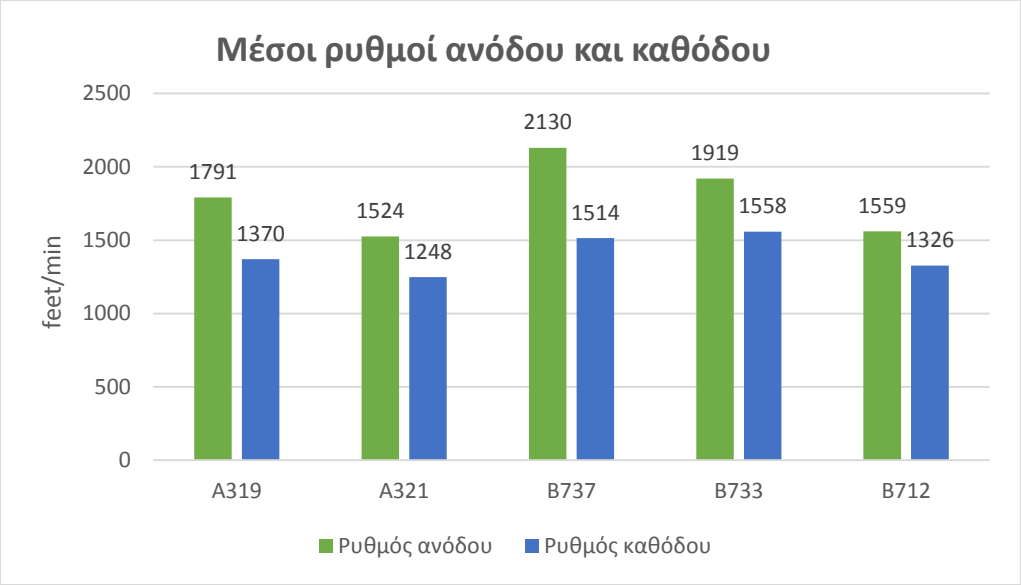
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται οι τάσεις που παρατηρήθηκαν παραπάνω.



Διάγραμμα 6.22: Μέσοι ρυθμοί ανόδου για πτήσεις μικρού και μεσαίου μήκους



Διάγραμμα 6.23: Μέσοι ρυθμοί καθόδου για πτήσεις μικρού και μεσαίου μήκους



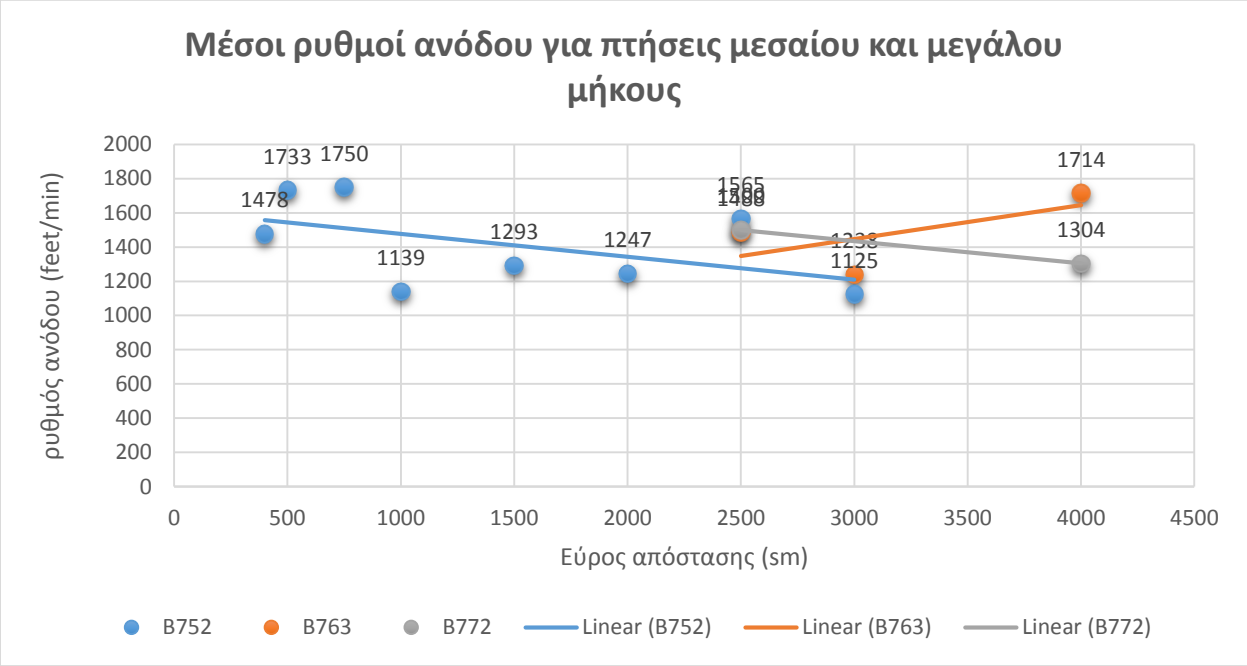
Διάγραμμα 6.24: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη που εκτελούν πτήσεις μικρού και μεσαίου μήκους

