



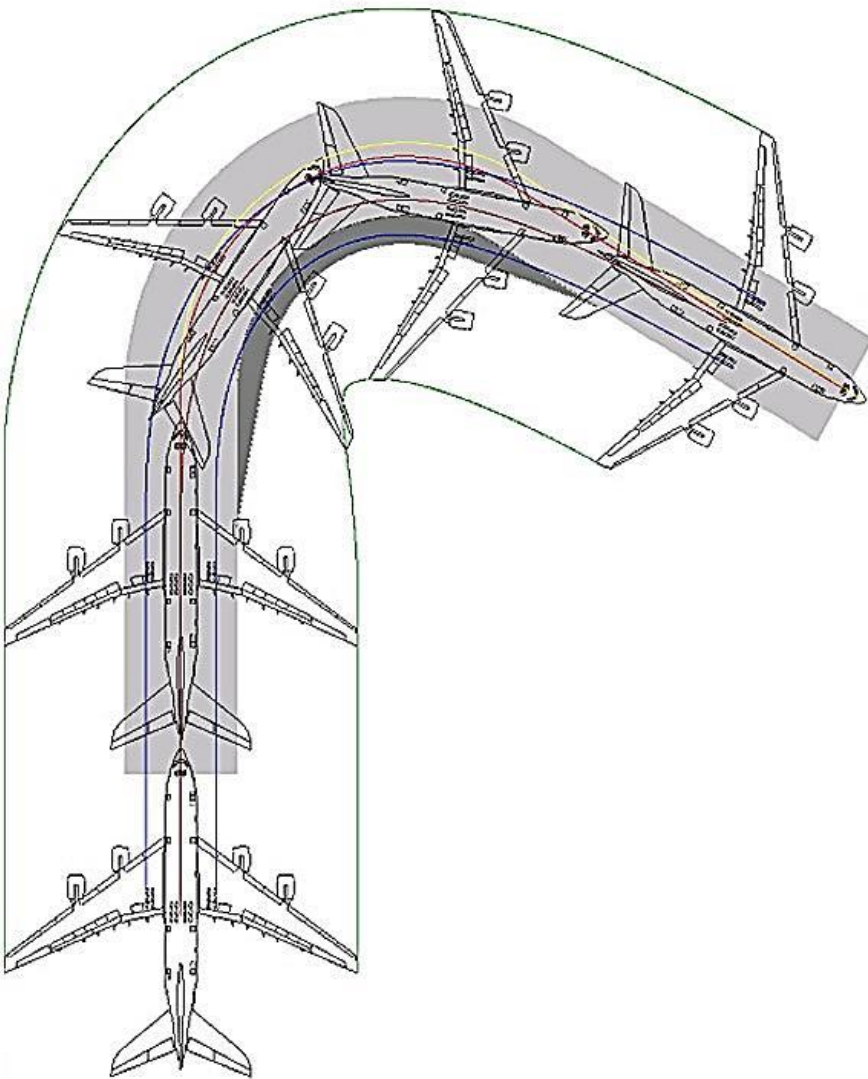
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΣΤΟ ΤΡΟΧΟΔΡΟΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ



ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΜΑΝΩΛΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

Π. ΨΑΡΑΚΗ - ΚΑΛΟΥΠΤΣΙΔΗ,
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Φ. ΜΕΡΤΖΑΝΗΣ, ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ

ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 5 - 157 73 ΖΩΓΡΑΦΟΥ
ΤΗΛ. & VOICE MAIL: 210 772 1203, 772 1285, TELEFAX: 210 772 1327



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPT. OF TRANSPORTATION PLANNING AND ENGINEERING
5, HEROON POLYTECHNIUM ST. GR-157 73 ZOGRAFOU, ATHENS
TEL & VOICE MAIL: +30210 772 1203, 772 1285, TELEFAX: +30210 772 1327

<http://www.civil.ntua.gr/transport.html>

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΣΤΟ ΤΡΟΧΟΔΡΟΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΜΑΝΩΛΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

Π. ΨΑΡΑΚΗ - ΚΑΛΟΥΠΤΣΙΔΗ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Φ. ΜΕΡΤΖΑΝΗΣ, ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

*Αφιερωμένη στον
Στράτο και τη Βασιλική Δεγαΐτα*

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Θα ήθελα λοιπόν, με την αφορμή αυτή, να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου, σε ολόκληρη τη φοιτητική μου πορεία

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Βούλα Ψαράκη, αναπληρώτρια Καθηγήτρια της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., που ανέλαβε την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας και ιδιαίτερος τον κ. Φώτη Μερτζάνη, επιστημονικό συνεργάτη ΕΜΠ, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τη συνεχή βοήθεια και υποστήριξη κατά την εκπόνηση της. Χωρίς την πολύτιμη συνεισφορά του δε θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της εργασίας.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω την κα. Ιωάννα Παγώνη, υποψήφια Διδάκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη δημιουργική συνεργασία και τον χρόνο που διέθεσε για την οργάνωση και τη διόρθωση της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης, τους φίλους και συμφοιτητές μου για την πολύτιμη βοήθεια και τη συνεχή υποστήριξή τους, καθώς και για την υπέροχη καθημερινότητα που μου χάρισαν τα τελευταία χρόνια.

Το μεγαλύτερο, όμως, ευχαριστώ χρωστάω στους γονείς μου, Κώστα και Ιφιγένεια, και τα αδέρφια μου, Μαρία και Πέτρο, οι οποίοι πάντα στηρίζουν τις επιλογές μου και μου δίνουν τη δυνατότητα μέσα από τις συμβουλές και την απεριόριστη αγάπη και προσφορά τους να επιτύχω κάθε στόχο και επιδίωξή μου.

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η γραφική απεικόνιση της εναέριας υποδομής ενός αεροδρομίου καθώς και η μελέτη της πορείας ενός αεροσκάφους στα επιμέρους τμήματά της. Στο πλαίσιο αυτής της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη ενός προγράμματος H/Y για την προσομοίωση της κίνησης των αεροσκαφών στο τροχοδρομικό σύστημα ενός αεροδρομίου. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκαν οι απαιτήσεις των κανονισμών διάφορων εθνικών και διεθνών φορέων πολιτικής αεροπορίας αλλά κυρίως του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO-International Civil Aviation Organization) και της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας (FAA-U.S. Federal Aviation Administration). Ο γεωμετρικός σχεδιασμός του πεδίου ελιγμών στηρίζεται στις προδιαγραφές του ICAO όπως αυτές αναφέρονται στο Annex 14 του International Convention on Civil Aviation. Βάσει αυτών των προδιαγραφών ορίζονται οι μεταβλητές του προγράμματος που αντιπροσωπεύουν το αεροσκάφος σχεδιασμού και την κατηγορία αεροδρομίου. Για την δημιουργία του κώδικα γίνεται χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Fortran και η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων εμφανίζεται στο σχεδιαστικό περιβάλλον του AutoCAD.

Λέξεις – Κλειδιά:

Εναέρια υποδομή, τροχοδρομικό σύστημα, πεδίο ελιγμών, πρόγραμμα H/Y, προσομοίωση κίνησης αεροσκάφους, διαπλάτυνση

Abstract

The aim of this thesis is the graphical display of the airside of an airport and the development of software for the simulation of the aircraft movement on the taxiway system. For this purpose the regulatory requirements of various national and international civil aviation organizations have been studied but especially those of the International Civil Aviation Organization (ICAO) and the Federal Aviation Administration (FAA-US). The geometric design of the airside is based on ICAO standards as referred to in Annex 14 of the International Convention on Civil Aviation. Based on these standards the required program variables representing the critical aircraft and the airport category are defined. The code is developed in FORTRAN programming language and the graphical presentation of results is displayed in the design environment of AutoCAD.

Keywords:

Airside, taxiway system, apron, software, aircraft motion simulation, fillet design

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της κίνησης ενός αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα ενός αεροδρομίου. Στο πλαίσιο αυτής της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε χρήση προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον γεωμετρικό σχεδιασμό της εναέριας υποδομής του αεροδρομίου και τον προσδιορισμό της πορείας του αεροσκάφους στα διάφορα τμήματα αυτής.

Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκαν οι κανονισμοί διάφορων διεθνών φορέων πολιτικής αεροπορίας και ειδικότερα των ICAO και FAA. Στη βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάζονται όλες οι προδιαγραφές που σχετίζονται με τον σχεδιασμό του τροχοδρομικού συστήματος, ανάλογα με τον τύπο αεροσκάφους που εξυπηρετεί το υπό μελέτη αεροδρόμιο, όπως επίσης και οι διάφορες μεθοδολογίες που σχετίζονται με τον προσδιορισμό της τροχιάς του αεροσκάφους.

Επίσης εξετάστηκε η ενδεχόμενη απαιτούμενη διαπλάτυνση που πρέπει να παρέχεται σε στροφή ή συμβολή τροχοδρόμων, ώστε να καλύπτεται το ελάχιστο απαιτούμενο περιθώριο ασφαλείας μεταξύ των εξωτερικών τροχών και του τροχοδρόμου, και αναλύθηκαν οι διαφορετικές μεθοδολογίες που σχετίζονται με τον υπολογισμό της. Πιο συγκεκριμένα περιγράφεται η γραφική, η ταχεία μέθοδος γραφημάτων, και η μέθοδος τόξου και εφαπτομένης κατά ICAO, καθώς και η μέθοδος σχεδιασμού διαπλάτυνσης κατά FAA. Στη συνέχεια πραγματοποιείται εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων με κοινά δεδομένα με σκοπό την σύγκρισή τους και την ανάλυση των συμπερασμάτων. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε ότι καταλληλότερη μέθοδος υπολογισμού διαπλάτυνσεων είναι η μέθοδος τόξου και εφαπτομένης καθώς είναι πιο εύκολα κατασκευάσιμη σε σχέση με την γραφική η οποία είναι ακριβέστερη στον υπολογισμό, αλλά παράγει πολύπλοκη καμπύλη συναρμογής.

Παράλληλα με τη μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου που σχετίζεται με τον γεωμετρικό σχεδιασμό της εναέριας υποδομής, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα H/Y που προσδιορίζει την πορεία ενός αεροσκάφους σε ένα υπάρχον αεροδρόμιο, τα στοιχεία του οποίου δίδονται από τον χρήστη. Πιο συγκεκριμένα ο μελετητής εισάγει ως δεδομένα το μοντέλο εδάφους της περιοχής, τα σημεία της τροχιάς που ακολουθεί το αεροσκάφος (πολυγωνική χάραξης οριζοντιογραφίας), τις σημαίες της μηκοτομής, τον τύπο του αεροσκάφους σχεδιασμού, καθώς και τα πολύγωνα ασφαλοστρωμένης επιφάνειας και τις επιφάνειες εμποδίων που υπάρχουν στον χώρο του αεροδρομίου.

Το πρόγραμμα διαβάζει τα σημεία του άξονα όπως προκύπτουν από την οριζοντιογραφία και καθορίζει την τροχιά που ακολουθούν οι τροχοί του αεροσκάφους, με την παραδοχή ότι ο ρινιαίος τροχός ακολουθεί τον άξονα του τροχοδρόμου, και ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του αεροσκάφους χαράσσονται οι τροχιές των ιχνών των τροχών και των φτερών με τα κατάλληλα περιθώρια ασφαλείας που προκύπτουν από τους κανονισμούς, ώστε να ελεγχθούν σε σχέση με τα πολύγωνα οδοστρωσίας και εμποδίων που έχουν δοθεί από τον χρήστη του προγράμματος. Επισημαίνεται ότι οι τροχιές των εξωτερικών τροχών και των φτερών του αεροσκάφους προκύπτουν σύμφωνα με τη γραφική μέθοδο καθορισμού της τροχιάς της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών και έπειτα από κατάλληλο μετασχηματισμό συντεταγμένων.

Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιούνται δύο έλεγχοι: ο πρώτος αφορά στα πολύγωνα ασφαλοστρωμένης επιφάνειας και ελέγχει αν οι εξωτερικοί τροχοί του αεροσκάφους μαζί με το ελάχιστο απαιτούμενο περιθώριο ασφαλείας βρίσκονται στο εσωτερικό κάποιου πολυγώνου, και ο δεύτερος σχετίζεται με τα πολύγωνα εμποδίων όπου επιδιώκεται το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα άκρα των δύο φτερών του αεροσκάφους, συνυπολογίζοντας και την απόσταση ασφαλείας, να μην τέμνει κανένα από τα υπάρχοντα πολύγωνα.

Όταν δεν ικανοποιείται κάποιος από τους ελέγχους οδοστρωμένης επιφάνειας επισημαίνονται από το πρόγραμμα τα αντίστοιχα σημεία και προτείνεται εκ νέου γεωμετρικός σχεδιασμός των επιμέρους τμημάτων της εναέριας υποδομής σύμφωνα με τις αρχές που αναλύονται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σε περίπτωση που εντοπίζεται πρόβλημα με κάποιο σταθερό εμπόδιο, συνιστάται η απομάκρυνση του εμποδίου από τον χώρο του αεροδρομίου.

Από την εφαρμογή του προγράμματος συμπεραίνεται ότι πρόκειται για ένα χρήσιμο εργαλείο το οποίο επιτρέπει στον χρήστη να μελετήσει την πορεία οποιουδήποτε αεροσκάφους σε οποιοδήποτε αεροδρόμιο και να εντοπίσει τα ενδεχόμενα σημεία όπου εμφανίζονται προβλήματα γεωμετρικού σχεδιασμού του τροχοδρομικού συστήματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 1 -
1.1 Γενική ανασκόπηση	- 1 -
1.2 Στόχοι	- 4 -
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας	- 5 -
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	- 7 -
2.1 Εισαγωγή.....	- 7 -
2.2 Εναέρια υποδομή.....	- 7 -
2.3 Σύνοψη Θεωρίας	- 9 -
2.4 Κίνηση αεροσκάφους.....	- 14 -
2.5 Σχεδιασμός διαπλάτυνσεων	- 15 -
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	- 17 -
3.1 Γενικά.....	- 17 -
3.2 Τεχνική ορολογία και Συμβολισμοί.....	- 18 -
3.3 Καθορισμός της τροχιάς του κέντρου βάσης κυρίου συστήματος τροχών αεροσκάφους κατά την κίνηση του στο τροχοδρομικό σύστημα	- 22 -
3.3.1 Καθορισμός τροχιάς με χρήση μαθηματικής θεωρίας	- 22 -
3.3.2 Καθορισμός τροχιάς με χρήση γραφημάτων.....	- 44 -
3.4 Μέθοδοι σχεδιασμού διαπλάτυνσεων κατά ICAO	- 52 -
3.4.1 Γραφική Μέθοδος.....	- 52 -
3.4.2 Μέθοδος τόξου και εφαπτομένης.....	- 57 -
3.4.3 Ταχεία μέθοδος γραφημάτων	- 68 -
3.5 Μέθοδος σχεδιασμού διαπλάτυνσεων κατά FAA.....	- 71 -
3.5.1 Γενικά	- 71 -
3.5.2 Τεχνική ορολογία και Συμβολισμοί	- 72 -
3.5.3 Σχεδιασμός διαπλάτυνσης τροχοδρόμου.....	- 77 -
3.6 Εφαρμογή μεθοδολογίας.....	- 81 -
3.6.1 Γραφική μέθοδος	- 82 -
3.6.2 Μέθοδος τόξου και εφαπτομένης.....	- 84 -
3.6.3 Μέθοδος σχεδιασμού διαπλάτυνσεων κατά FAA	- 87 -
3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....	- 88 -

4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ AIRCRAFT TURN – ATR.....	- 89 -
4.1 Γενικά.....	- 89 -
4.2 Δεδομένα προγράμματος.....	- 89 -
4.3 Περιγραφή του προγράμματος.....	- 92 -
4.3.1 Συνοπτική περιγραφή προγράμματος.....	- 92 -
4.3.2 Αναλυτική περιγραφή προγράμματος.....	- 97 -
4.4 Παραδείγματα εφαρμογής προγράμματος Aircraft Turn.....	- 105 -
<i>Παράδειγμα 1: Συνολικός έλεγχος πολυγώνων.....</i>	<i>- 105 -</i>
<i>Παράδειγμα 2: Εντοπισμός προβλημάτων στις οδοστρωμένες επιφάνειες...</i>	<i>- 109 -</i>
<i>Παράδειγμα 3: Εντοπισμός προβλημάτων στα πολύγωνα εμποδίων.....</i>	<i>- 111 -</i>
<i>Παράδειγμα 4: Έλεγχος αεροσκάφους μεγαλύτερων διαστάσεων.....</i>	<i>- 113 -</i>
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	- 115 -
5.1 Συνολικά συμπεράσματα.....	- 115 -
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	- 118 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 119 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	- 121 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ – ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 1.1 Σύγκρουση αεροσκαφών στο αεροδρόμιο της Τενερίφης (1977).....	- 2 -
Σχήμα 1.2 Παραδείγματα σύγκρουσης φτερών αεροσκαφών με κινητά- σταθερά εμπόδια-	3 -
Σχήμα 1.3 Διάγραμμα ροής βασικών σταδίων διπλωματικής εργασίας.....	- 6 -
Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά κυριότερων τύπων αεροσκαφών	- 10 -
Σχήμα 2.1 Διαστάσεις αεροσκάφους.....	- 11 -
Σχήμα 2.2 Διαστάσεις αεροσκάφους για τα δάπεδα αναμονής.....	- 11 -
Πίνακας 2.2 Κατάταξη αεροδρομίων κατά ICAO (ICAO 2004)	- 12 -
Πίνακας 2.3 Κατάταξη αεροδρομίων κατά FAA (FAA 2014).....	- 12 -
Πίνακας 2.4 Ελάχιστο πλάτος διαδρόμου (m) (ICAO 2004)	- 12 -
Πίνακας 2.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τροχοδρομικού συστήματος (m)	- 13 -
Πίνακας 2.6 Αποστάσεις ασφαλείας ανάλογα με τον τύπο αεροσκάφους.....	- 13 -
Σχήμα 2.3 Προσδιορισμός ίχνους τροχών με τη γραφική μέθοδο	- 15 -
Σχήμα 3.1 Όροι και Σύμβολα σχετικά με το αεροσκάφος (ICAO 2005)	- 20 -
Σχήμα 3.2 Όροι και Σύμβολα σχετικά με τον σχεδιασμό διαπλατύνσεων.....	- 21 -
Σχήμα 3.3 Μελέτη κίνησης βάσης κυρίου συστήματος τροχών (ICAO 2005).....	- 23 -
Σχήμα 3.4 Γωνία οδήγησης και αποκλίσεις του κυρίου συστήματος τροχών όταν $R=d$ (ICAO 2005).....	- 25 -
Σχήμα 3.5 Απόκλιση (λ) της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους όταν ο ρινιαίος τροχός ακολουθεί τόξο κύκλου (ICAO 2005)	- 28 -
Σχήμα 3.6 Απόκλιση βάσης κυρίου συστήματος τροχών όταν το αεροσκάφος κινείται σε ευθεία γραμμή (ICAO 2005)	- 29 -
Σχήμα 3.7 Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί ευθύγραμμη τροχιά (ICAO 2005)	- 31 -
Σχήμα 3.8 Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί κυκλική τροχιά (ICAO 2005)	- 32 -
Σχήμα 3.9 Πολική γωνία του σημείου αναφοράς (S) του αεροσκάφους	- 39 -
Σχήμα 3.10 Μέγιστη απόκλιση (λ_{max}) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους (ICAO 2005)	- 40 -
Σχήμα 3.11 Γωνία οδήγησης (β) και απόκλιση (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους (ICAO 2005)	- 41 -
Σχήμα 3.12 Αύξηση της γωνίας οδήγησης κατά τη διάρκεια μιας στροφής.....	- 42 -
Σχήμα 3.13 Μείωση της γωνίας οδήγησης κατά την ολοκλήρωση της στροφής.....	- 43 -
Σχήμα 3.14 Παράδειγμα υπολογισμού απόκλισης βάσης κυρίου συστήματος τροχών όταν το αεροσκάφος εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση (ICAO 2005)	- 44 -
Σχήμα 3.15 Παράδειγμα υπολογισμού απόκλισης βάσης κυρίου συστήματος τροχών όταν το αεροσκάφος ακολουθεί καμπύλη τροχιά (ICAO 2005)	- 46 -
Πίνακας 3.1 Σχέση μεταξύ γωνίας οδήγησης και γωνιακής απόκλισης ρινιαίου τροχού ...	- 49 -
Σχήμα 3.16 Γραφική μέθοδος σχεδιασμού διαπλατύνσεων (ICAO 2005).....	- 56 -
Σχήμα 3.17 Σχεδιασμός διαπλατύνσεων με τη μέθοδο τόξου και εφαπτομένης.....	- 62 -
Σχήμα 3.18 Παράδειγμα σχεδιασμού διαπλατύνσεων με τη μέθοδο τόξου και εφαπτομένης (ICAO 2005).....	- 63 -
Σχήμα 3.19 Σύνθετη καμπύλη συναρμογής για αεροσκάφος με μεγάλο μήκος αναφοράς-	67 -
Σχήμα 3.20 Διάγραμμα διαπλατύνσης τροχοδρόμου (ICAO 2005).....	- 69 -
Σχήμα 3.21 Ταχεία μέθοδος γραφημάτων για το Boeing 747 (ICAO 2005)	- 70 -