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου των αεροσκαφών A319, A321, B737, B733 και B712, οι οποίοι προέκυψαν λαμβάνοντας το μέσο όρο των ρυθμών ανόδου και καθόδου αντιστοίχως για όλα τα εύρη απόστασης. Γενικά, οι ρυθμοί ανόδου κυμαίνονται από 1500 έως 2100 πόδια ανά λεπτό, ενώ οι ρυθμοί καθόδου από 1200 έως 1900 πόδια ανά λεπτό. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι τα Boeing 737 είναι εκείνα που παρουσιάζουν την πιο απότομη κλίση κατά τις φάσεις ανόδου και καθόδου.

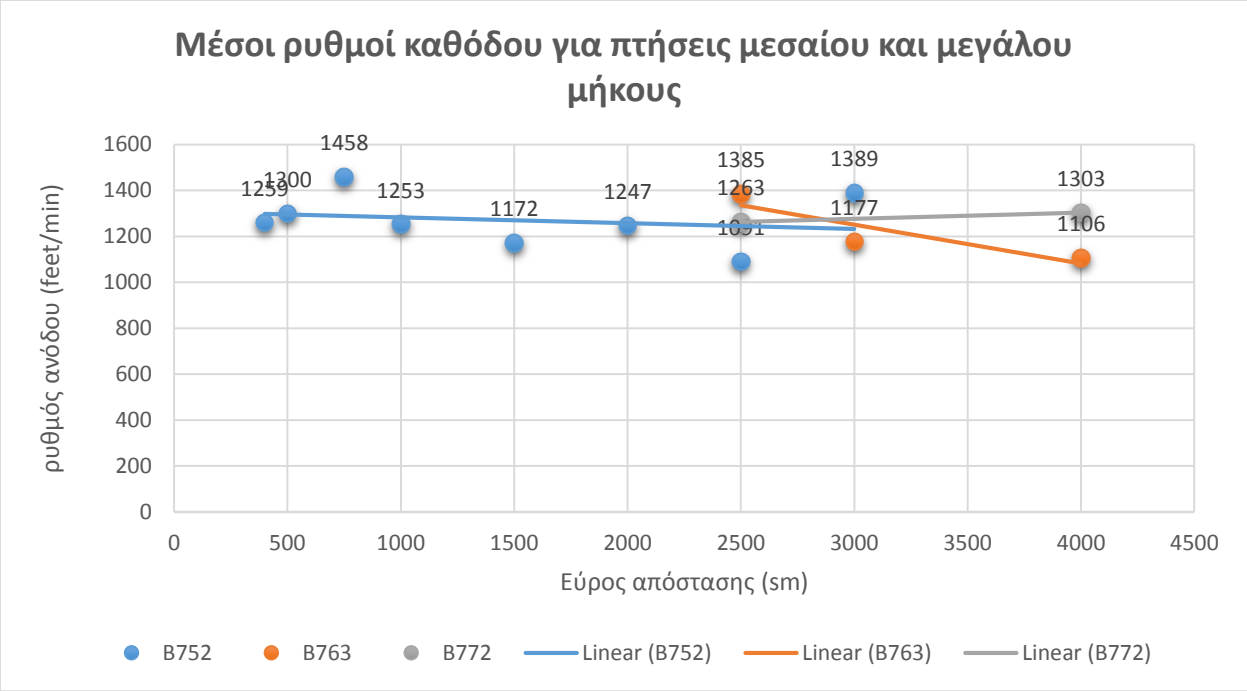
	B752		**B763**		**B772**	
απόσταση (μίλια)	Μέσος ρυθμός ανόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός καθόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός ανόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός καθόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός ανόδου (ft/min)	Μέσος ρυθμός καθόδου (ft/min)
400	1478	1259	-	-	-	-
500	1733	1300	-	-	-	-
750	1750	1458	-	-	-	-
1000	1139	1253	-	-	-	-
1500	1293	1172	-	-	-	-
2000	1247	1247	-	-	-	-
2500	1565	1091	1488	1385	1500	1263
3000	1125	1389	1238	1177	-	-
4000	-	-	1714	1106	1304	1303

Πίνακας 6.10: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη Boeing 752, 763 και 772

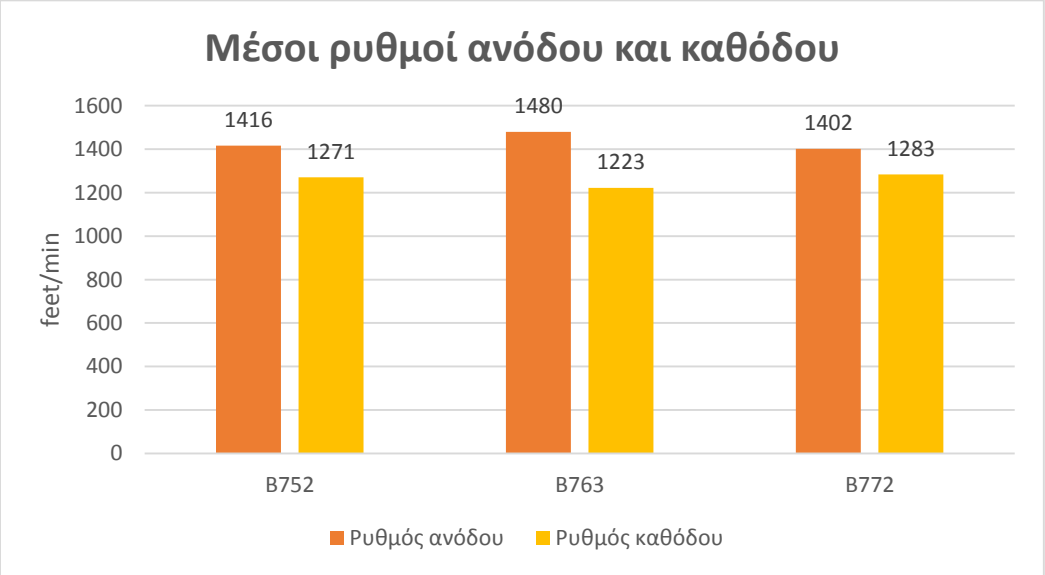
Ο άνωθεν πίνακας αναφέρεται σε στοιχεία που αφορούν τα αεροσκάφη Boeing 752, 763 και 772 τα οποία πραγματοποιούν πτήσεις μεγάλων αποστάσεων και για αυτό παρουσιάζουν κάποιες διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα προηγούμενα πέντε αεροσκάφη. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν, δεν είναι δυνατό να διαπιστώσουμε την ύπαρξη μιας σαφούς τάσης όσον αφορά τους ρυθμούς ανόδου και καθόδου. Μπορούμε όμως να πούμε ότι δεν εμφανίζονται ιδιαιτέρως έντονες διαφοροποιήσεις. Τα ακόλουθα διαγράμματα αποτυπώνουν με πιο άμεσο τρόπο τα στοιχεία του πίνακα.



Διάγραμμα 6.25: Μέσοι ρυθμοί ανόδου για πτήσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους



Διάγραμμα 6.26: Μέσοι ρυθμοί καθόδου για πτήσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους



Διάγραμμα 6.27: Μέσοι ρυθμοί ανόδου και καθόδου για τα αεροσκάφη που εκτελούν πτήσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους

7. Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα

Έχοντας πλέον προσδιορίσει τη μέση τροχιά του κάθε τύπου αεροσκάφους για κάθε απόσταση και έχοντας αναλύσει τα αποτελέσματα, είναι δυνατό να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Το βασικότερο ίσως συμπέρασμα είναι ότι όσο αυξάνεται το μήκος ταξιδίου, τόσο αυξάνεται και το υψόμετρο πλεύσης του αεροσκάφους. Αυτό ισχύει για τις αποστάσεις έως τα 750 περίπου μίλια, καθώς από αυτό το εύρος απόστασης και πάνω τα υψόμετρα πλεύσης σταθεροποιούνται σε τιμές ανάμεσα στα 30000 και 40000 πόδια. Επίσης, για τις αποστάσεις μικρού μήκους, ο χρόνος στη φάση πλεύσης μπορεί να αποτελεί ένα μικρό ή και ελάχιστο τμήμα της συνολικής πτήσης. Αντιθέτως, στα ταξίδια μεγαλύτερων αποστάσεων το αεροσκάφος βρίσκεται στη φάση πλεύσης για το μεγαλύτερο μέρος της πτήσης. Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 2.4, ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου είναι χαμηλότερος σε μεγαλύτερα υψόμετρα και η φάση η οποία απαιτεί το μεγαλύτερο ρυθμό κατανάλωσης καυσίμου είναι η άνοδος. Με βάση αυτά, γίνεται κατανοητό ότι στις πτήσεις μεσαίου και μεγάλου μήκους, είναι συμφέρουσα η πλεύση σε μεγάλο υψόμετρο. Αντίθετα, στις πτήσεις μικρού μήκους, δε συμφέρει να «σπαταληθεί» καύσιμο για να ανέβει το αεροσκάφος σε μεγάλο υψόμετρο με σκοπό τη μειωμένη κατανάλωση, αφού στο υψόμετρο αυτό θα παραμείνει για πολύ λίγο χρόνο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι πτήσεις μικρού μήκους ήταν εκείνες που παρουσίαζαν συχνότερα και σε μεγαλύτερο βαθμό έντονες ανωμαλίες στην πορεία του αεροσκάφους, ώστε η διαδοχή των φάσεων της πτήσης να μην είναι διακριτή. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος ότι στις πτήσεις αυτές τα αεροσκάφη πλέουν σε χαμήλα υψόμετρα, τα οποία δεν ξεπερνούν τα 20000 πόδια, υψόμετρο κάτω από το οποίο έχουμε έντονη παρουσία διατμητικών ανέμων (wind shear effect), όπως εξηγήθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Λόγω της αδυναμίας διάκρισης των φάσεων της πτήσης, απαραίτητο βήμα για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, στην παρούσα εργασία δε μελετήθηκαν τέτοιες περιπτώσεις πτήσεων.

Ακόμη, το προφίλ πτήσης για τις μεγάλου μήκους αποστάσεις διαφοροποιείται με το αντίστοιχο για τις αποστάσεις μικρού και μεσαίου μήκους, καθώς κατά τη φάση πλεύσης έχουμε σταδιακή αύξηση του υψομέτρου, καθώς χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα καυσίμου και το βάρος του αεροσκάφους μειώνεται σημαντικά. Κατά τη φάση πλεύσης, το αεροσκάφος συνηθίζεται να αυξάνει το υψόμετρό του κατά 2000 έως 3000 πόδια. Το γεγονός αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα ευρήματα της Dorothée Merle στην εργασία της για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προφίλ πτήσης με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου *(Merle, 2011).*

Όσον αφορά τις κλίσεις ανόδου και καθόδου του αεροσκάφους, παρατηρούμε στα διαγράμματα των μέσων τροχιών ότι το αεροσκάφος διατηρεί σχετικά σταθερή κλίση τόσο κατά την άνοδο, όσο και για την κάθοδο. Δηλαδή, στα μέσα προφίλ πτήσης που μορφώθηκαν δεν παρατηρήθηκαν απότομες αλλαγές κλίσης. Ειδικά στις πτήσεις μικρών και μεσαίων

αποστάσεων είναι έντονη η τάση η άνοδος να πραγματοποιείται με πιο απότομη κλίση από ό,τι η κάθοδος. Αυτό πιθανώς οφείλεται στη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου που προσφέρει αυτός ο συνδυασμός κλίσεων. Επίσης, παρατηρώντας τις εξαχθείσες μέσες τροχιές ανά τύπο αεροσκάφους, συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις ως προς την κλίση ανόδου του εκάστοτε αεροσκάφους, ανεξαρτήτως της απόστασης του εκτελούμενου δρομολογίου. Δηλαδή, ένα Airbus A319 θα έχει παρεμφερή κλίση κατά την άνοδο σε μια πτήση 200 και 2000 μιλίων όπως παρουσιάστηκε στα διαγράμματα 6.22 και 6.23. Το ίδιο ισχύει και για την κάθοδο. Διαπιστώθηκε μόνο μια ήπια τάση μείωσης του ρυθμού ανόδου και μια ήπια τάση αύξηση του ρυθμού καθόδου με την αύξηση του μήκους πτήσης. Όμως πρέπει να γίνει σαφές ότι αυτό δεν ισχύει όταν κάνουμε σύγκριση ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών. Ακόμη, σε όλες τις περιπτώσεις πτήσεων απόστασης μικρού και μεσαίου μήκους η κάθοδος πραγματοποιείται με μικρότερη κλίση από ό,τι η άνοδος, γεγονός που δεν ισχύει πάντοτε για τις πτήσεις μεγάλων αποστάσεων.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν και τα παρακάτω συμπεράσματα, τα οποία αφορούν συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών. Το Boeing 737-700 παρουσιάζει σταθερά τις μεγαλύτερες κλίσεις ανόδου ανάμεσα στους εξεταζόμενους τύπους αεροσκαφών. Αντιθέτως, τα Airbus A321 και Boeing 717-200 είναι εκείνα που παρουσιάζουν την πιο αργή άνοδο. Ακόμη, το Boeing 717-200 δεν εκτελεί πτήσεις μεγάλου μήκους και έχει υψόμετρο πλεύσης μικρότερο από αυτό των άλλων αεροσκαφών. Τα μεγαλύτερα υψόμετρα πλεύσης συναντώνται στο Airbus A319 και Boeing 737-700, τα οποία φτάνουν και τα 40000 πόδια.