Σχήμα 3.22 Παραδείγματα συμβολών τροχοδρόμων (FAA 2014)	- 75 -
Σχήμα 3.23 Απεικόνιση συμβολισμών διαπλάτυνσης (FAA 2014)	- 76 -
Σχήμα 3.24 Αποδεκτές τιμές περιθωρίου ασφαλείας (M), όταν ο ρινιαίος τροχός ακολουθεί τον άξονα του τροχοδρόμου (FAA 2014)	- 78 -
Σχήμα 3.25 Γραφική μέθοδος σχεδιασμού διαπλατύσεων - Παράδειγμα	- 83 -
Σχήμα 3.26 Μέθοδος τόξου και εφαπτομένης - Παράδειγμα.....	- 86 -
Σχήμα 3.27 Μέθοδος σχεδιασμού διαπλατύσεων κατά FAA - Παράδειγμα.....	- 87 -
Σχήμα 3.28 Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	- 88 -
Σχήμα 4.1 Μετασχηματισμός Συντεταγμένων.....	- 90 -
Σχήμα 4.2 Συνολικά δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα	- 91 -
Σχήμα 4.3 Κρατικός Αερολιμένας Σαντορίνης	- 92 -
Σχήμα 4.4 Σημεία μοντέλου εδάφους.....	- 93 -
Σχήμα 4.5 Κορυφές Οριζοντιογραφίας	- 93 -
Σχήμα 4.6 Χαρακτηριστικά σημεία αεροσκάφους.....	- 94 -
Σχήμα 4.7 Εντοπισμός σημείου ως προς μη κυρτό πολύγωνο	- 95 -
Σχήμα 4.8 Έλεγχος τομής ευθύγραμμων τμημάτων.....	- 96 -
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ροής ATR	- 97 -
Σχήμα 4.10 Επιλογή αεροσκάφους σχεδιασμού.....	- 98 -
Σχήμα 4.11 Χάραξη άξονα διαδρόμου - τροχοδρόμου	- 99 -
Σχήμα 4.12 Γραφική μέθοδος προσδιορισμού θέσης αεροσκάφους.....	- 100 -
Σχήμα 4.13 Τοποθέτηση αεροσκάφους σε διαδοχικές θέσεις	- 101 -
Σχήμα 4.14 Χάραξη τροχιάς εξωτερικών τροχών και φτερών αεροσκάφους.....	- 102 -
Σχήμα 4.15 Χάραξη πολυγώνων οδοστρωσίας και εμποδίων.....	- 103 -
Σχήμα 4.16 Κορυφές Οριζοντιογραφίας - Παράδειγμα 1	- 105 -
Σχήμα 4.17 Τροχιά ρινιαίου τροχού.....	- 106 -
Σχήμα 4.18 Τροχιά εξωτερικών τροχών και φτερών με αποστάσεις ασφαλείας	- 106 -
Σχήμα 4.19 Λεπτομέρεια χάραξης τροχιών.....	- 106 -
Σχήμα 4.20 Πολύγωνα οδοστρωσίας και εμποδίων	- 107 -
Σχήμα 4.21 Έλεγχος πολυγώνων οδοστρωσίας και εμποδίων	- 108 -
Σχήμα 4.22 Οριζοντιογραφία με τροχιές και το πολύγωνο οδοστρωσίας διαδρόμου.....	- 109 -
Σχήμα 4.23 Έλεγχος πολυγώνων ασφαλτοστρωμένης επιφάνειας	- 110 -
Σχήμα 4.24 Οριζοντιογραφία με δεδομένα πολύγωνα εμποδίων πάνω στην τροχιά του αεροσκάφους.....	- 111 -
Σχήμα 4.25 Έλεγχος εμποδίων	- 112 -
Σχήμα 4.26 Παράδειγμα πορείας μεγάλου τύπου αεροσκάφους.....	- 113 -
Σχήμα 4.27 Εντοπισμός σφαλμάτων στον έλεγχο πολυγώνων οδοστρωσίας	- 114 -
Σχήμα 5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	- 116 -

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική ανασκόπηση

Η εναέρια υποδομή ενός αεροδρομίου αποτελείται από το σύστημα διαδρόμων, το τροχοδρομικό σύστημα και τα δάπεδα στάθμευσης των αεροσκαφών. Για τον γεωμετρικό σχεδιασμό της εναέριας υποδομής λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις των κανονισμών του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO-International Civil Aviation Organization) και της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας (FAA-U.S. Federal Aviation Administration). Σύμφωνα με αυτές τις διατάξεις πραγματοποιείται κατάταξη των αεροδρομίων συναρτήσει των φυσικών χαρακτηριστικών του κρίσιμου αεροσκάφους που το χρησιμοποιεί. Με βάση τον κωδικό αναφοράς που προκύπτει για κάθε αεροδρόμιο καθορίζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος διαδρόμων και του τροχοδρομικού συστήματός του.

Η σύνδεση των διαδρόμων με τα δάπεδα στάθμευσης γίνεται μέσω των τροχοδρόμων, η διάταξη των οποίων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται:

- μείωση του χρόνου κατάληψης του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης,
- μείωση της διαδρομής των αεροσκαφών από το διάδρομο προς τα δάπεδα στάθμευσης και αντίστροφα, και
- ασφαλής μετακίνηση των αεροσκαφών χωρίς να προκαλούν παρεμπόδιση στο διάδρομο προσγειώσεων-απογειώσεων.

Σε αεροδρόμια με μικρή κυκλοφορία (όπως για παράδειγμα σε πολλά ελληνικά περιφερειακά αεροδρόμια) οι τροχοδρόμοι μπορεί να παραλείπονται. Σε αυτήν την περίπτωση πραγματοποιείται ειδική διαμόρφωση του διαδρόμου με κυκλική διαπλάτυνση στα δύο άκρα ώστε να επιτρέπεται η στροφή του αεροσκάφους κατά 180° ώστε να κατευθυνθεί προς την έξοδο και το δάπεδο στάθμευσης.

Η σύνδεση του διαδρόμου με τους τροχοδρόμους και τα δάπεδα στάθμευσης γίνεται με τη βοήθεια των εξόδων, οι οποίες σχεδιάζονται είτε κάθετες στον άξονα του διαδρόμου ή τροχοδρόμου, είτε με οξεία γωνία. Οι συνδέσεις υπό γωνία ονομάζονται έξοδοι μεγάλης ταχύτητας και συμβάλουν στη μείωση του χρόνου κατάληψης του διαδρόμου καθώς επιτρέπουν στο αεροσκάφος να κινηθεί με μικρότερη επιβράδυνση.

Η κίνηση ενός αεροσκάφους στα διαφορετικά τμήματα της εναέριας υποδομής πρέπει να είναι όσο το δυνατό σύντομη και ασφαλής. Αυτό επιτυγχάνεται με το σωστό σχεδιασμό και την τήρηση των κανονισμών που αφορούν τα πλάτη των εκάστοτε στοιχείων (διάδρομοι, τροχοδρόμοι, έξοδοι), τις αποστάσεις μεταξύ τους και τις αποστάσεις ασφαλείας. Για αυτόν τον λόγο κρίνεται αναγκαία η κατασκευή διαπλάτυνσης στις στροφές. Το μέγεθος της διαπλάτυνσης πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να διασφαλίζεται το περιθώριο ασφαλείας που απαιτείται από τους κανονισμούς σε σχέση με τον κωδικό αναφοράς του αεροδρομίου. Η μελέτη των διαπλάτυσεων επιτυγχάνεται είτε με γραφικές είτε αναλυτικές μεθόδους.

Η αναγκαιότητα ανάπτυξης ενός λογισμικού που ερευνά την πορεία των αεροσκαφών στο τροχοδρομικό σύστημα έγκειται στο γεγονός αποφυγής ατυχημάτων στην εναέρια υποδομή ενός αεροδρομίου. Έχουν καταγραφεί συμβάντα που αφορούν τη σύγκρουση αεροσκαφών στο έδαφος, μεταξύ των οποίων σημειώθηκαν και δυστυχήματα που κόστισαν τη ζωή εκατοντάδων επιβατών και μελών πληρώματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πλέον πολύνεκρο δυστύχημα στην ιστορία των αερομεταφορών, όπου δύο Boeing 747 συγκρούονται στον διάδρομο του αεροδρομίου της Τενερίφης το 1977 και 583 άνθρωποι βρίσκουν τραγικό θάνατο (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Σύγκρουση αεροσκαφών στο αεροδρόμιο της Τενερίφης (1977)

Επιπλέον έχουν σημειωθεί αρκετά περιστατικά σύγκρουσης των φτερών των αεροπλάνων είτε με σταθερά εμπόδια είτε με άλλα αεροσκάφη (Σχήμα 1.2). Για την αποφυγή τέτοιων συμβάντων κρίνεται απαραίτητη η μελέτη των επικίνδυνων σημείων στην εναέρια υποδομή ενός αεροδρομίου καθώς και ο σωστός σχεδιασμός του τροχοδρομικού συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας, όπως η τήρηση των αποστάσεων ασφαλείας και των ελάχιστων αποστάσεων μεταξύ των τμημάτων της εναέριας υποδομής.



Σχήμα 1.2 Παραδείγματα σύγκρουσης φτερών αεροσκαφών με κινητά ή σταθερά εμπόδια

1.2 Στόχοι

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της πορείας ενός αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα ενός αεροδρομίου. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τον σχεδιασμό της εναέριας υποδομής και συγκεκριμένα του σχεδιασμού διαπλατύνσεων.

Ακόμα, χρησιμοποιείται λογισμικό για την γραφική απεικόνιση των επιμέρους τμημάτων της εναέριας υποδομής ενός αεροδρομίου, λαμβάνοντας ως δεδομένα τα φυσικά χαρακτηριστικά του όπως αυτά καθορίζονται από τις απαιτήσεις των κανονισμών των διεθνών φορέων πολιτικής αεροπορίας.

Επιπλέον στόχος είναι η δημιουργία ενός προγράμματος που προσομοιάζει την κίνηση ενός αεροσκάφους στον διάδρομο, το τροχοδρομικό σύστημα και τα δάπεδα στάθμευσης. Αυτό καθιστά δυνατό τον προσδιορισμό της τροχιάς οποιουδήποτε σημείου του αεροσκάφους για την αντίστοιχη διαδρομή. Τα αποτελέσματα της γραφικής απεικόνισης της κίνησης του αεροσκάφους θα εμφανίζονται στο γραφικό περιβάλλον του AutoCAD.

Τέλος, επιχειρείται η προσομοίωση κίνησης ενός αεροσκάφους σε ένα υφιστάμενο αεροδρόμιο, συγκεκριμένα του κρατικού αερολιμένα της Σαντορίνης, με σκοπό την περιγραφή όλων των πιθανών κινήσεων του αεροσκάφους από το σημείο προσγείωσης στον διάδρομο μέχρι το δάπεδο στάθμευσης μέσω της τροχοδρόμησης του, και αντίστροφα. Κατά την κίνηση αυτή ελέγχονται ότι τηρούνται τα ελάχιστα περιθώρια ασφαλείας μεταξύ των εξωτερικών τροχών του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους και της οριογραμμής του τροχοδρόμου, καθώς και οι ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας από τις άκρες των φτερών από οποιοδήποτε εμπόδιο που βρίσκεται στον χώρο του αεροδρομίου.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζεται ως εξής (Σχήμα 1.3):

Στο **πρώτο** – εισαγωγικό - **κεφάλαιο** πραγματοποιείται μία συνοπτική αναφορά στα επιμέρους τμήματα της εναέριας υποδομής ενός αεροδρομίου, καθώς και στις διατάξεις που διέπουν την κίνηση ενός αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα. Περιγράφονται, επίσης, οι βασικότεροι στόχοι της διπλωματικής εργασίας.

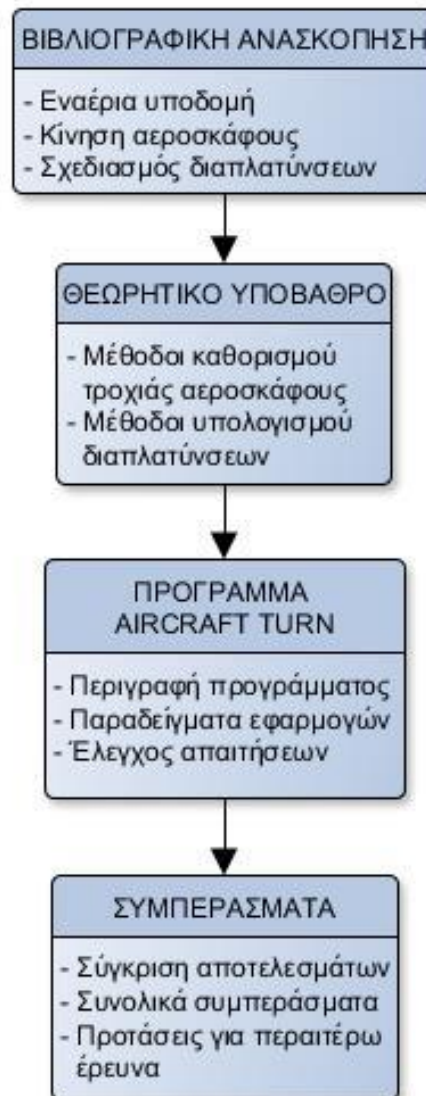
Το **δεύτερο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται τα επιμέρους τμήματα της εναέριας υποδομής, καθώς και τα χαρακτηριστικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό των εν λόγω τμημάτων. Στη συνέχεια, συνοψίζονται σε πίνακες και σχήματα οι όροι και οι κανονισμοί που σχετίζονται με τον γεωμετρικό σχεδιασμό της εναέριας υποδομής. Το δεύτερο μέρος εστιάζει στην κίνηση του αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα, περιγράφοντας συνοπτικά την διαδικασία προσδιορισμού του ίχνους των τροχών του. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέθοδοι σχεδιασμού των διαπλατύνσεων στις καμπύλες των τροχοδρόμων.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τον σχεδιασμό διαπλατύνσεων στις στροφές ή τις συνδέσεις διαδρόμων και τροχοδρόμων, σύμφωνα με τον οποίο προκύπτουν τα πολύγωνα ασφαλοστρωμένης επιφάνειας των αεροδρομίων. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται οι τρόποι καθορισμού της τροχιάς ενός αεροσκάφους κατά την κίνησή του στο τροχοδρομικό σύστημα ενός αεροδρομίου, καθώς επίσης και οι μέθοδοι υπολογισμού διαπλατύνσεων όπως προτείνονται από τους διεθνείς φορείς αεροπορίας. Τέλος, πραγματοποιείται εφαρμογή των μεθοδολογιών που αναλύθηκαν με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή Aircraft Turn (ATR) που αναπτύχθηκε για την μελέτη της πορείας ενός αεροσκάφους, καθώς και η ανάπτυξη εφαρμογών του για συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών στο υφιστάμενο αεροδρόμιο της Σαντορίνης.

Το **πέμπτο κεφάλαιο** περιλαμβάνει την παρουσίαση των σημαντικότερων συμπερασμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του προγράμματος προσομοίωσης κίνησης αεροσκάφους. Ακόμα, προτίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με το αντικείμενο των αεροδρομίων.

Τέλος, το **παράρτημα** περιλαμβάνει τον κώδικα του προγράμματος, που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα ροής βασικών σταδίων διπλωματικής εργασίας

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την γραφική απεικόνιση της εναέριας υποδομής ενός αεροδρομίου, καθώς και την προσομοίωση της πορείας του αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα, ώστε να ελέγχεται η ασφαλής κίνηση του μέσα σε αυτό εξασφαλίζοντας ότι τηρούνται τα ελάχιστα απαιτούμενα περιθώρια ασφαλείας μεταξύ τροχών και τροχοδρόμου, καθώς και οι ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας των άκρων των φτερών από τα εμπόδια που βρίσκονται στο χώρο του αεροδρομίου.