Τα ευρήματα του παρόντος πονήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω έρευνα, καθώς οι εξαχθείσες μέσες τροχιές των αεροσκαφών που μελετήθηκαν μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων των αεροσκαφών που εξετάστηκαν.

Τέλος, ενδιαφέρον πεδίο περαιτέρω έρευνας αποτελεί μελέτη της πορείας ενός αεροσκάφους που εκτελεί τοπικά δρομολόγια μικρού μήκους (regional aircraft) με τη φάση πλεύσης να λαμβάνει σε χαμηλό υψόμετρο πλεύσης ˙στην περίπτωση αυτή ο παράγοντας των καιρικών συνθηκών θα πρέπει να εξεταστεί αναλυτικά.

Βιβλιογραφία

Arentzen Paul, Variation in aircraft engine exhaust emissions in relation to flight altitude and degraded engine performance, PhD, 2001.

De Neufville Richard, Amadeo Odoni, Συστήματα Αεροδρομίων (μτφ. Βούλα Ψαράκη-Καλουπτσίδη), εκδόσεις Παπασωτηρίου

Federal Aviation Administration, Office of Enviroment and Energy, SAGE- System for Assessing Aviation's Global Emissions Version 1.5, January 2005

Florence Nicol, Functional principal component analysis of aircraft trajectories, HAL, September 2013

Lovegren Jonathan and R. Hansman John, Estimation of potential aircraft fuel burn reduction in cruise via speed and altitude optimization strategies, MIT report, March 2011

Merle Dorothée, Flight path optimization for an airplane, Master's Thesis in Norwegian University of Science and Technology, June 2011

Mohammad Ghasemi Hamed, David Gianazza, Mathieu Serrurier, Nicolas Durand, Statistical prediction of aircraft trajectory: regression methods vs point-mass model, Univ. de Toulouse, 2013

Commission on Engineering and Technical Systems, Aeronautics and Space Engineering, Board Commission on Physical Sciences Mathematics and Resources, Atmospheric Sciences and Climate Board, National Research Council, Report of the Committee on Low-Altitude Wind Shear and Its Hazard to Aviation, National Academy Press, Washington D.C., 1983

Tastambekov K., Puechmorel S., Delahaye D., Rabut C., Aircraft trajectory forecasting using local functional regression in Sobolev space, Ecole National de l' Aviation Civile, Departement de Mathematique Appliquees, November 2013

Zhihao Zou, A Computer Model to Estimate Commercial Aviation Fuel Consumption and Emissions in the Continental United States, Virginia Polytechnic Institute and State University, November 2012

Ιστοσελίδες:

- http://www.psych.mcgill.ca/misc/fda/index.html, Ramsey Jim, Functional Data Analysis
- https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_length
- http://www.airlines-inform.com/commercial-aircraft/, στοιχεία για τους τύπους αεροσκαφών
- https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing, στοιχεία για τους τύπους αεροσκαφών

- https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus , στοιχεία για τους τύπους αεροσκαφών
- http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_02_10/pdfs/AERO_FuelConsSeries.pdf , Fuel Conservation Strategies: Cost Index Explained
- https://www.shodor.org/os411/index.html

Παράρτημα

Λίστα των αεροδρομίων που χρησιμοποιήθηκαν στη συλλογή στοιχείων

Airport	**City**	**IATA**
Hartsfield Jackson Atlanta International	Atlanta	ATL
Chicago O'Hare International	Chicago	ORD
Los Angeles International	Los Angeles	LAX
Dallas Fort Worth International	Dallas-Fort Worth	DFW
Denver International	Denver	DEN
John F Kennedy International	New York	JFK
San Francisco International	San Francisco	SFO
Charlotte Douglas International	Charlotte	CLT
McCarran International	Las Vegas	LAS
Phoenix Sky Harbor International	Phoenix	PHX
George Bush Intercontinental Houston	Houston	IAH
Miami International	Miami	MIA
Orlando International	Orlando	MCO
Newark Liberty International	Newark	EWR
Seattle Tacoma International	Seattle	SEA
Minneapolis-St Paul International/Wold-Chamberlain	Minneapolis	MSP
Detroit Metropolitan Wayne County	Detroit	DTW
Philadelphia International	Philadelphia	PHL
General Edward Lawrence Logan International	Boston	BOS
La Guardia	New York	LGA
Fort Lauderdale Hollywood International	Fort Lauderdale	FLL
Baltimore/Washington International Thurgood Marshall	Baltimore	BWI
Washington Dulles International	Washington	IAD
Salt Lake City International	Salt Lake City	SLC
Ronald Reagan Washington National	Washington	DCA
Chicago Midway International	Chicago	MDW
Honolulu International	Honolulu	HNL
San Diego International	San Diego	SAN
Tampa International	Tampa	TPA
Cleveland Hopkins International	Cleveland	CLE
Portland International	Portland	PDX
Lambert St Louis International	St Louis	STL
William P Hobby	Houston	HOU
Metropolitan Oakland International	Oakland	OAK
Kansas City International	Kansas City	MCI
Nashville International	Nashville	BNA

Austin Bergstrom International	Austin	AUS
Raleigh Durham International	Raleigh/Durham	RDU
Sacramento International	Sacramento	SMF
John Wayne-Orange County	Santa Ana	SNA
Buffalo Niagara International Airport	New York	BUF
Jacksonville International Airport	Jacksonville	JAX
Albuquerque International Sunport	Albuquerque	ABQ
Memphis International Airport	Memphis	MEM
General Mitchell International Airport	Milwaukee	MKE
Greater Rochester International Airport	New York	ROC
Tulsa International Airport	Tulsa	TUL

Φύλλο καταγραφής στοιχείων

Aircraft type:	**B757-200**		Date of flight:	**1-Φεβ-16**
			Date of release:	**16-Φεβ-16**
Binned Distance [st]:	**400**			
filed altitude [ft]:	**34000**		Source:	https://flightaware.com/live/flight/DAL1518/history/20160201/1130Z/KMCO/KATL/tracklog
direct distance [st]:	**405**			
planed distance [st]:	**461**		***from flightaware***	
flown distance [sm]:	**462**			
Example of flight:	From	To		
	KMCO	**KATL**		