Γι αυτόν τον λόγο κρίνεται απαραίτητο να γίνει αναφορά στα βασικά στοιχεία της θεωρίας των αεροδρομίων που σχετίζονται με το θέμα της μελέτης, όπως και στις απαιτήσεις των κανονισμών που διέπουν τον γεωμετρικό σχεδιασμό του πεδίου ελιγμών ενός αεροδρομίου καθώς και την κίνηση των αεροσκαφών μέσα σε αυτό.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικότερα στοιχεία για τον σχεδιασμό αεροδρομίων όπως αυτά αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και κυρίως στα εγχειρίδια των οργανισμών πολιτικής αεροπορίας ICAO και FAA.

2.2 Εναέρια υποδομή

Η εναέρια υποδομή ενός αεροδρομίου περιλαμβάνει τις περιοχές όπως αυτές ορίζονται στη συνέχεια.

- Πεδίο ελιγμών (maneuvering area): Η περιοχή του αεροδρομίου που χρησιμοποιείται για την προσγείωση, απογείωση και τροχοδρόμηση των αεροσκαφών και περιλαμβάνει τους τροχοδρόμους, τους συνδετήριους κλάδους, τις ζώνες ασφαλείας και τους χώρους αναμονής αεροσκαφών.
Ο γεωμετρικός σχεδιασμός του πεδίου ελιγμών πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία, ευελιξία και δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, λόγω της συνεχώς αυξανόμενης αεροπορικής ζήτησης.
- Περιοχή Κίνησης Αεροσκαφών (movement area): Περιοχή του αεροδρομίου που περιλαμβάνει την περιοχή στάθμευσης αεροσκαφών και το πεδίο ελιγμών.
- Περιοχή Στάθμευσης (πίστα) Αεροσκαφών (apron ή ramp): Η καθορισμένη περιοχή του αεροδρομίου, στην οποία λαμβάνει χώρα η επίγεια εξυπηρέτηση των αεροσκαφών δηλαδή επιβίβαση και αποβίβαση επιβατών, φόρτωση ή εκφόρτωση ταχυδρομείου ή φορτίου, τροφοδοσία, ανεφοδιασμός με καύσιμα, στάθμευση, συντήρηση και άλλα.

Σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό ενός αεροδρομίου παίζει το τροχοδρομικό σύστημα, το οποίο πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη

άνεση και ασφάλεια κατά την κίνηση των αεροσκαφών από και προς τον διάδρομο προσγείωσης-απογείωσης και τα δάπεδα στάθμευσης.

Στη συνέχεια αναφέρονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό του συστήματος διαδρόμων και του τροχοδρομικού συστήματος ενός αεροδρομίου.

i) Αεροσκάφος σχεδιασμού

Κρίσιμο αεροσκάφος ή αεροσκάφος σχεδιασμού καλείται το πιο απαιτητικό αεροσκάφος που χρησιμοποιεί το αεροδρόμιο. Σύμφωνα με την FAA (FAA, 2011) το αεροσκάφος σχεδιασμού θα πρέπει να χρησιμοποιεί το αεροδρόμιο τουλάχιστον 250 ημέρες το χρόνο.

Τα βασικά στοιχεία του κρίσιμου αεροσκάφους που επηρεάζουν τον σχεδιασμό παρουσιάζονται παρακάτω.

- Άνοιγμα φτερών αεροσκάφους
- Μήκος αεροσκάφους
- Πλάτος βάσης κύριου συστήματος τροχών
- Απόσταση ρινιαίου τροχού και βάσης κύριου συστήματος τροχών
- Μέγιστη γωνία οδήγησης ρινιαίου τροχού
- Ελάχιστη ακτίνα στροφής αεροσκάφους

Το μέγεθος του κρίσιμου αεροσκάφους χρησιμοποιείται επίσης για την διαστασιολόγηση του χώρου στάθμευσης αεροσκαφών. Τα κύρια στοιχεία του αεροσκάφους που επηρεάζουν την εν λόγω διαστασιολόγηση είναι το μήκος του αεροσκάφους (L), το άνοιγμα φτερών (WS) καθώς και η ακτίνα στροφής (R).

ii) Κατάταξη αεροδρομίου

Η κατάταξη των αεροδρομίων γίνεται με βάση το κρίσιμο αεροσκάφος και σκοπό έχει την παροχή μιας απλής μεθόδου σύνδεσης όλων των απαιτήσεων των κανονισμών για τον σχεδιασμό αεροδρομίων, ώστε να ικανοποιούνται όλα τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν το εκάστοτε αεροδρόμιο. Σύμφωνα με τον ICAO και την FAA η κατάταξη γίνεται με τον συνδυασμό δύο ψηφίων ως κωδικό αναφοράς του αεροδρομίου. Συγκεκριμένα για τον ICAO το πρώτο ψηφίο προσδιορίζει το μήκος αναφοράς διαδρόμου (airplane Reference Field Length-RFL) και παίρνει τις αριθμητικές τιμές ένα έως τέσσερα, ενώ το δεύτερο ψηφίο καθορίζεται από το πιο απαιτητικό ως προς τα εξής χαρακτηριστικά του κρίσιμου αεροσκάφους: άνοιγμα φτερών (Wing Span-WS) και απόσταση εξωτερικών κύριων τροχών (Outer Main Gear wheel span-OMG) και συμβολίζεται με έναν κωδικό γράμμα του λατινικού αλφαβήτου από A έως και F. Παρομοίως γίνεται και η κατηγοριοποίηση κατά FAA,

σύμφωνα με την οποία το πρώτο ψηφίο σχετίζεται με την ταχύτητα προσέγγισης αεροσκάφους (Approach Speed-AS) και το δεύτερο με το άνοιγμα φτερών του κρίσιμου αεροσκάφους. Το πρώτο ψηφίο συμβολίζεται με ένα γράμμα από Α έως Ε, ενώ το δεύτερο με έναν λατινικό αριθμό από Ι έως VI.

iii) Καμπύλες τροχοδρόμων

Οι τροχόδρομοι πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν τεταμένη χάραξη, να αποφεύγονται δηλαδή οι αλλαγές διεύθυνσης, όπου αυτό είναι εφικτό, ή σε αντίθετη περίπτωση η αλλαγή να γίνεται με μεγάλες ακτίνες. Ακόμα, οι ακτίνες πρέπει να είναι συμβατές με την ικανότητα ελιγμών και την ταχύτητα τροχοδρόμησης του αεροσκάφους. Τέλος, στις στροφές ή στη συμβολή τροχοδρόμων είναι αναγκαίος ο σχεδιασμός μιας διαπλάτυνσης, ώστε να διασφαλίζεται το ελάχιστο αποδεκτό περιθώριο ασφαλείας μεταξύ των ακρότατων τροχών ενός αεροσκάφους και της οριογραμμής του τροχοδρόμου, οι τιμές του οποίου προτείνονται από τους διάφορους φορείς πολιτικής αεροπορίας.

2.3 Σύνοψη Θεωρίας

Στη συνέχεια συνοψίζονται οι κανονισμοί και τα βασικά στοιχεία της θεωρίας των αεροδρομίων που είναι απαραίτητα για τον καθορισμό των μεταβλητών του προγράμματος που θα αναπτυχθεί σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

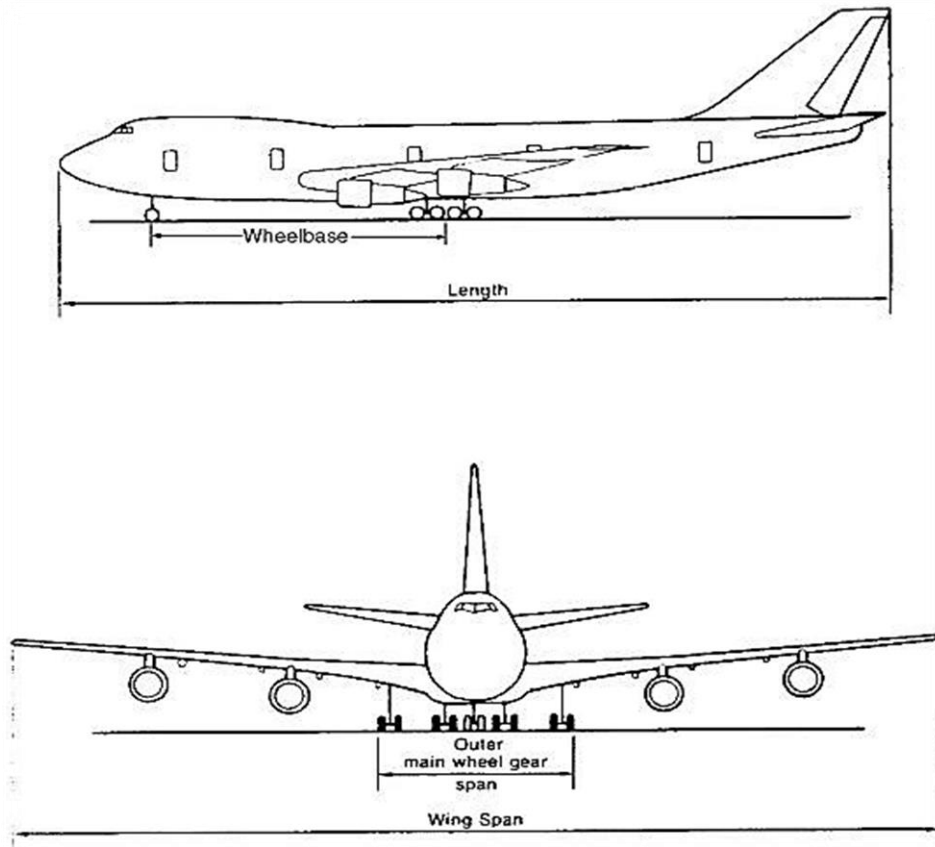
Αρχικά παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των συνηθέστερων αεροσκαφών των εταιρειών Airbus και Boeing (Πίνακας 2.1), με βάση τα οποία πραγματοποιείται ο γεωμετρικός σχεδιασμός του πεδίου ελιγμών ενός αεροδρομίου, και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του προγράμματος Η/Υ. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται εφαρμογή του προγράμματος για τους εξής τύπους αεροσκαφών: A319, A320, A321 και A380 της κατασκευάστριας εταιρείας Airbus και B737, B747, B757, B767 της Boeing. Η επιλογή των συγκεκριμένων αεροσκαφών έγινε με βάση τους πιο διαδεδομένους τύπους αεροσκαφών που εξυπηρετούνται συχνότερα σε αεροδρόμια. Πιο συγκεκριμένα, από τα στοιχεία του κρατικού αερολιμένα της Σαντορίνης, προέκυψε ότι εξυπηρετεί κυρίως τον στόλο της αεροπορικής εταιρείας Aegean Airlines, ο οποίος απαρτίζεται από τα αεροσκάφη A319, A320 και A321. Επιπλέον, για να καλυφθεί ένα ευρύτερο φάσμα τύπων αεροσκαφών, συλλέχθηκαν στοιχεία κίνησης αεροσκαφών παγκοσμίως και ύστερα από στατιστική επεξεργασία προέκυψε ότι περισσότερες πτήσεις εκτελούν οι τύποι B747, B757 και B767. Τέλος, προκειμένου να ελεγχθεί και η περίπτωση των μεγάλων αεροσκαφών, προστέθηκαν στη μελέτη και τα αεροσκάφη τύπου A380 και B747.

Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται οι βασικές διαστάσεις ενός αεροσκάφους που απαιτούνται για τον σχεδιασμό των διαπλατύνσεων, ενώ στο Σχήμα 2.2 τα βασικά στοιχεία ενός αεροσκάφους που απαιτούνται για τον γεωμετρικό σχεδιασμό ενός δαπέδου αναμονής.

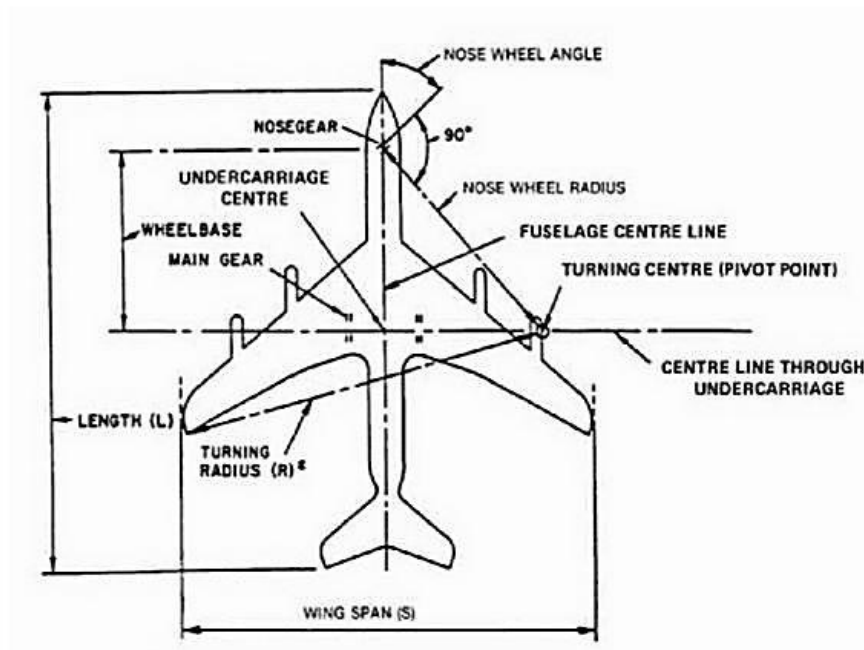
Ακολουθεί ο πίνακας κατάταξης των αεροδρομίων σύμφωνα με τις διατάξεις των ICAO (Πίνακας 2.2) και FAA (Πίνακας 2.3) που συνδέει τα φυσικά χαρακτηριστικά του κρίσιμου αεροσκάφους με τον κωδικό αναφοράς του αεροδρομίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες με τα απαιτούμενα πλάτη διαδρόμων και τροχοδρόμων συναρτήσει του κωδικού αναφοράς του αεροδρομίου, όπως επίσης και τα απαιτούμενα περιθώρια ασφαλείας ανάλογα με την κατάταξη του αεροδρομίου (Πίνακες 2.4 και 2.5).

Τύπος αεροσκάφους	Άνοιγμα φτερών (WS) (m)	Μήκος (L) (m)	Απόσταση ρινιαίου - κυρίων τροχών (w) (m)	Πλάτος βάσης κυρίου συστήματος τροχών (T) (m)	Μέγιστη γωνία στροφής ρινιαίου τροχού (γ) (°)
Airbus 319	35.8	33.84	11.04	8.95	75
Airbus 320	35.8	37.57	12.64	8.95	75
Airbus 321	35.8	44.51	16.91	8.95	75
Airbus 380	79.75	72.73	30.24	14.34	70
Boeing 737	34.32	39.47	15.60	7.00	78
Boeing 757	38.05	47.32	18.29	8.55	65
Boeing 767	47.57	54.94	22.76	10.90	65
Boeing 747	68.40	76.27	29.67	12.72	70

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά κυριότερων τύπων αεροσκαφών



Σχήμα 2.1 Διαστάσεις αεροσκάφους



Σχήμα 2.2 Διαστάσεις αεροσκάφους για τα δάπεδα αναμονής

Κωδικός Αριθμός	Μήκος Αναφοράς Διαδρόμου (RFL) (m)	Κωδικός Γράμμα	Άνοιγμα Φτερών (m)	Απόσταση Εξωτερικών Κύριων Τροχών (m)
1	RFL < 800	A	WS < 15	OMGWS < 4.5
2	800 ≤ RFL < 1200	B	15 ≤ WS < 24	4.5 ≤ OMGWS < 6
3	1200 ≤ RFL < 1800	C	24 ≤ WS < 36	6 ≤ OMGWS < 9
4	1800 ≤ RFL	D	36 ≤ WS < 52	9 ≤ OMGWS < 14
		E	52 ≤ WS < 65	9 ≤ OMGWS < 14
		F	65 ≤ WS < 80	14 ≤ OMGWS < 16

Πίνακας 2.2 Κατάταξη αεροδρομίων κατά ICAO (ICAO 2004)

Κατηγορία αεροσκάφους κατά την προσέγγιση	Ταχύτητα προσέγγισης (AS) (Knots)	Κατηγορία αεροσκάφους σχεδιασμού (ADG)	Άνοιγμα Φτερών (m)
A	AS < 91	I	WS < 15
B	91 ≤ AS < 121	II	15 ≤ WS < 24
C	121 ≤ AS < 141	III	24 ≤ WS < 36
D	141 ≤ AS < 166	IV	36 ≤ WS < 52
E	166 ≤ AS	V	52 ≤ WS < 65
		VI	65 ≤ WS < 80

Πίνακας 2.3 Κατάταξη αεροδρομίων κατά FAA (FAA 2014)

Κωδικός αναφοράς	A	B	C	D	E	F
1	18	18	23	-	-	-
2	23	23	30	-	-	-
3	30	30	30	45	-	-
4	-	-	45	45	45	60

Πίνακας 2.4 Ελάχιστο πλάτος διαδρόμου (m) (ICAO 2004)

Κωδικός αναφοράς	A	B	C	D	E	F
Πλάτος τροχοδρόμου	7.5	10.5	$\frac{15^1}{18^3}$	$\frac{18^2}{23^4}$	23	25
Ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας	1.5	2.25	$\frac{4.5^1}{3^3}$	4.5	4.5	4.5
Απόσταση ελεύθερη εμποδίων από άκρο φτερού	3	3	4.5	7.5	7.5	7.5

Πίνακας 2.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τροχοδρομικού συστήματος (m) (ICAO 2004)

Από τα δεδομένα των προηγούμενων πινάκων προκύπτουν οι τελικές αποστάσεις ασφαλείας για τους τύπους αεροσκαφών που μελετώνται στην εργασία (Πίνακας 2.6):

Τύπος αεροσκάφους	Κωδικός αναφοράς	Ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας (m)	Απόσταση ελεύθερη εμποδίων από άκρο φτερού (m)
Airbus 319	C	3	4.5
Airbus 320	C	3	4.5
Airbus 321	C	3	4.5
Airbus 380	F	4.5	7.5
Boeing 737-800	C	3	4.5
Boeing 757-200	C	4.5	4.5
Boeing 767-300	D	4.5	7.5
Boeing 747-800	F	4.5	7.5

Πίνακας 2.6 Αποστάσεις ασφαλείας ανάλογα με τον τύπο αεροσκάφους

¹ Για αεροσκάφη με απόσταση τροχών μικρότερη των 18m.

² Για αεροσκάφη με μήκος βάσης κυρίου συστήματος τροχών μικρότερο των 9m.

³ Για αεροσκάφη με απόσταση τροχών μεγαλύτερη ή ίση των 18m.

⁴ Για αεροσκάφη με μήκος βάσης κυρίου συστήματος τροχών μεγαλύτερο ή ίσο των 9m.

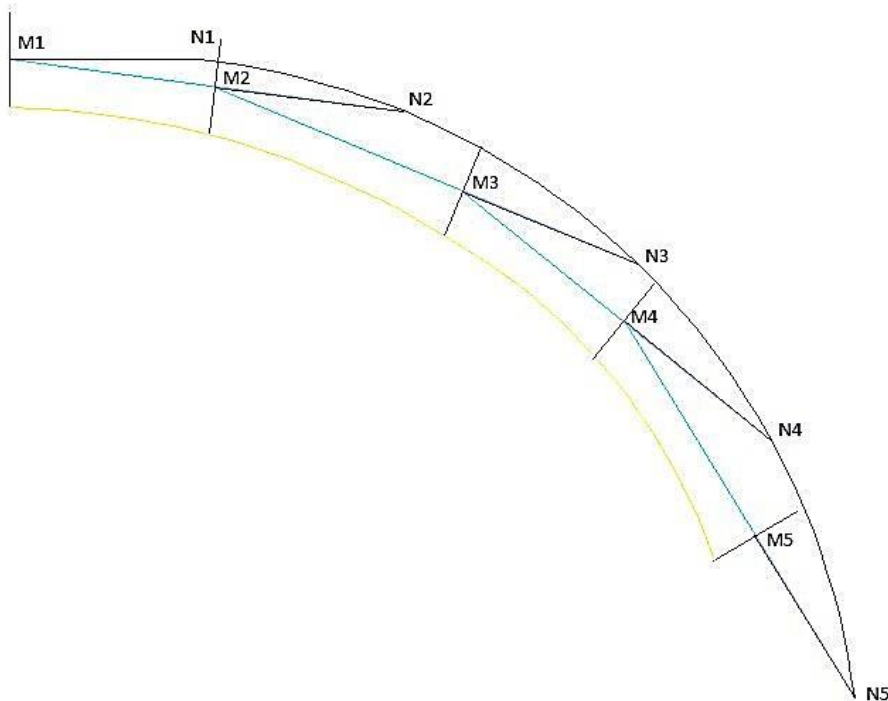
2.4 Κίνηση αεροσκάφους

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η κίνηση του αεροσκάφους στην εναέρια υποδομή ενός αεροδρομίου. Παρουσιάζεται δηλαδή η τροχιά που διαγράφει το αεροσκάφος κατά την κίνησή του από τον διάδρομο προσγείωσης-απογείωσης προς τον χώρο στάθμευσης μέσω του τροχοδρομικού συστήματος, και αντίστροφα. Η διαδρομή αυτή πρέπει να είναι όσο το δυνατόν συντομότερη ώστε να μην καταλαμβάνονται για μεγάλο χρονικό διάστημα ο διάδρομος και οι τροχόδρομοι, και ομαλή ώστε να αποφεύγονται οι συνεχείς επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις του αεροσκάφους.

Ένας τρόπος προσδιορισμού του ίχνους των τροχών ενός αεροσκάφους σε καμπύλη είναι η γραφική μέθοδος ακολουθώντας τα εξής βήματα. Αρχικά σχεδιάζεται η διαδρομή που ακολουθεί ο ριναίος τροχός του αεροσκάφους. Στη συνέχεια τοποθετείται το ίχνος του ριναίου τροχού σε διαδοχικές θέσεις πάνω στην καμπύλη (συμβολίζεται με το γράμμα N και οι διαδοχικές θέσεις με Ni). Για κάθε διαδοχική θέση του ριναίου τροχού ενώνουμε το σημείο Ni με το μέσο της βάσης του κύριου συστήματος τροχών (συμβολίζεται με το γράμμα M) της προηγούμενης θέσης και με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η νέα διεύθυνση του αεροσκάφους. Συνεχίζοντας ομοίως για όλες τις διαδοχικές θέσεις προκύπτει η τροχιά του ριναίου τροχού καθώς και της βάσης του κύριου συστήματος τροχών (Σχήμα 2.3). Συμπεραίνεται επομένως ότι γνωρίζοντας τις διαστάσεις ενός αεροσκάφους επιτυγχάνεται με αυτή τη μέθοδο η χάραξη τόσο της τροχιάς των τροχών, όσο και των άκρων των φτερών του αεροσκάφους.

Με βάση την τροχιά του ριναίου τροχού, της βάσης του κύριου συστήματος τροχών και των άκρων των φτερών του αεροσκάφους σχεδιάζονται οι απαιτούμενες διαπλατύνσεις στις στροφές των τροχοδρόμων, καθώς και οι επιφάνειες που πρέπει να είναι ελεύθερες εμποδίων κατά την κίνηση του αεροσκάφους. Για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης διαπλάτυνσης χρησιμοποιείται είτε η απλή γραφική μέθοδος είτε η μέθοδος τόξου και εφαπτομένης. Σε επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι διαφορετικές μεθοδολογίες που σχετίζονται με την κίνηση του αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα και τον σχεδιασμό των διαπλατύνσεων.

Ακόμα η τροχιά του αεροσκάφους μπορεί να καθοριστεί με χρήση μαθηματικής θεωρίας ή διαγραμμάτων που προκύπτουν από μαθηματικούς υπολογισμούς. Οι μέθοδοι αυτοί αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο που περιέχει το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 2.3 Προσδιορισμός ίχνους τροχών με τη γραφική μέθοδο

2.5 Σχεδιασμός διαπλάτυνσεων

Η μελέτη της απαιτούμενης διαπλάτυνσης έχει στόχο τον σωστό γεωμετρικό σχεδιασμό του τροχοδρομικού συστήματος ενός αεροδρομίου, ώστε τα αεροσκάφη που το χρησιμοποιούν να κινούνται με ασφάλεια στα επιμέρους τμήματά του. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκαν οι σχετικές μεθοδολογίες των δύο μεγαλύτερων φορέων πολιτικής αεροπορίας (ICAO και FAA), τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίθηκαν, ώστε να προταθεί η πιο συμφέρουσα λύση.

Πιο συγκεκριμένα ο ICAO προτείνει τις εξής τρεις μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης διαπλάτυνσης σε καμπύλη:

- Γραφική μέθοδος
- Μέθοδος τόξου και εφαπτομένης
- Ταχεία μέθοδος γραφημάτων

Τέλος, η FAA προτείνει τη δική της μέθοδο σχεδιασμού διαπλάτυνσεων που έχει κοινά στοιχεία με την μέθοδο τόξου και εφαπτομένης. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι μέθοδοι σχεδιασμού, καθώς και τα αποτελέσματα από τη σύγκρισή τους.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 Γενικά

Για την διευκόλυνση της κίνησης των αεροσκαφών στις καμπύλες καθώς και τους κόμβους και τις συνδέσεις των τροχοδρόμων με τους διαδρόμους και τα δάπεδα στάθμευσης προβλέπεται ο σχεδιασμός διαπλάτυνσεων στις περιοχές αυτές.

Το παράρτημα 14 του ICAO (ICAO,2004) προτείνει τα ελάχιστα περιθώρια ασφαλείας μεταξύ του εξώτατου τροχού του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους και της οριογραμμής του τροχοδρόμου, με την προϋπόθεση ότι ο θάλαμος διακυβέρνησης του αεροσκάφους παραμένει πάνω από τον άξονα του τροχοδρόμου. Οι εν λόγω αποστάσεις συναρτήσκει της κατηγορίας τροχοδρόμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5.

Για την ικανοποίηση των παραπάνω προδιαγραφών όταν ένα αεροσκάφος πραγματοποιεί μία στροφή, κρίνεται συχνά απαραίτητο να παρέχεται διαπλάτυνση (fillet) του καταστρώματος στις καμπύλες των τροχοδρόμων, καθώς και στους κόμβους και συνδέσεις αυτών με τους διαδρόμους ή τα δάπεδα στάθμευσης αεροσκαφών.

Μέθοδοι ελιγμών αεροσκάφους στους κόμβους του τροχοδρομικού συστήματος

Οι προδιαγραφές του Annex 14 τόσο για τον σχεδιασμό τροχοδρόμων όσο και οι απαιτήσεις ορατότητας, θέτουν ως προϋπόθεση ότι ο θάλαμος διακυβέρνησης του αεροσκάφους παραμένει πάνω από τον άξονα του τροχοδρόμου. Μία άλλη μέθοδος για την κίνηση του αεροσκάφους στους κόμβους του τροχοδρομικού συστήματος βασίζεται στην παράλληλη μετακίνηση της κατευθυντήριας γραμμής τους ρινιαίου τροχού σε σχέση με τον άξονα του τροχοδρόμου. Στη συνέχεια αναφέρονται οι τρόποι με τους οποίους διασφαλίζονται τα ελάχιστα απαιτούμενα περιθώρια ασφαλείας του Πίνακα 2.5:

- i. Θεωρώντας τον άξονα του τροχοδρόμου ως οδηγό γραμμή του αεροσκάφους παρέχοντας την απαιτούμενη διαπλάτυνση,
- ii. Θεωρώντας μια παράλληλη προς τον άξονα τροχιά ως οδηγό γραμμή του αεροσκάφους, η οποία βρίσκεται προς τα κυρτά της καμπύλης,
- iii. Συνδυασμός των δύο προηγούμενων μεθόδων.

Οι μέθοδοι (ii) και (iii) παρόλο που εμφανίζονται ως οι οικονομικότερες λύσεις, δεν αποφέρουν τόσο σημαντικά πλεονεκτήματα. Η επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος προϋποθέτει την ύπαρξη διαφορετικών οδηγών γραμμών για κάθε τύπο αεροσκάφους και για κάθε κατεύθυνση κίνησης σε έναν τροχόδρομο διπλής κατεύθυνσης. Τέτοιου είδους πολυπλοκότητα γραμμών δημιουργεί πρακτικά προβλήματα, κυρίως όταν ο τροχόδρομος χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της νύχτας ή γενικά σε συνθήκες κακής ορατότητας, καθώς επίσης είναι αναγκαία η

ύπαρξη μιας συμβιβαστικής μετατιθέμενης παράλληλης οδηγού γραμμής, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από όλους τους τύπους αεροσκαφών.

Η μέγιστη απόσταση που μπορεί να μετατεθεί η οδηγός γραμμή περιορίζεται από την ανάγκη ικανοποίησης των απαιτούμενων περιθωρίων ασφαλείας του Πίνακα 2.5. Επίσης λαμβάνεται υπόψη η πιθανή ολίσθηση των τροχών του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια της στροφής.

3.2 Τεχνική ορολογία και Συμβολισμοί

Όροι σχετικοί με το αεροσκάφος (Σχήμα 3.1)

Άξονας βάσης κύριου συστήματος τροχών – Center line through main undercarriage: Η νοητή ευθεία που διέρχεται από το κέντρο περιστροφής του αεροσκάφους και είναι κάθετη στον άξονα του.

Μήκος αναφοράς αεροσκάφους – Datum length (d): Απόσταση μεταξύ του σημείου αναφοράς και του άξονα κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους.

Σημείο αναφοράς αεροσκάφους – Datum point (S): Σημείο του διαμήκους άξονα του αεροσκάφους που ακολουθεί την οδηγό γραμμή του εδάφους. Το σημείο αναφοράς τοποθετείται κατακόρυφα κάτω από το πιλοτήριο του αεροσκάφους και ταυτίζεται με τον ρινιαίο τροχό του.

Κέντρο βάσης κυρίου συστήματος τροχών – Main undercarriage center (U): Σημείο τομής του διαμήκους άξονα του αεροσκάφους και του άξονα του κυρίου συστήματος τροχών.

Γωνία στροφής ρινιαίου τροχού – Nose wheel steering angle: Γωνία μεταξύ του διαμήκους άξονα του αεροσκάφους και της διεύθυνσης του ρινιαίου τροχού.

Γωνία στροφής – Steering angle (β): Γωνία μεταξύ της εφαπτομένης στην οδηγό γραμμή και του διαμήκους άξονα του αεροσκάφους.

Ίχνος βάσης κυρίου συστήματος τροχών – Track of the main undercarriage (T): Απόσταση μεταξύ των εξωτερικών τροχών του συστήματος κυρίων τροχών του αεροσκάφους συμπεριλαμβανομένου του πλάτους των τροχών.

Κέντρο στροφής – Turning center (P): Το κέντρο στροφής του αεροσκάφους οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Όροι σχετικοί με τον τροχόδρομο και τον σχεδιασμό διαπλατυνσεων (Σχήμα 3.2)

Απόκλιση κεντρικού συστήματος τροχών – Deviation of main undercarriage (λ): Απόσταση μεταξύ του κέντρου του κυρίου συστήματος τροχών (U) και του άξονα της οδηγού γραμμής.

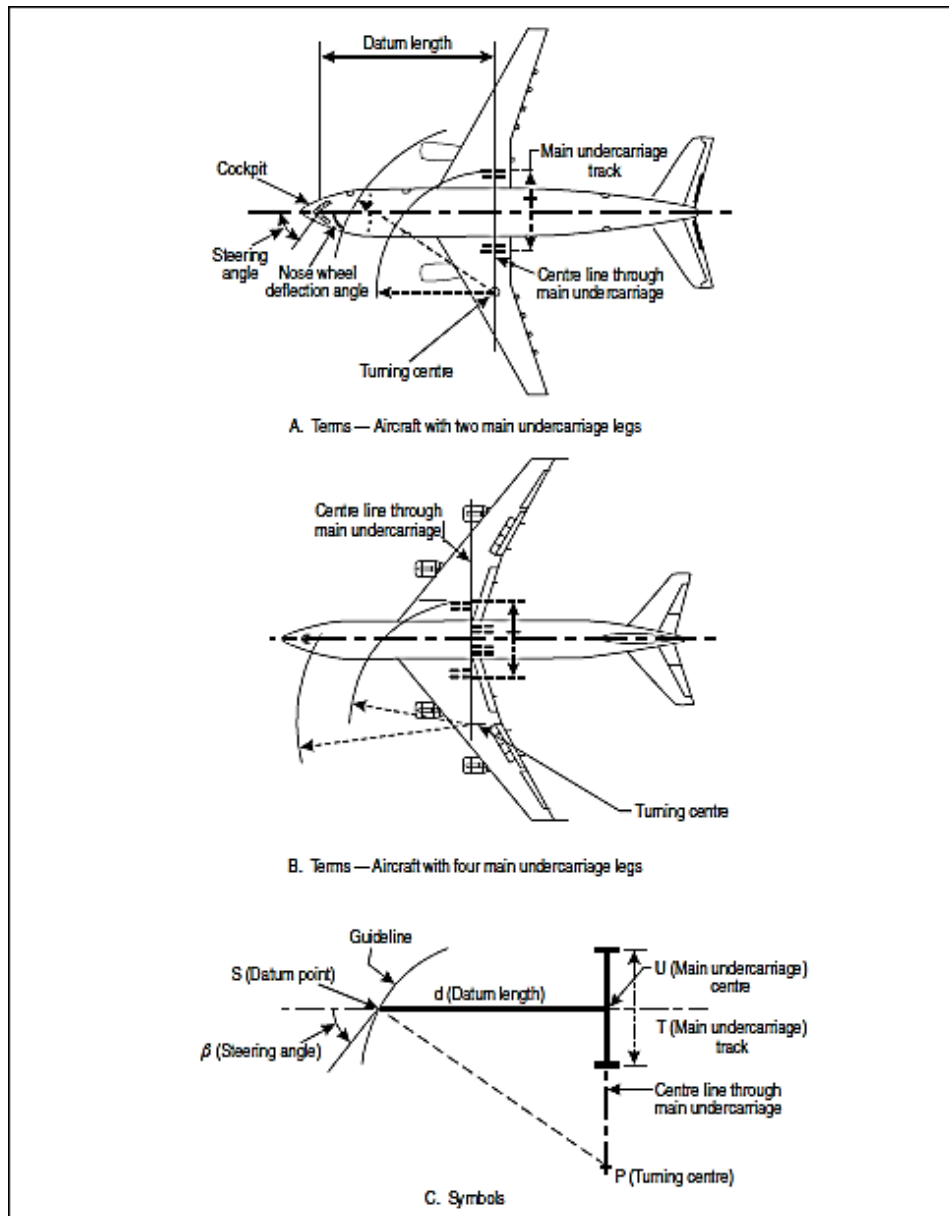
Οδηγός γραμμής – Guideline: Γραμμή που σημειώνεται στο κατάστρωμα είτε με χρώμα είτε με φώτα και την οποία ακολουθεί ο ρινιαίος τροχός του αεροσκάφους κατά την τροχοδρόμηση.

Κέντρο οδηγού γραμμής – Guideline center (O): Το κέντρο της καμπυλότητας της οδηγού γραμμής στο σημείο (S).