FLIGHT INFORMATION
FL462-DIR405-TIME62

Time	Position		Orientation		Groundspeed		Altitude		
EDT	Latitude	Longitude	Course	Direction	KTS	MPH	feet	Rate	
Mon 01:46:00 PM							0		FA
Mon 01:46:50 PM	28,4167	-81,3167	350°	North	181	208	800		T
Mon 01:47:08 PM	28,4	-81,3333	221°	Southwest	180	207	1.800	2,583	T
Mon 01:48:02 PM	28,35	-81,35	196°	South	240	276	3.900	2,944	T
Mon 01:48:56 PM	28,3167	-81,4	233°	Southwest	270	311	7.100	3,263	T
Mon 01:49:56 PM	28,3667	-81,4667	310°	West	317	365	10.100	2,550	T
Mon 01:50:56 PM	28,4667	-81,4667	360°	North	380	437	12.200	2,619	T
Mon 01:52:02 PM	28,5667	-81,4667	360°	North	327	376	15.600	1,682	T
Mon 01:53:08 PM	28,6642	-81,4753	356°	North	340	391	15.900	378	T
Mon 01:54:09 PM	28,7725	-81,4844	356°	North	378	435	16.400	1,377	T
Mon 01:55:10 PM	28,8839	-81,5131	347°	North	402	463	18.700	2,410	T
Mon 01:56:11 PM	28,9975	-81,5419	347°	North	413	475	21.300	2,213	T
Mon 01:57:12 PM	29,1108	-81,5756	345°	North	416	479	23.200	1,951	T
Mon 01:58:14 PM	29,2508	-81,6183	345°	North	437	503	25.300	1,902	T
Mon 01:59:15 PM	29,3725	-81,655	345°	North	449	517	27.100	1,426	T
Mon 02:00:16 PM	29,4939	-81,6997	342°	North	455	524	28.200	2,016	T
Mon 02:01:17 PM	29,6169	-81,7444	342°	North	463	533	31.200	1,902	T
Mon 02:02:19 PM	29,7342	-81,7858	343°	North	446	513	32.100	1,366	T
Mon 02:03:20 PM	29,8517	-81,8267	343°	North	446	513	34.000	1,377	T
Mon 02:04:21 PM	29,9656	-81,8669	343°	North	432	497	34.900	439	T
Mon 02:05:23 PM	30,0839	-81,9103	342°	North	430	495	34.900		T
Mon 02:06:24 PM	30,1969	-81,9503	343°	North	430	495	34.900		T
Mon 02:07:25 PM	30,3122	-81,9922	343°	North	431	496	34.900		T
Mon 02:08:26 PM	30,4253	-82,0339	342°	North	432	497	34.900		T
Mon 02:09:28 PM	30,5622	-82,0831	343°	North	431	496	34.900		T
Mon 02:10:29 PM	30,6594	-82,1194	342°	North	430	495	34.900		T
Mon 02:11:31 PM	30,7731	-82,1597	343°	North	429	494	34.900		T
Mon 02:12:32 PM	30,9086	-82,2106	342°	North	428	493	34.900		T
Mon 02:13:34 PM	31,0206	-82,2514	343°	North	425	489	34.900		T
Mon 02:14:35 PM	31,1336	-82,2931	342°	North	424	488	34.900		T
Mon 02:15:37 PM	31,2447	-82,3358	342°	North	424	488	34.900	49	T
Mon 02:16:38 PM	31,3681	-82,3803	343°	North	424	488	35.000	49	T
Mon 02:17:40 PM	31,48	-82,4219	342°	North	424	488	35.000		T
Mon 02:18:42 PM	31,5919	-82,4644	342°	North	424	488	35.000		T
Mon 02:19:43 PM	31,7053	-82,5058	343°	North	424	488	35.000		T
Mon 02:20:45 PM	31,8183	-82,5483	342°	North	425	489	35.000		T
Mon 02:21:47 PM	31,9303	-82,5908	342°	North	426	490	35.000	-49	T
Mon 02:22:48 PM	32,0653	-82,6414	342°	North	426	490	34.900	-488	T
Mon 02:23:50 PM	32,1689	-82,6989	335°	Northwest	413	475	34.000	-435	T
Mon 02:24:52 PM	32,2533	-82,7839	320°	Northwest	405	466	34.000		T
Mon 02:25:53 PM	32,3364	-82,8722	318°	Northwest	404	465	34.000	-55	T
Mon 02:26:41 PM	32,4036	-82,9425	319°	Northwest	404	465	33.900	-655	T
Mon 02:27:43 PM	32,4878	-83,0311	318°	Northwest	404	465	32.800	-1,548	T
Mon 02:28:45 PM	32,5714	-83,1189	318°	Northwest	404	465	30.700	-3,171	T
Mon 02:29:46 PM	32,6769	-83,2303	318°	Northwest	423	487	26.300	-3,561	T
Mon 02:30:48 PM	32,7631	-83,3228	318°	Northwest	422	486	23.400	-2,758	T
Mon 02:31:50 PM	32,8461	-83,4119	318°	Northwest	406	467	20.600	-2,592	T
Mon 02:32:53 PM	32,9269	-83,4981	318°	Northwest	396	456	18.000	-2,371	T
Mon 02:33:54 PM	33,0056	-83,5808	319°	Northwest	381	438	15.700	-2,390	T
Mon 02:34:56 PM	33,0914	-83,6731	318°	Northwest	373	429	13.100	-1,645	T
Mon 02:35:58 PM	33,165	-83,7528	318°	Northwest	363	418	12.300	-581	T
Mon 02:37:00 PM	33,225	-83,8203	317°	Northwest	306	352	11.900	-968	T
Mon 02:38:02 PM	33,2725	-83,8906	309°	West	280	322	10.300	-1,355	T
Mon 02:39:04 PM	33,3197	-83,9606	309°	West	276	318	9.100	-1,452	T
Mon 02:40:06 PM	33,3833	-84,0253	320°	Northwest	265	305	7.300	-1,632	T
Mon 02:41:09 PM	33,4544	-84,0536	342°	North	273	314	5.700	-1,392	T
Mon 02:42:11 PM	33,525	-84,0839	340°	North	273	314	4.400	-1,113	T
Mon 02:43:13 PM	33,5928	-84,1125	341°	North	264	304	3.400	-677	T
Mon 02:44:15 PM	33,6192	-84,1717	298°	West	218	251	3.000	-192	T
Mon 02:45:18 PM	33,6203	-84,2492	271°	West	198	228	3.000	-144	T
Mon 02:46:20 PM	33,6194	-84,3086	269°	West	187	215	2.700	-484	T
Mon 02:47:22 PM	33,6197	-84,3575	270°	West	156	180	2.000	-677	T
Mon 02:48:00 PM							0		