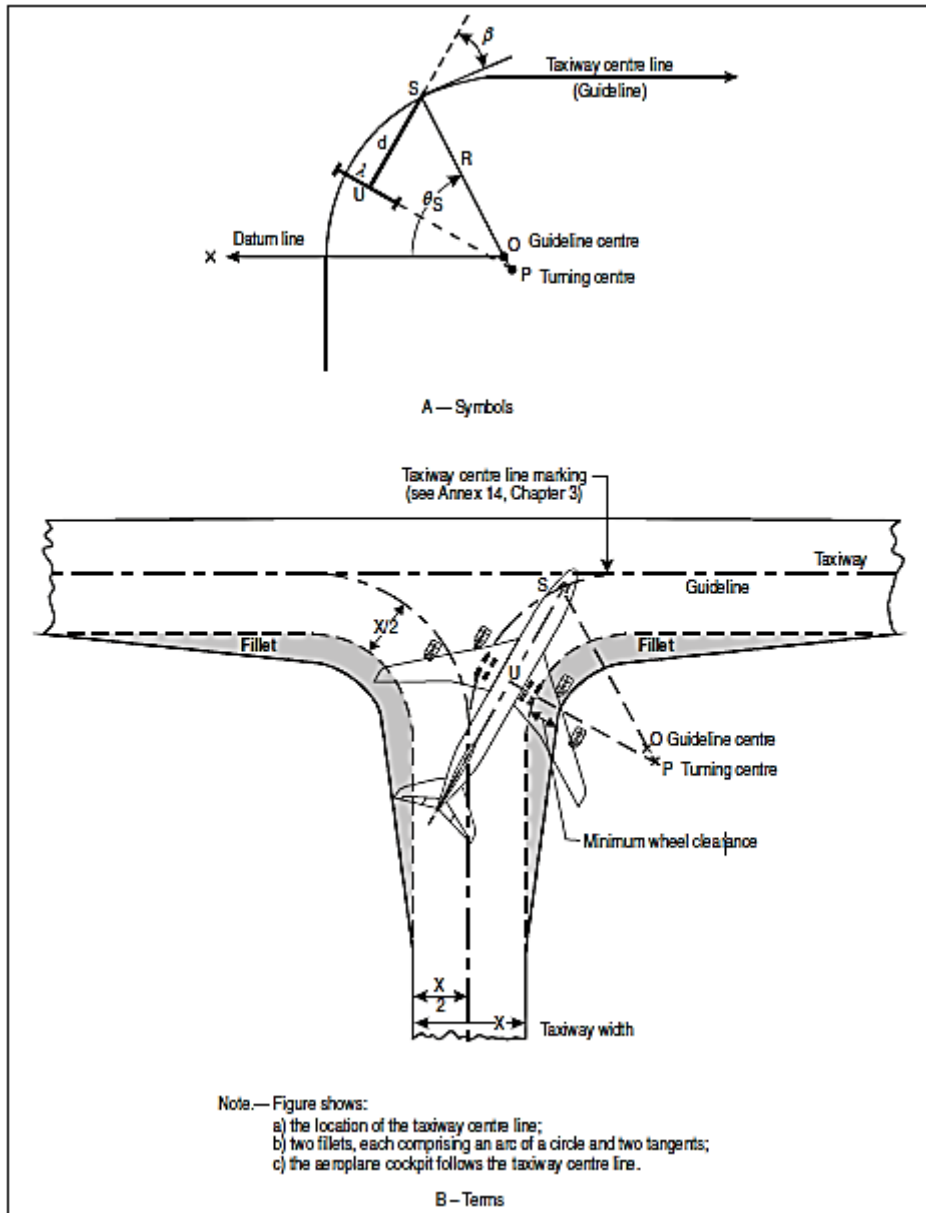
Συμβολισμοί

Οι συμβολισμοί που ακολουθούν χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της τροχιάς της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους, καθώς και του σχεδιασμού της διαπλάτυνσης στις καμπύλες και τις συνδέσεις του τροχοδρομικού συστήματος ενός αεροδρομίου. Στα σχήματα 3.2.1 και 3.2.2 απεικονίζονται όλοι οι όροι και συμβολισμοί που αναφέρονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

d	=	μήκος αναφοράς αεροσκάφους
M	=	ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας μεταξύ εξώτατου τροχού και οριογραμμής τροχοδρόμου
O	=	κέντρο καμπύλης της οδηγού γραμμής στο σημείο S
P	=	κέντρο στροφής
r	=	ακτίνα καμπύλης διαπλάτυνσης
R	=	ακτίνα καμπύλης της οδηγού γραμμής στο σημείο S
S	=	σημείο αναφοράς αεροσκάφους
T	=	ίχνος βάσης κυρίου συστήματος τροχών
U	=	κέντρο βάσης κυρίου συστήματος τροχών
α	=	γωνία μεταξύ της ακτινικής απόστασης OU και της εφαπτομένης στην τροχιά του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών στο σημείο U
β	=	γωνία στροφής αεροσκάφους
λ	=	απόκλιση κυρίου συστήματος τροχών
ρ, θ	=	πολικές συντεταγμένες ενός εκ των σημείων (S),(U)



Σχήμα 3.1 Όροι και Σύμβολα σχετικά με το αεροσκάφος (ICAO 2005)



Σχήμα 3.2 Όροι και Σύμβολα σχετικά με τον σχεδιασμό διαπλάτυνσεων (ICAO 2005)

3.3 Καθορισμός της τροχιάς του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών αεροσκάφους κατά την κίνηση του στο τροχοδρομικό σύστημα

Ο καθορισμός της τροχιάς του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών αεροσκάφους κατά την κίνηση του στο τροχοδρομικό σύστημα μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Συγκεκριμένα:

- Αποκλειστικά με μαθηματικούς υπολογισμούς,
- Με τη βοήθεια διαγραμμάτων, τα οποία προέκυψαν από τους μαθηματικούς υπολογισμούς.

Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν οι προαναφερθέντες τρόποι καθορισμού της τροχιάς και θα δοθούν αντίστοιχα παραδείγματα για την πλήρη κατανόησή τους.

3.3.1 Καθορισμός τροχιάς με χρήση μαθηματικής θεωρίας

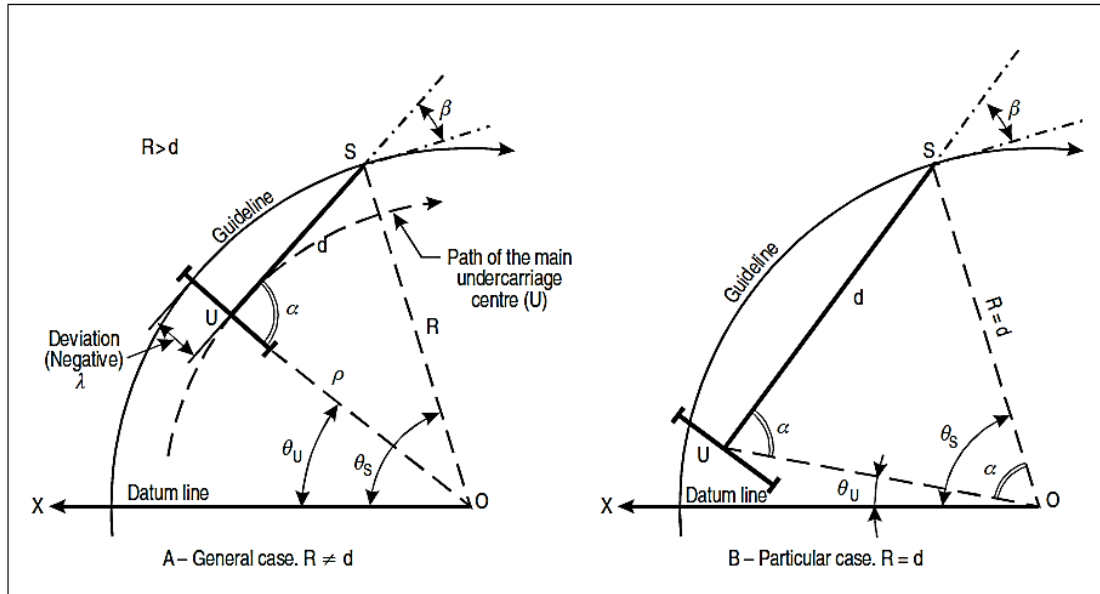
Γενικά, η σχεδίαση κόμβων ή συμβολών μεταξύ τροχοδρόμων, διαδρόμων και δαπέδων στάθμευσης, επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κυκλικών τόξων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Συνεπώς, οι παρακάτω υπολογισμοί περιορίζονται σε επιλύσεις που βασίζονται στην παραπάνω παραδοχή.

Μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις συναρτήσεως της τροχιάς που ακολουθεί ο ρινιαίος τροχός του αεροσκάφους:

i) Το σημείο αναφοράς (S) κινείται σε κυκλικό τόξο

Καθορισμός του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών (U)

Με βάση την παραπάνω παραδοχή, το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί τόξο κύκλου κέντρου O και ακτίνας R κατά την στρέφουσα κίνηση. Προκειμένου να περιγραφεί η κίνηση ενός αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα, είναι απαραίτητο να καθορισθεί ένα σύστημα αναφοράς συντεταγμένων. Έστω OX η ευθεία αναφοράς, ρ και θ_U οι πολικές συντεταγμένες του κέντρου (U) της βάσης του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Μελέτη κίνησης βάσης κυρίου συστήματος τροχών (ICAO 2005)

Κατά τη διάρκεια της κίνησης, ο διαμήκης άξονας του αεροσκάφους που ορίζεται από τα σημεία U και S παραμένει εφαπτόμενος στην τροχιά του σημείου U, στο σημείο U. Από την κατάσταση αυτή προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση που περιγράφει την τροχιά που διαγράφει το σημείο U:

$$\tan \alpha = \frac{\rho(d\theta_U)}{d\rho} \quad (1)$$

Όπου α είναι η γωνία που προκύπτει από την ακτίνα OU και την ευθεία US.

Από το Σχήμα 3.3.1 προκύπτει ότι η απόσταση ρ μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει των μεγεθών d , R και α , ως εξής:

$$\rho = d \times \cos \alpha \pm \sqrt{d^2 \times \cos^2 \alpha - d^2 + R^2} \quad (2)$$

Σημείωση: Το πρόσημο πρέπει να είναι θετικό (+) αν η γωνία α είναι μεγαλύτερη από $\pi/2$ ($\alpha > \pi/2$) και αρνητικό (-) αν η γωνία α είναι μικρότερη από $\pi/2$ ($\alpha < \pi/2$).

Επιλύοντας την εξίσωση (1) ως προς την μεταβλητή $d\theta_U$ προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$d\theta_U = \frac{d \times \tan \alpha \times \sin \alpha}{\sqrt{[R^2 + d^2 \times (\cos^2 \alpha - 1)]}} \times (d\alpha) \quad (3)$$

Ολοκληρώνοντας την σχέση (3), προκύπτει η παρακάτω σχέση μεταξύ μεταβλητών θ_U και α , λαμβάνοντας υπόψη τις αρχικές συνθήκες. Δηλαδή είναι:

$$\theta_U - \theta_0 = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{\tan \alpha \times \sin \alpha}{\sqrt{\left[\left(\frac{R^2}{d}\right) + \cos^2 \alpha - 1\right]}} \times (d\alpha) \quad (4)$$

Στη φάση αυτή μπορούμε να κάνουμε την εξής διερεύνηση. Διακρίνουμε τις περιπτώσεις:

1. Ειδική περίπτωση $R = d$

Η ολοκλήρωση είναι εύκολη στην ειδική περίπτωση $R=d$ (Σχήμα 3.3.1 – Β). Πράγματι, αν η ακτίνα R της καμπύλης της καθοδηγητικής γραμμής, είναι ίση με το μήκος αναφοράς του αεροσκάφους d , τότε το προηγούμενο ολοκλήρωμα γίνεται:

$$\theta_U - \theta_S = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{\tan \alpha \times \sin \alpha}{\cos \alpha} \times (d\alpha) = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \tan^2 \alpha \times (d\alpha) = [\tan \alpha - \alpha]_{\alpha_0}^{\alpha}$$

Υποθέτοντας όμως ότι το αεροσκάφος ξεκινά από την αρχή της τροχιάς, ώστε να ισχύει $\theta_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$ και $\rho_0 = 2d$, προκύπτει ότι:

$$\theta_U = \tan \alpha - \alpha \quad (5)$$

όπου οι τιμές των γωνιών είναι σε ακτίνια. Η πολική γωνία του σημείου αναφοράς (S) είναι τότε:

$$\theta_S = \tan \alpha \quad (6)$$

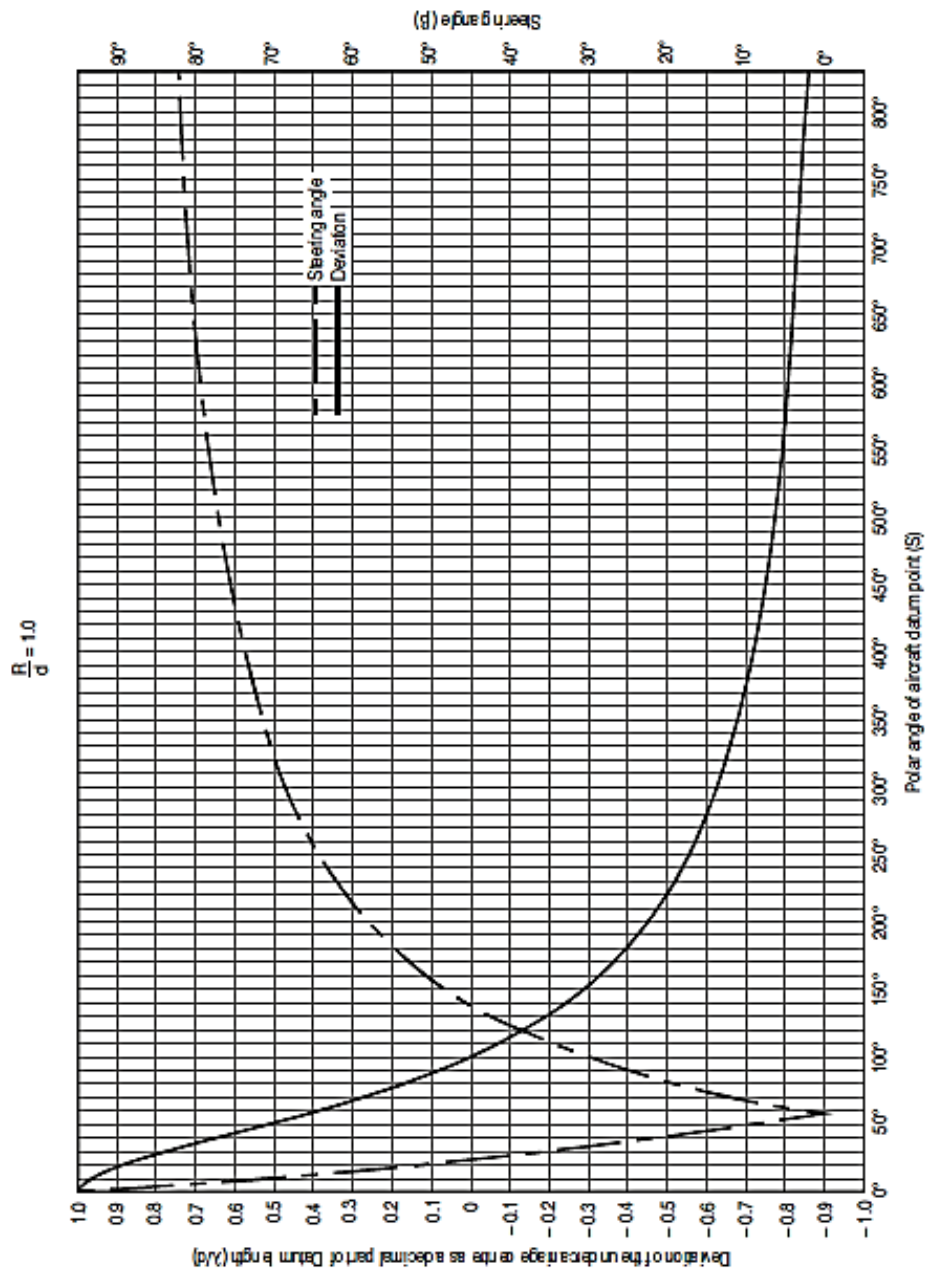
και η αντίστοιχη γωνία οδήγησης β είναι:

$$\beta = 2\alpha - \pi/2 \quad (7)$$

Τέλος, η απόκλιση του κέντρου U της βάσης του κύριου συστήματος τροχών από την τροχιά που ακολουθεί ο ρινιαίος τροχός του αεροσκάφους δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = d(2 \cos \alpha - 1) \quad (8)$$

Οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε αυτή την ειδική περίπτωση ($R=d$) φαίνονται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Γωνία οδήγησης και αποκλίσεις του κυρίου συστήματος τροχών όταν $R=d$ (ICAO 2005)

2. Γενική περίπτωση $R \neq d$

Αν η ακτίνα R δεν είναι ίση με το μήκος d , τότε η σχέση (4) μπορεί να αποτιμηθεί μόνο αν επιλυθεί το ελλειπτικό ολοκλήρωμα. Μια τέτοια επίλυση απαιτεί αξιοσημείωτους υπολογισμούς που δεν δικαιολογούνται για την πρόταση του σχεδιασμού διαπλατύνσεων.

Μία εναλλακτική προσεγγιστική μέθοδος αποφεύγει τους κουραστικούς υπολογισμούς, παρέχοντας ταυτόχρονα τον σχεδιασμό της διαπλάτυνσης με σημαντική ακρίβεια.

Δεδομένης της γωνίας οδήγησης (β) σε κάθε σημείο της τροχιάς του σημείου αναφοράς (S) του αεροσκάφους, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός του κέντρου (U) του συστήματος των κύριων τροχών καθώς επίσης και της τροχιάς που προκύπτει από την κίνηση του αεροσκάφους στην στροφή. Έστω O το κέντρο της καθοδηγητικής γραμμής και R η αντίστοιχη ακτίνα. Υποθέτοντας ότι η γωνία οδήγησης (β) παραμένει σταθερή, προκύπτει ότι το στιγμιαίο κέντρο περιστροφής του αεροσκάφους μία δεδομένη χρονική στιγμή είναι το σημείο P και όχι το σημείο O . Συνεπώς, μετά από σύντομο χρόνο dt , το αεροσκάφος έχει μετακινηθεί σε νέα θέση, άρα το σημείο αναφοράς (S) θα έχει αποκλίνει από την οδηγό γραμμή και θα έχει καλύψει ένα κυκλικό τόξο που αντιστοιχεί σε μικρή τιμή γωνίας και είναι ίση με:

$$\frac{R}{d} \sin \beta \times (d\theta_s) \quad (9)$$

όπου:

- d : το σημείο αναφοράς του αεροσκάφους,
- R, θ_s : οι πολικές συντεταγμένες του σημείου αναφοράς σε σχέση με την ευθεία αναφοράς OX .

Ως πρώτη προσέγγιση δεχόμαστε ότι, όταν το σημείο αναφοράς (S) ακολουθεί την καθοδηγητική γραμμή, η μεταβολή της γωνίας οδήγησης (β) είναι:

$$d\beta = \left(1 - \frac{R}{d} \sin \beta\right) \times (d\theta_s) \quad (10)$$

Από την προηγούμενη προκύπτει η ακόλουθη σχέση μεταξύ θ_s και β , λαμβάνοντας υπόψη και τις αρχικές συνθήκες:

$$\theta_s - \theta_o = \int_{\beta_o}^{\beta} \frac{d}{d - R \sin \beta} \times (d\beta) \quad (11)$$

Ολοκληρώνουμε την προηγούμενη σχέση, θέτοντας $R/d = X$ και $K = \sqrt{X^2 - 1}$ με την παραδοχή ότι η ακτίνα (R) της καθοδηγητικής τροχιάς είναι μεγαλύτερη του μήκους αναφοράς (d) του αεροσκάφους ($R > d$). Λύνοντάς την ως προς $\beta/2$ και λαμβάνοντας ως αρχικές συνθήκες $\theta_o = 0, \beta_o = 0$, προκύπτει ότι:

$$\theta_s = \frac{1}{K} \log \frac{1 + (K - X) \tan \frac{\beta}{2}}{1 - (K + X) \tan \frac{\beta}{2}} \quad (12)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζεται ακόμα ως συνάρτηση των παραμέτρων R και d, ως εξής:

$$\theta_s = \frac{d}{\sqrt{R^2 - d^2}} \times \log \left[\frac{d + [\sqrt{R^2 - d^2} - R] \tan \frac{\beta}{2}}{d - [\sqrt{R^2 - d^2} + R] \tan \frac{\beta}{2}} \right] \quad (13)$$

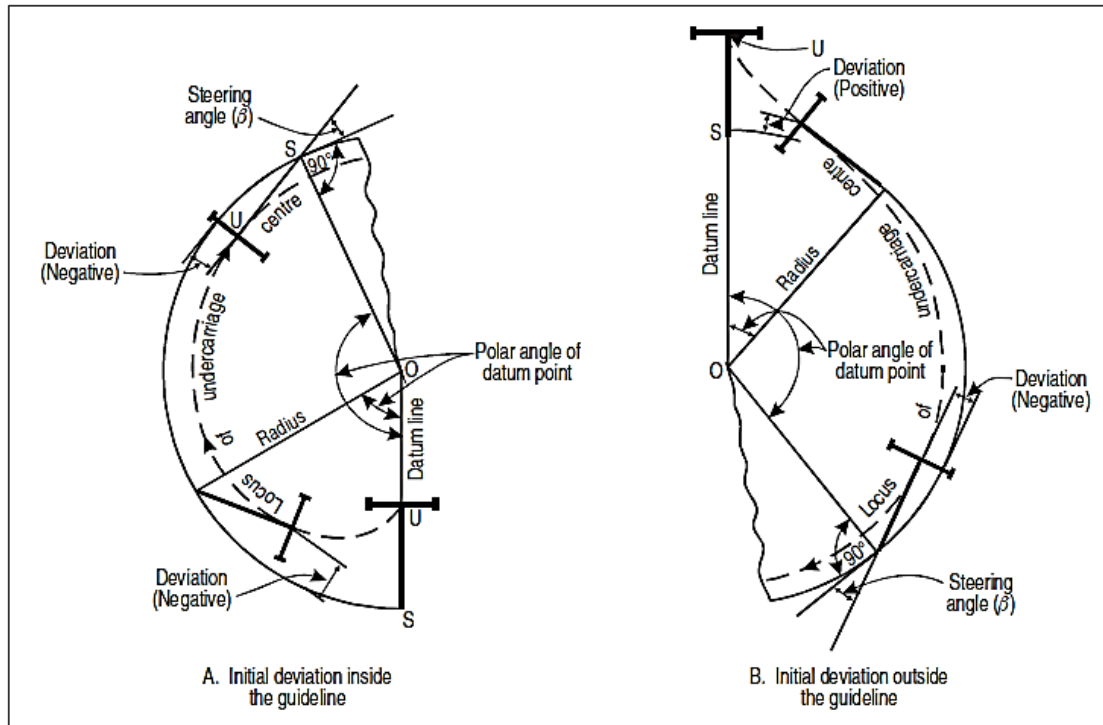
όπου η γωνία θ_s εκφράζεται σε ακτίνια και χρησιμοποιούνται φυσικοί λογάριθμοι. Από τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία οδήγησης β συναρτήσει της γωνίας θ_s .

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{1 - e^{K\theta}}{X - K - X \times e^{K\theta} - K \times e^{K\theta}} \quad (14)$$

με την παραδοχή ότι $R > d$.

Απόκλιση του κέντρου κυρίου συστήματος τροχών (λ)

Στην περίπτωση της κίνησης αεροσκάφους σε δάπεδο στάθμευσης και συναρτήσει της θέσης αυτού ως προς την τροχιά που θα ακολουθεί, η απόκλιση (λ) του κέντρου (U) μπορεί να βρίσκεται εσωτερικά ή εξωτερικά της τροχιάς που ακολουθεί το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους. (Σχήμα 3.5)



Σχήμα 3.5 Απόκλιση (λ) της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους όταν ο ρινιαίος τροχός ακολουθεί τόξο κύκλου (ICAO 2005)

Στην περίπτωση κίνησης του αεροσκάφους σε διάδρομο ή τροχόδρομο, όταν το σημείο αναφοράς του αεροσκάφους (S) εισέρχεται στην στροφή, η αρχική απόκλιση του κέντρου του κύριου συστήματος τροχών (U) του αεροσκάφους βρίσκεται εξωτερικά του κυκλικού τόξου και κατά την διάρκεια της στρέφουσας κίνησης εισέρχεται βαθμιαία προς το εσωτερικό της τροχιάς. Επομένως σε κάθε χρονική στιγμή είναι: (Σχήμα 3.3.1)

$$\Lambda_{USO} = \frac{\pi}{2} \pm \beta \quad \text{και} \quad (R + \lambda)^2 = R^2 + d^2 - 2dR \times \cos \left(\frac{\pi}{2} \pm \beta \right) \quad (15)$$

Από τις επιλύσεις των προηγούμενων εξισώσεων προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές αποκλίσεων:

- εσωτερικά του τόξου:

$$\lambda = \sqrt{R^2 + d^2 - 2dR \sin \beta} - R$$

- εξωτερικά του τόξου:

$$\lambda = \sqrt{R^2 + d^2 + 2dR \sin \beta} - R$$

Στην περίπτωση που η τιμή της απόκλισης εκφράζεται σαν ποσοστό επί τοις εκατό του μήκους αναφοράς του αεροσκάφους, έχουμε την σχέση:

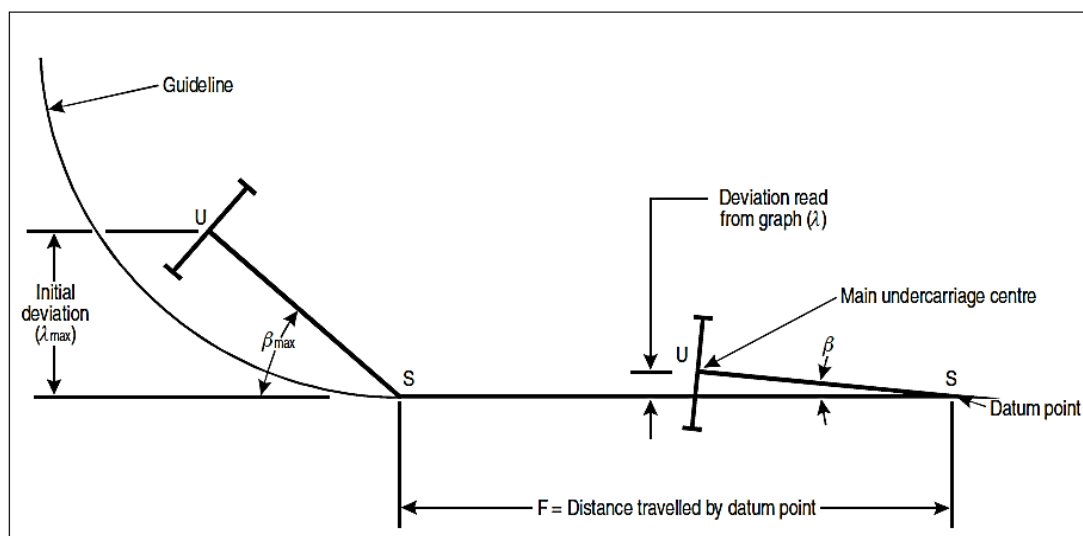
$$\frac{\lambda}{d} = \sqrt{1 + X^2 \pm 2X \sin \beta} - X \quad (16)$$

όπου το θετικό πρόσημο πρέπει να χρησιμοποιείται στην περίπτωση που η απόκλιση βρίσκεται εξωτερικά του τόξου του κύκλου και αρνητικό πρόσημο στην περίπτωση που η απόκλιση είναι στο εσωτερικό του κυκλικού τόξου.

ii) Το σημείο αναφοράς (S) κινείται σε ευθεία γραμμή

Καθορισμός του κέντρου βάσης (U) του κύριου συστήματος τροχών

Όταν το αεροσκάφος έχει ολοκληρώσει το καμπύλο μέρος της τροχιάς, το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους κινείται σε ευθεία γραμμή κατά μήκος του άξονα του τροχοδρόμου. Η γωνία οδήγησης μειώνεται προοδευτικά και το κέντρο της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών περιγράφει μια έλκουσα (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Απόκλιση βάσης κυρίου συστήματος τροχών όταν το αεροσκάφος κινείται σε ευθεία γραμμή (ICAO 2005)

Οπότε προκύπτει ότι:

$$\log \tan \frac{\beta}{2} = \log \tan \frac{\beta \max}{2} - \frac{F}{d} \quad (17)$$

Η προηγούμενη σχέση καθιστά ικανό τον υπολογισμό της γωνίας οδήγησης β όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους διανύει απόσταση F κατά μήκος του ευθύγραμμου άξονα του τροχοδρόμου. Άρα είναι δυνατός και ο προσδιορισμός της θέσης του σημείου (U), που είναι και το ζητούμενο.

Απόκλιση του κέντρου κυρίου συστήματος τροχών (λ)

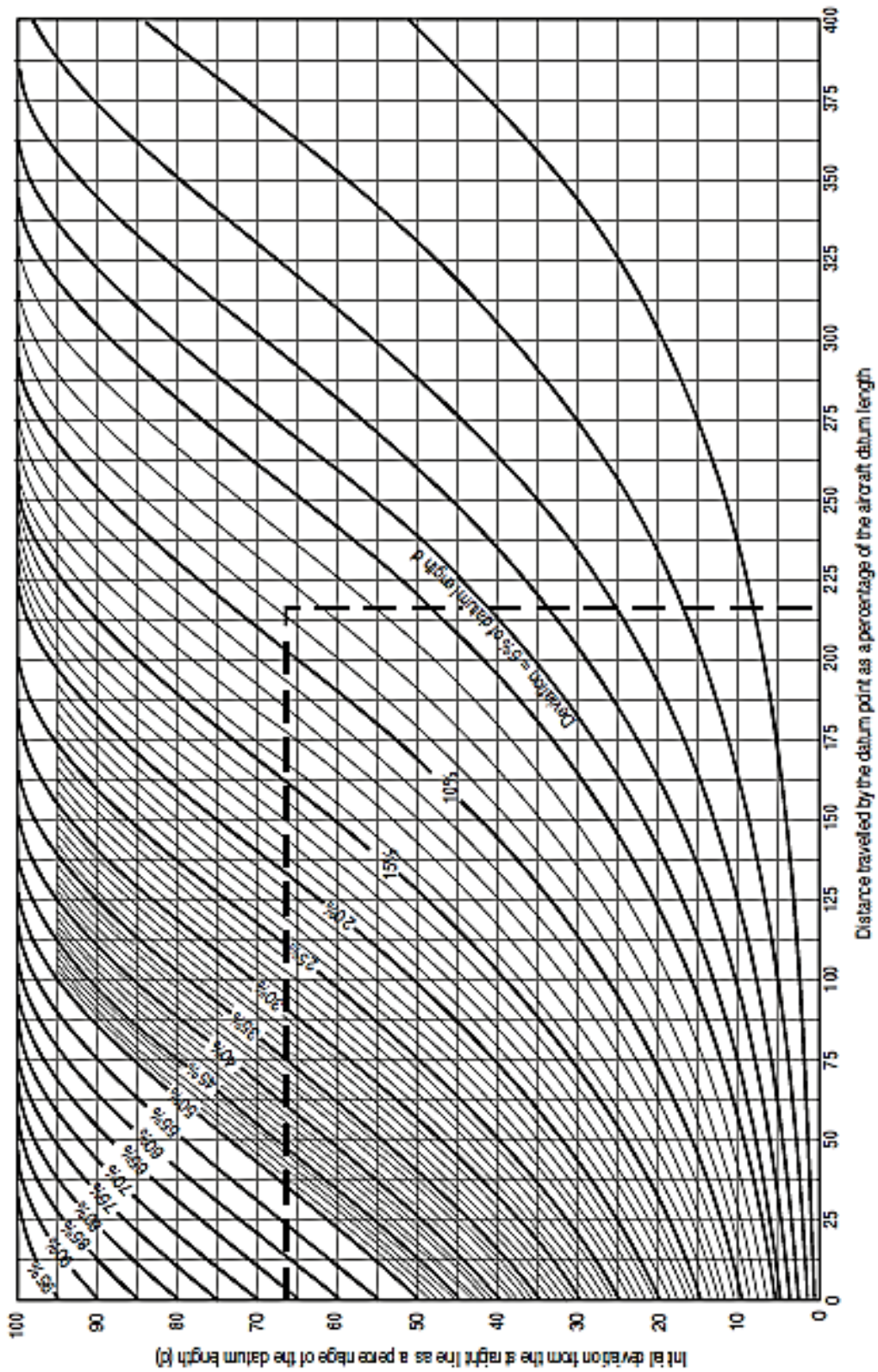
Όταν το σημείο αναφοράς (S) έχει καλύψει απόσταση F κατά μήκος ευθείας γραμμής (Σχήμα 3.3.4), η απόκλιση (λ) του κέντρου της βάσης κυρίου συστήματος τροχών υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{\lambda}{d} = \sin \beta \quad (18)$$

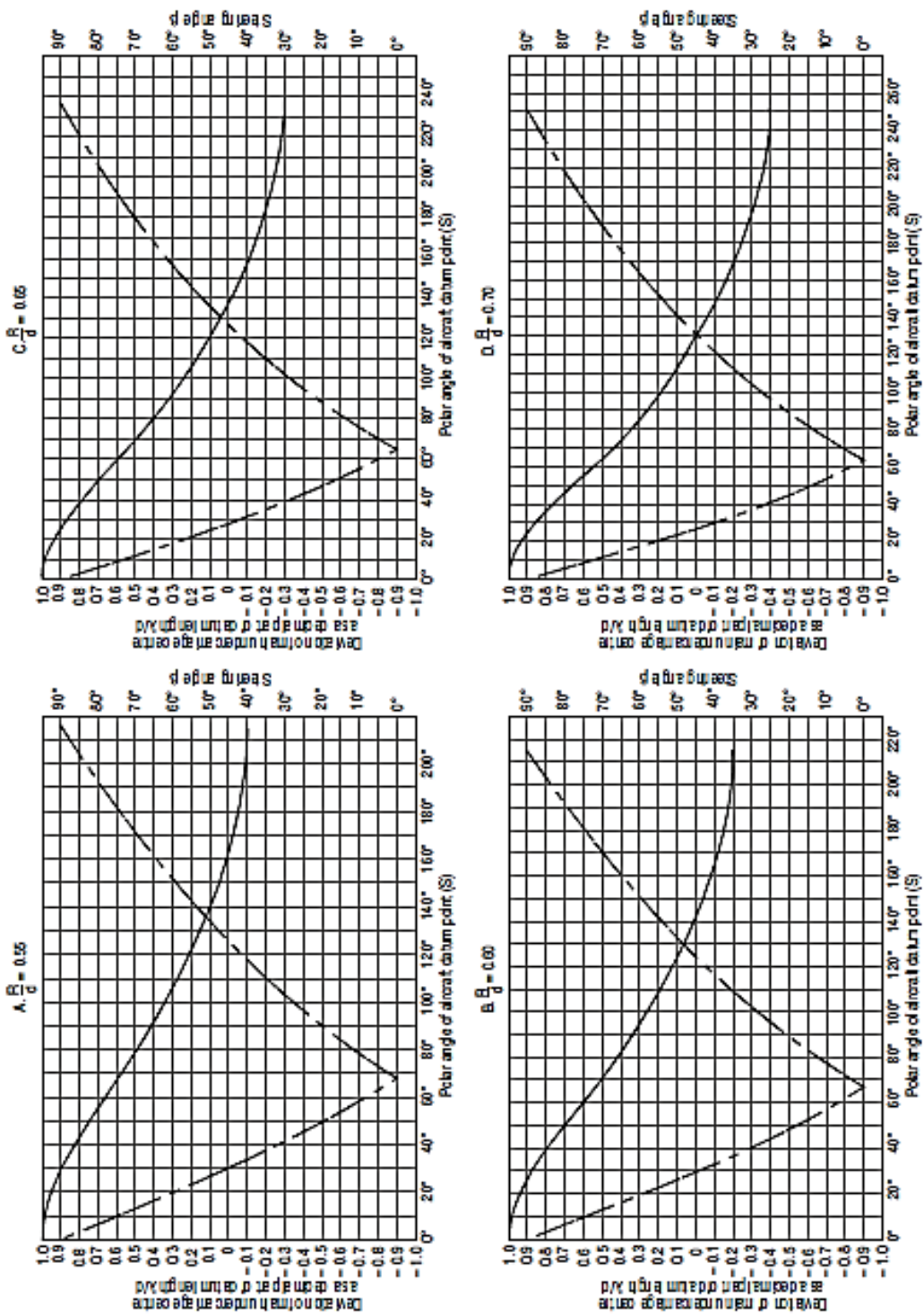
όπου η γωνία οδήγησης (β) υπολογίζεται σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο.

Αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών

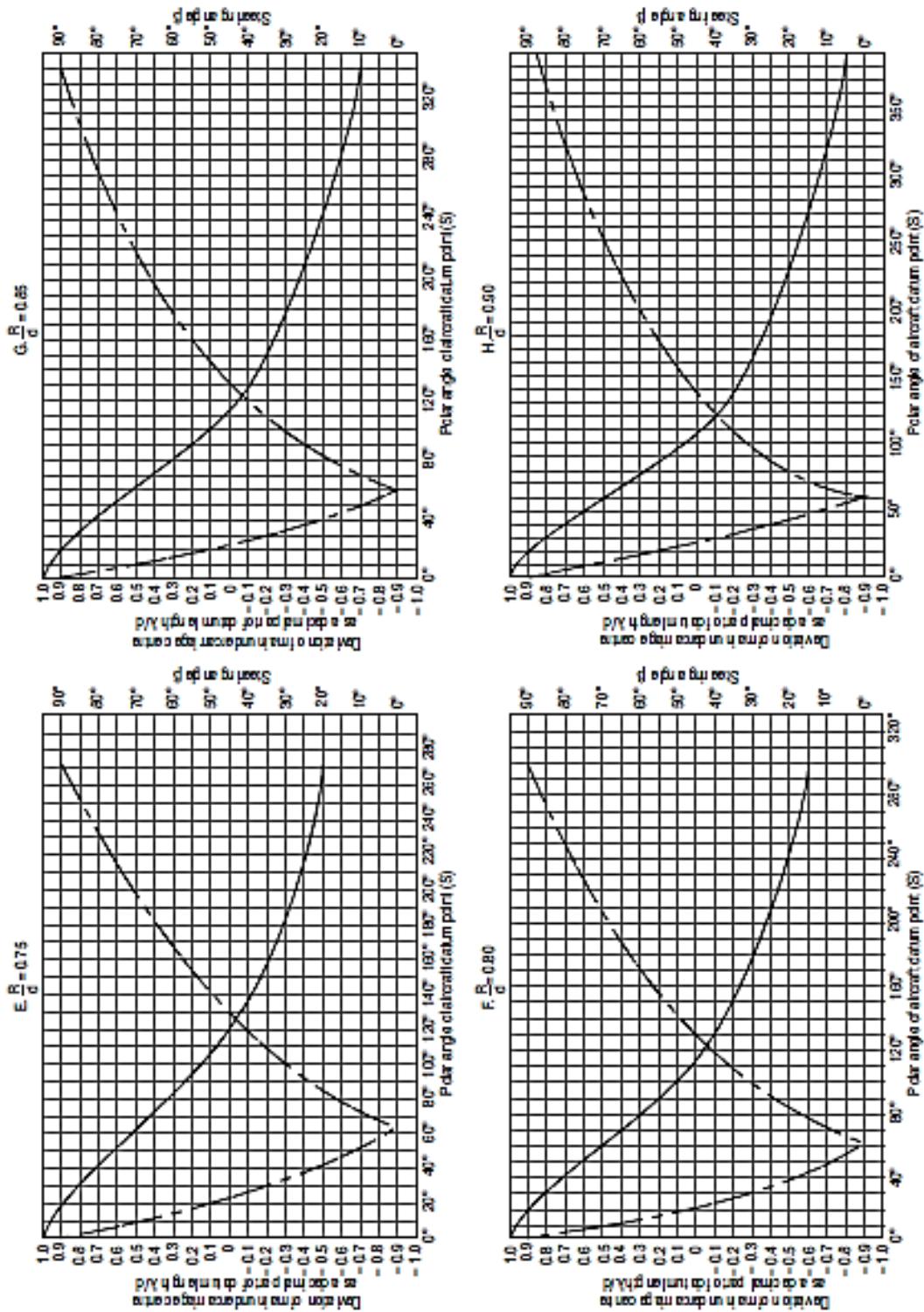
Οι υπολογισμοί που περιγράφηκαν παραπάνω, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του κέντρου βάσης του κύριου συστήματος τροχών (U) ενός αεροσκάφους κατά την κίνησή του σε καμπύλη τροχιά. Επίσης, οι παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία διαγραμμάτων (Σχήματα 3.7-3.13), με την βοήθεια των οποίων επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός των διαπλατύνσεων. Τα διαγράμματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου καλά, για τις περιπτώσεις ελιγμών αεροσκάφους σε ένα δάπεδο αναμονής ή κίνησης αεροσκάφους από στάση.



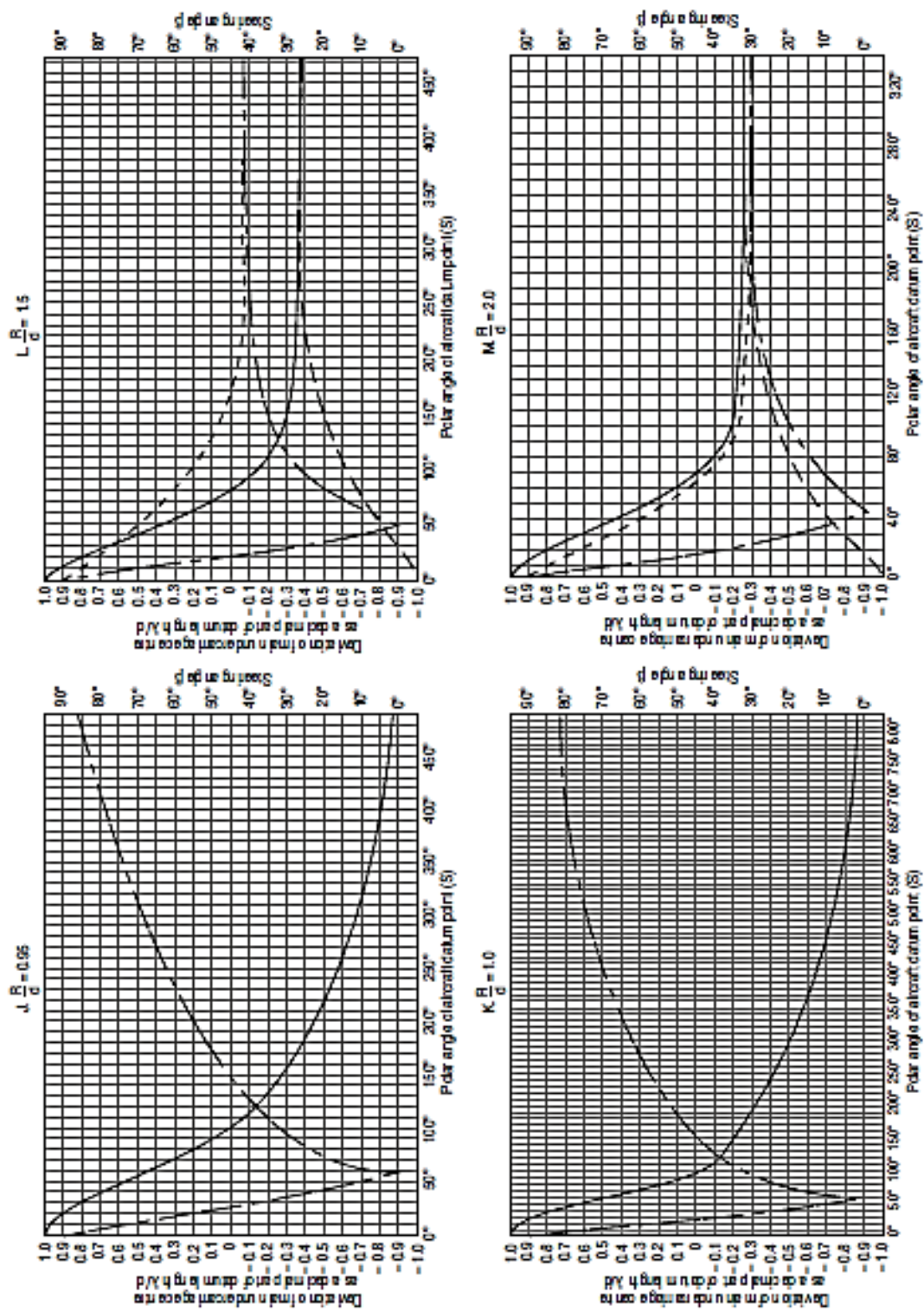
Σχήμα 3.7 Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί ευθύγραμμη τροχιά (ICAO 2005)



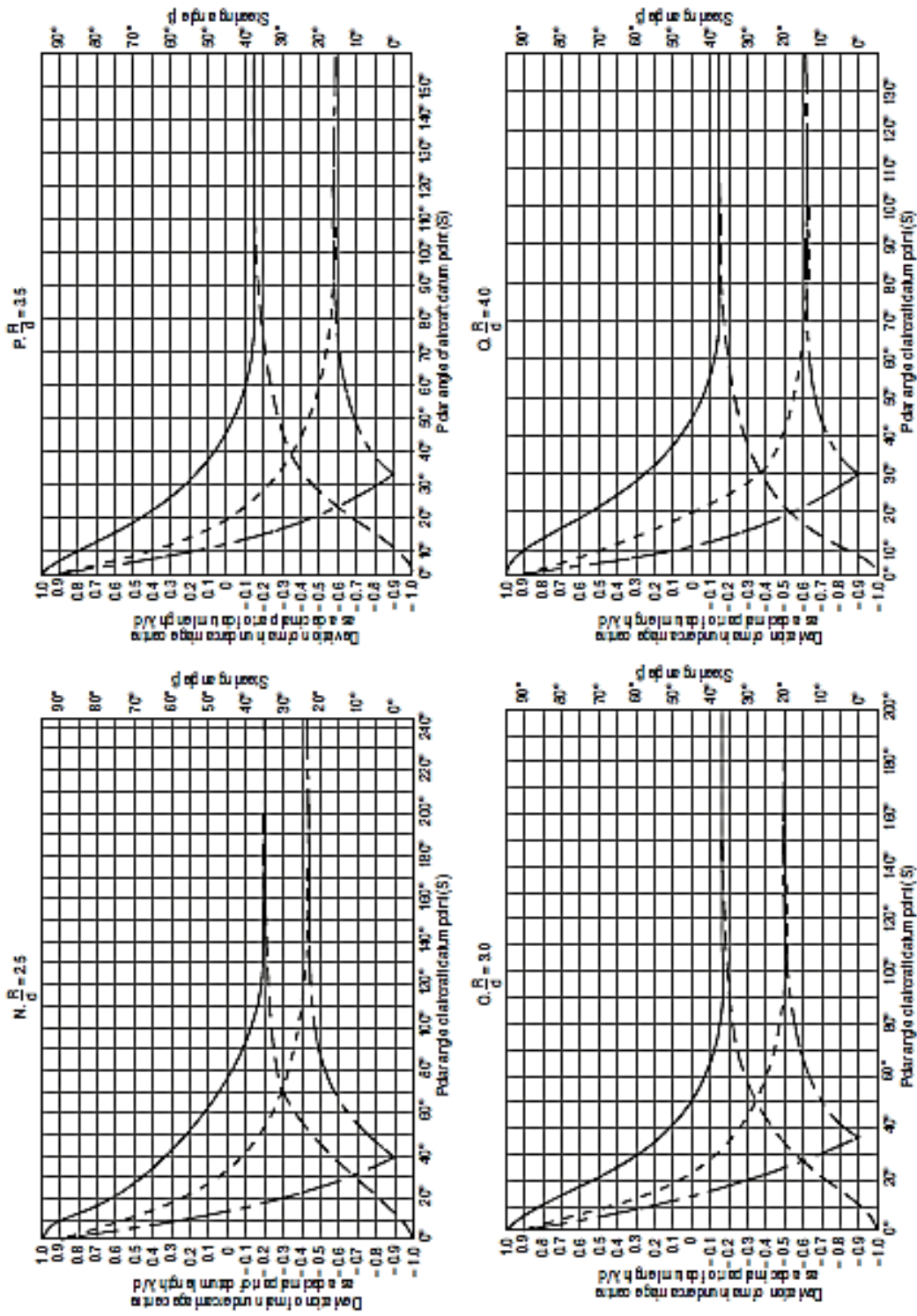
Σχήμα 3.8-Α Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί κυκλική τροχιά (ICAO 2005)



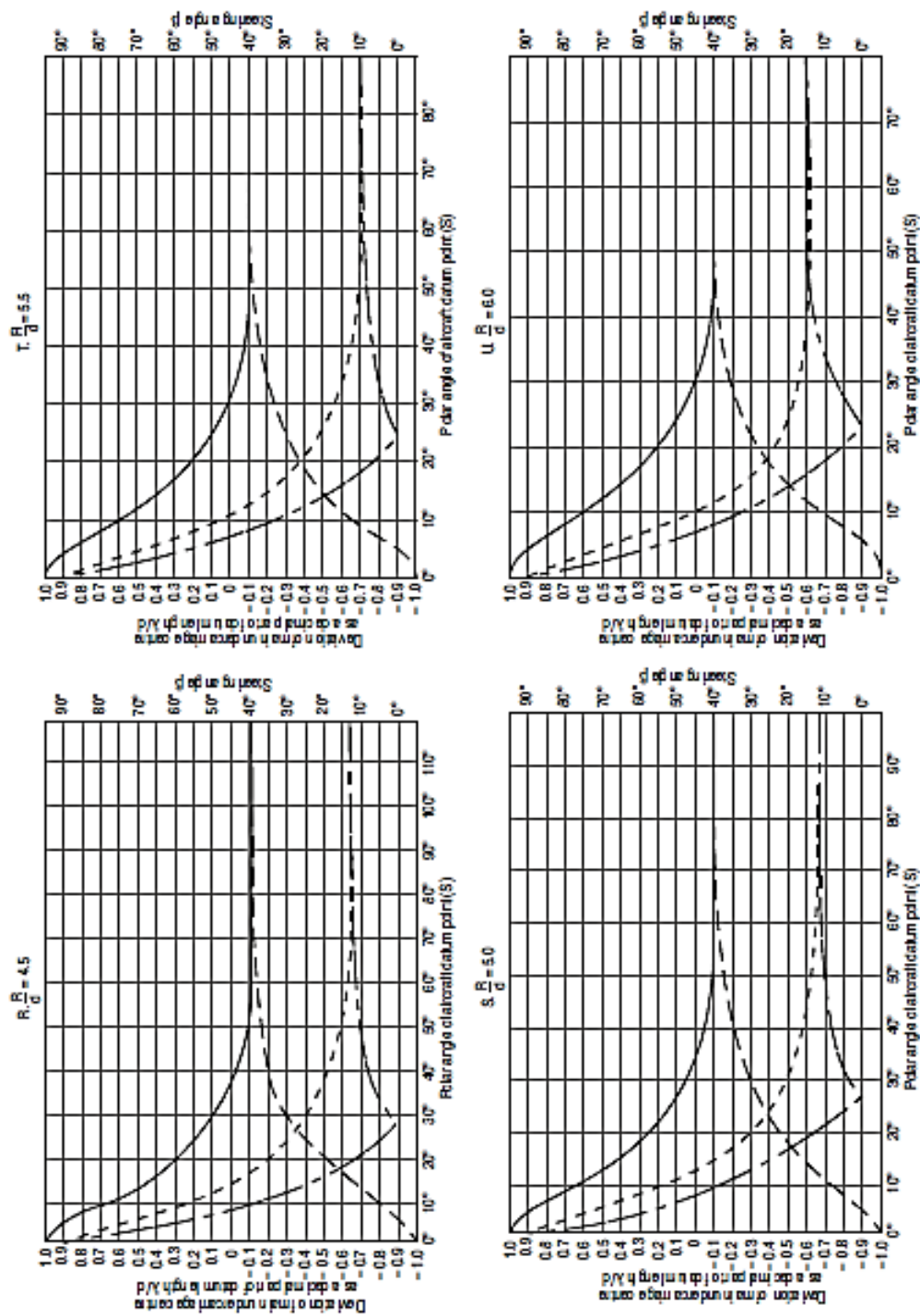
Σχήμα 3.8-Β Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί κυκλική τροχιά (ICAO 2005)



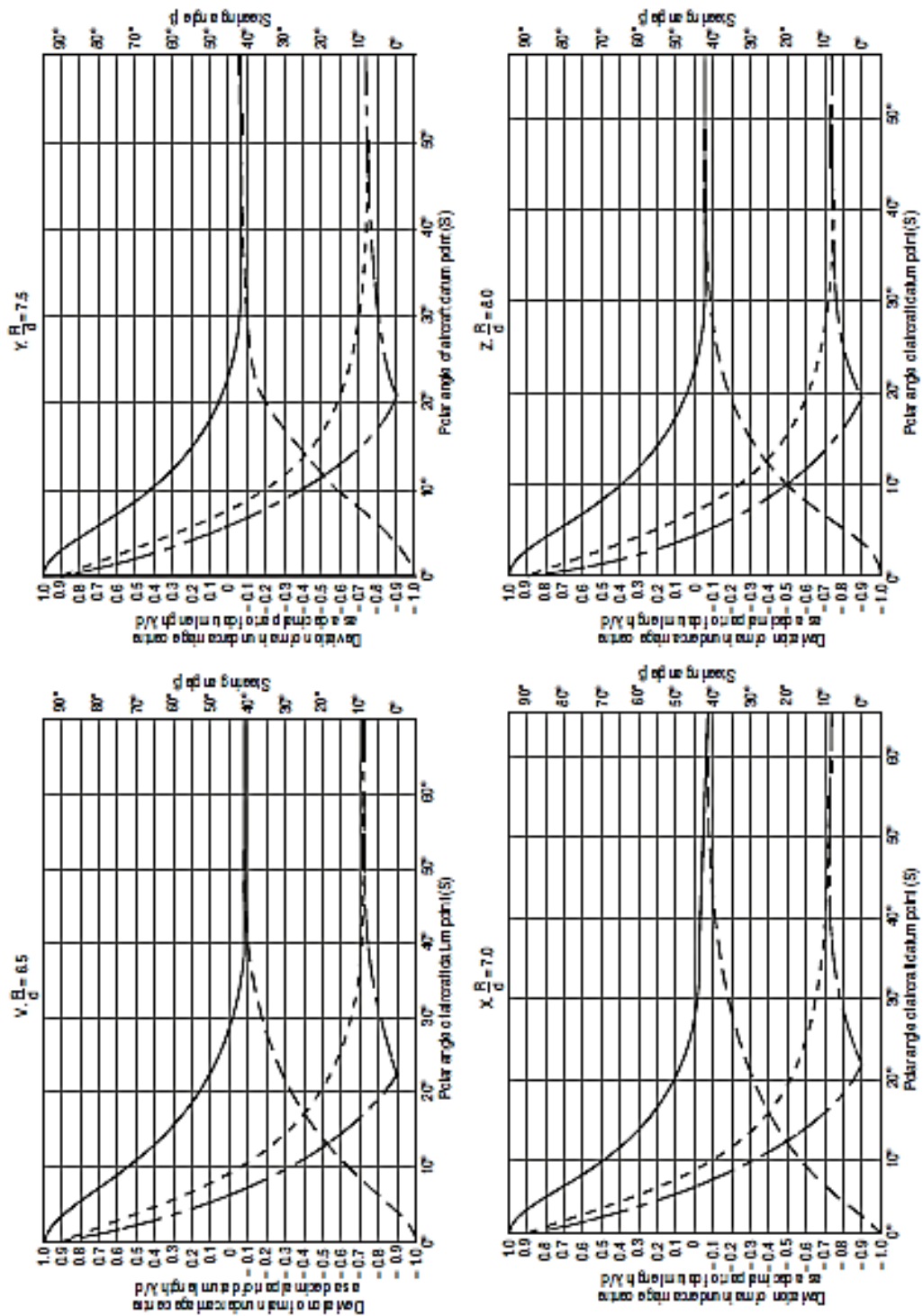
Σχήμα 3.8-Γ Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί κυκλική τροχιά (ICAO 2005)