FLIGHT PHASE	TIME	AXIS TIME	TIME IN MINUTES	TIME IN MINUTES	
T-O	0,073611111	0	0,0	46,0	0,0
T-O	0,074189815	0,000578704	0,8	46,8	0,83
T-O	0,074398148	0,000787037	1,1	47,1	1,13
CL	0,075023148	0,001412037	2,0	48,0	2,03
CL	0,075648148	0,002037037	2,9	48,9	2,93
CL	0,076342593	0,002731481	3,9	49,9	3,93
CL	0,077037037	0,003425926	4,9	50,9	4,93
CL	0,077800926	0,004189815	6,0	52,0	6,03
CL	0,078564815	0,004953704	7,1	53,1	7,13
CL	0,079270833	0,005659722	8,2	54,2	8,15
CL	0,079976852	0,006365741	9,2	55,2	9,17
CL	0,08068287	0,007071759	10,2	56,2	10,18
CL	0,081388889	0,007777778	11,2	57,2	11,20
CL	0,082106481	0,00849537	12,2	58,2	12,23
CL	0,0828125	0,009201389	13,3	59,3	13,25
CL	0,083518519	0,009907407	14,3	0,3	14,27
CL	0,084224537	0,010613426	15,3	1,3	15,28
CL	0,08494213	0,011331019	16,3	2,3	16,32
CL	0,085648148	0,012037037	17,3	3,3	17,33
CRUISE	0,086354167	0,012743056	18,4	4,4	18,35
CRUISE	0,087071759	0,013460648	19,4	5,4	19,38
CRUISE	0,087777778	0,014166667	20,4	6,4	20,40
CRUISE	0,088483796	0,014872685	21,4	7,4	21,42
CRUISE	0,089189815	0,015578704	22,4	8,4	22,43
CRUISE	0,089907407	0,016296296	23,5	9,5	23,47
CRUISE	0,090613426	0,017002315	24,5	10,5	24,48
CRUISE	0,091331019	0,017719907	25,5	11,5	25,52
CRUISE	0,092037037	0,018425926	26,5	12,5	26,53
CRUISE	0,09275463	0,019143519	27,6	13,6	27,57
CRUISE	0,093460648	0,019849537	28,6	14,6	28,58
CRUISE	0,094178241	0,02056713	29,6	15,6	29,62
CRUISE	0,094884259	0,021273148	30,6	16,6	30,63
CRUISE	0,095601852	0,021990741	31,7	17,7	31,67
CRUISE	0,096319444	0,022708333	32,7	18,7	32,70
CRUISE	0,097025463	0,023414352	33,7	19,7	33,72
CRUISE	0,097743056	0,024131944	34,8	20,8	34,75
CRUISE	0,098460648	0,024849537	35,8	21,8	35,78
CRUISE	0,099166667	0,025555556	36,8	22,8	36,80
CRUISE	0,099884259	0,026273148	37,8	23,8	37,83
CRUISE	0,100601852	0,026990741	38,9	24,9	38,87
CRUISE	0,10130787	0,027696759	39,9	25,9	39,88
CRUISE	0,101863426	0,028252315	40,7	26,7	40,68
DESCENT	0,102581019	0,028969907	41,7	27,7	41,72
DESCENT	0,103298611	0,0296875	42,8	28,8	42,75
DESCENT	0,10400463	0,030393519	43,8	29,8	43,77
DESCENT	0,104722222	0,031111111	44,8	30,8	44,80
DESCENT	0,105439815	0,031828704	45,8	31,8	45,83
DESCENT	0,106168981	0,03255787	46,9	32,9	46,88
DESCENT	0,106875	0,033263889	47,9	33,9	47,90
DESCENT	0,107592593	0,033981481	48,9	34,9	48,93
DESCENT	0,108310185	0,034699074	50,0	36,0	49,97
DESCENT	0,109027778	0,035416667	51,0	37,0	51,00
DESCENT	0,10974537	0,036134259	52,0	38,0	52,03
DESCENT	0,110462963	0,036851852	53,1	39,1	53,07
DESCENT	0,111180556	0,037569444	54,1	40,1	54,10
DESCENT	0,111909722	0,038298611	55,1	41,2	55,15
DESCENT	0,112627315	0,039016204	56,2	42,2	56,18
DESCENT	0,113344907	0,039733796	57,2	43,2	57,22
DESCENT	0,1140625	0,040451389	58,2	44,3	58,25
DESCENT	0,114791667	0,041180556	59,3	45,3	59,30
T-O	0,115509259	0,041898148	60,3	46,3	60,33
T-O	0,116226852	0,042615741	61,4	47,4	61,37
T-O	0,116666667	0,043055556	62,0	48,0	62,00