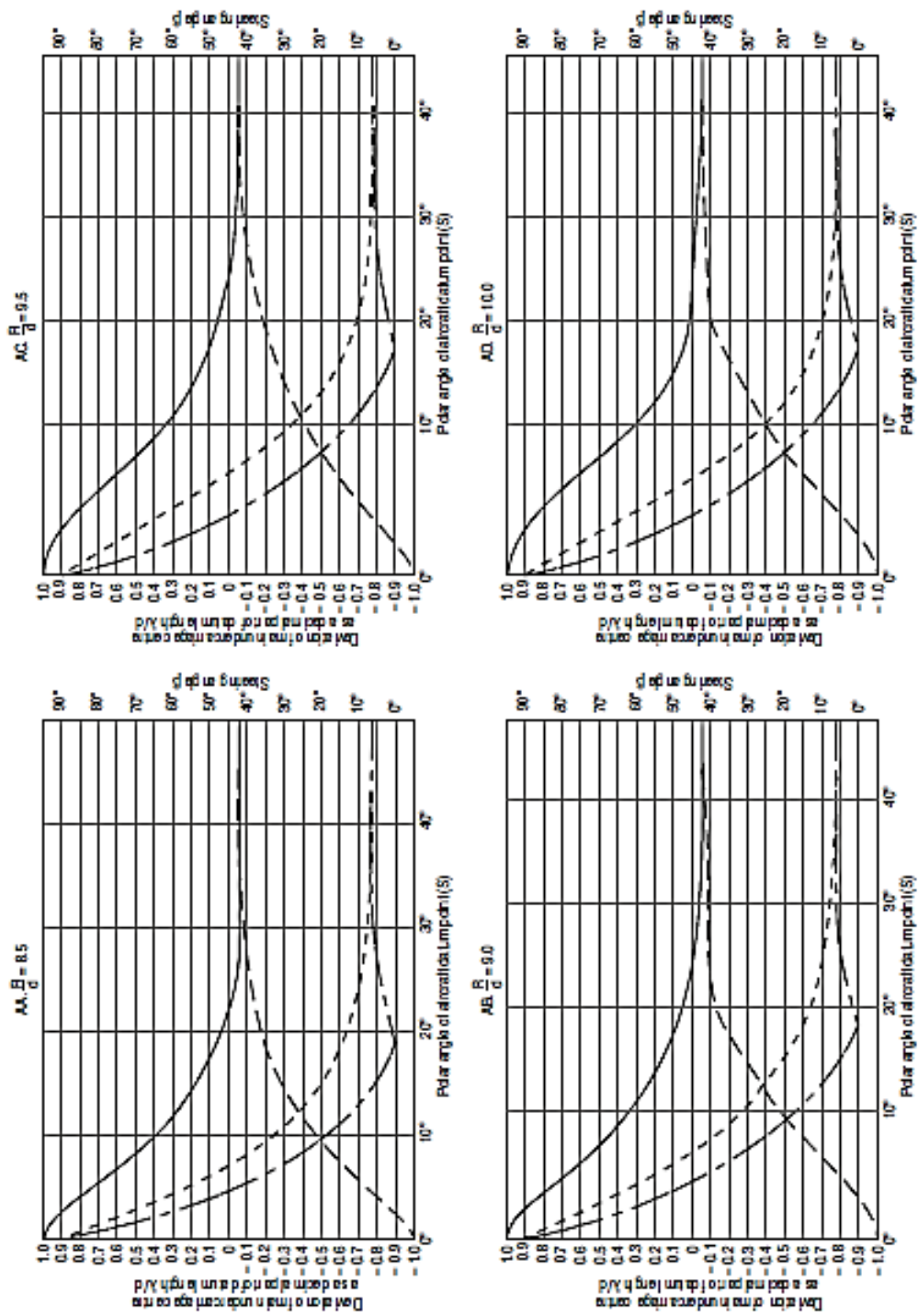
Σχήμα 3.8-Δ Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί κυκλική τροχιά (ICAO 2005)



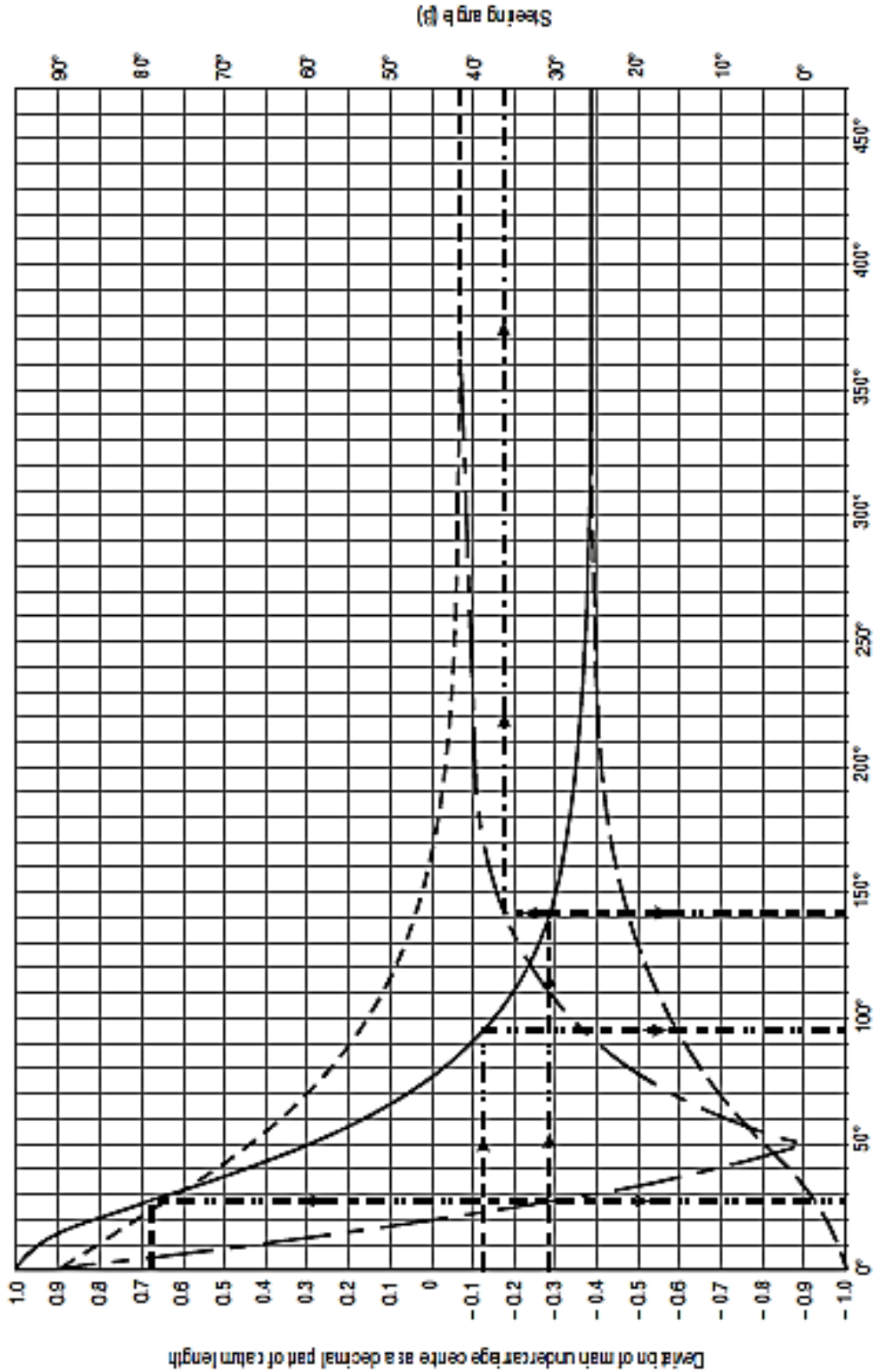
Σχίμα 3.8-Ε Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί κυκλική τροχιά (ICAO 2005)



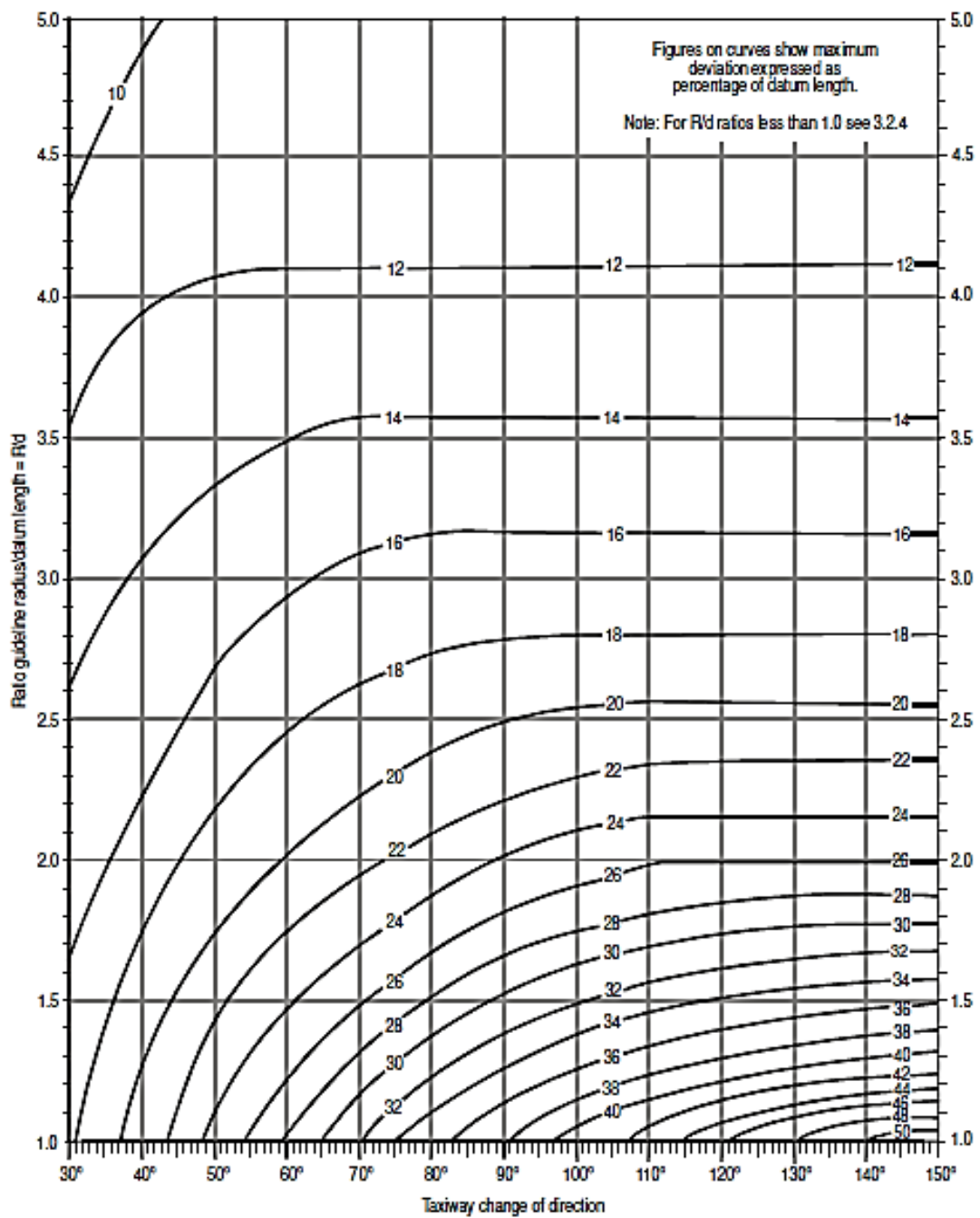
Σχήμα 3.8-ΣΤ Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί κυκλική τροχιά (ICAO 2005)



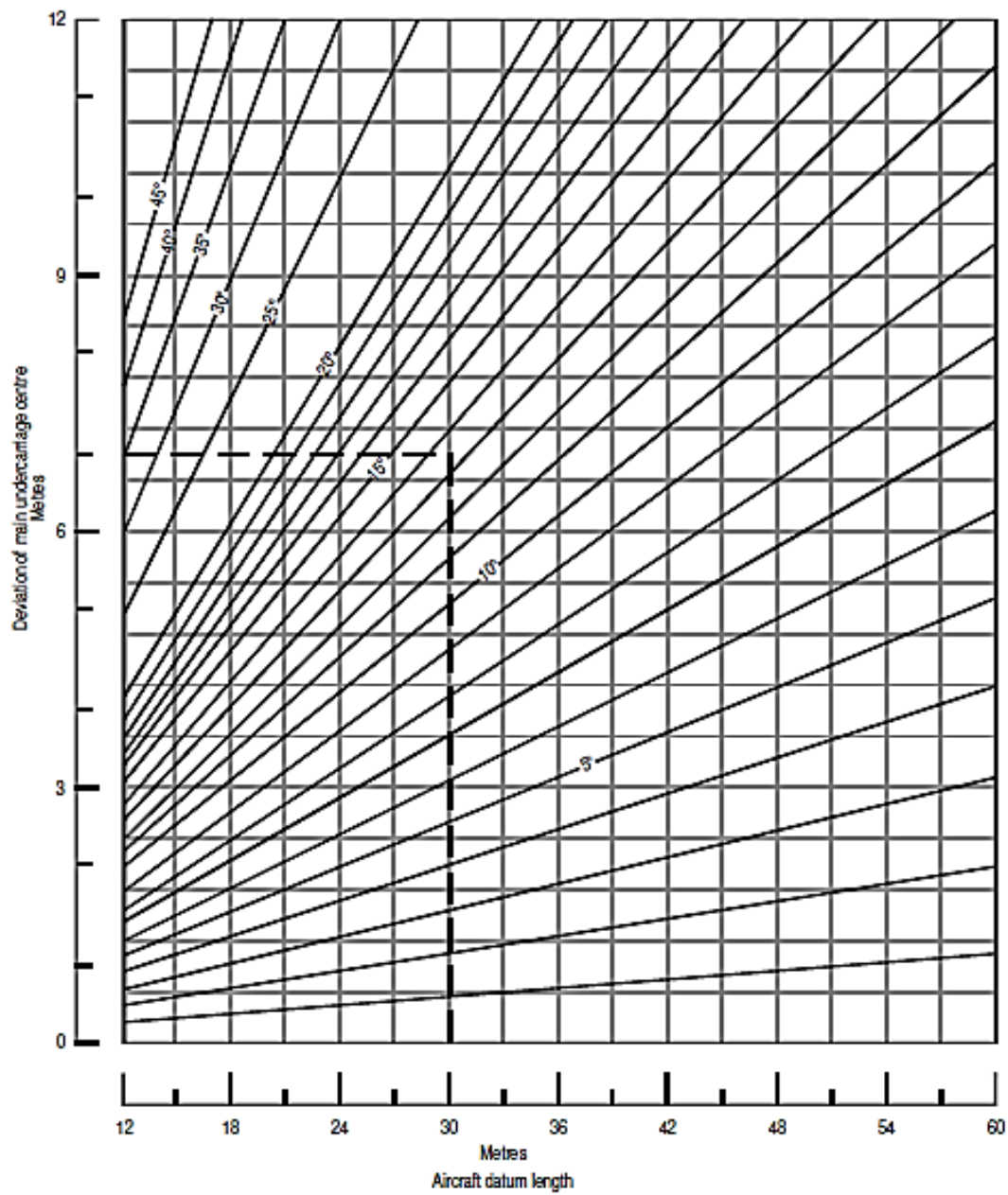
Σχήμα 3.8-Z Γωνία οδήγησης (β) και αποκλίσεις (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όταν το σημείο αναφοράς (S) του αεροσκάφους ακολουθεί κυκλική τροχιά (ICAO 2005)



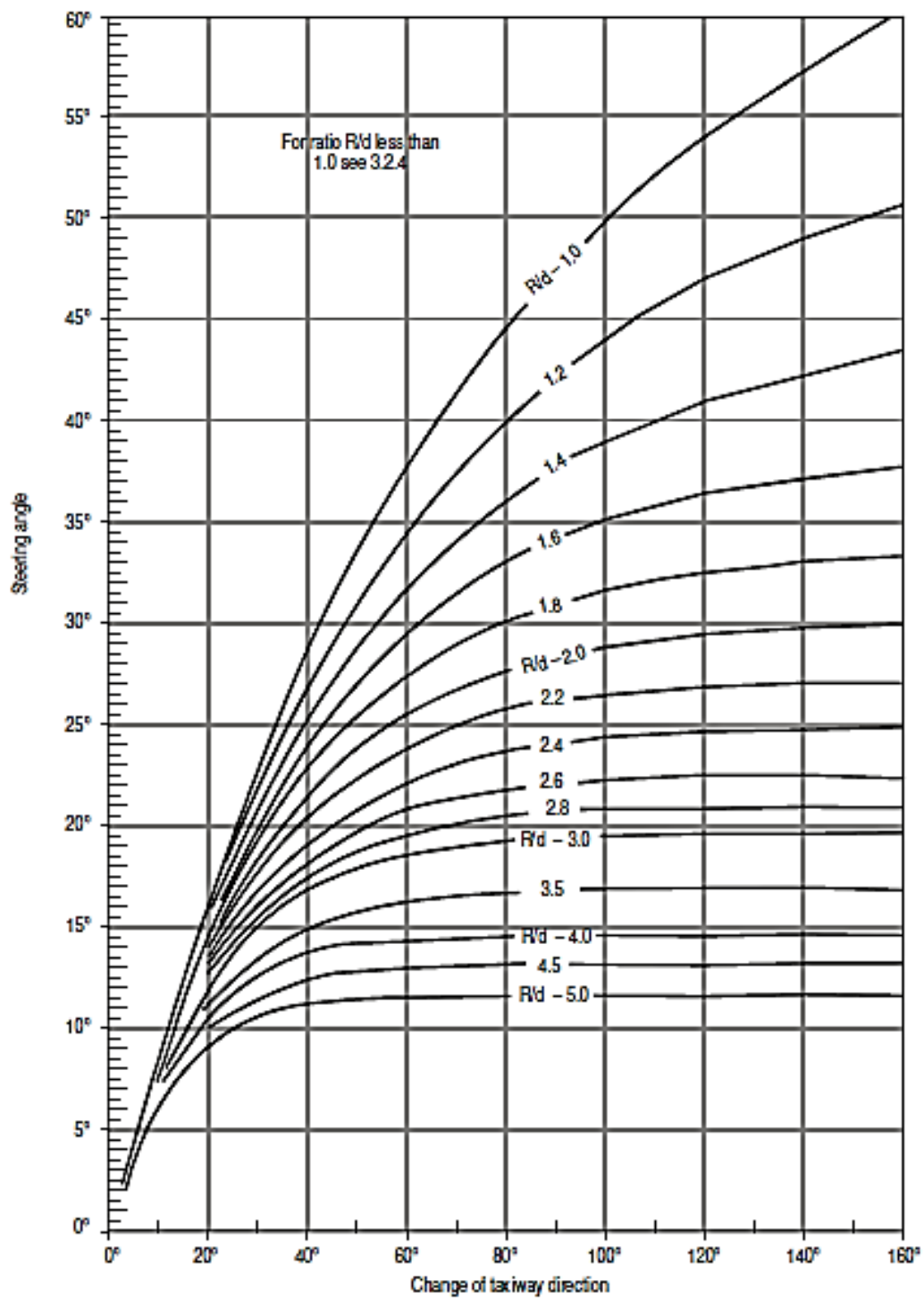
Σχήμα 3.9 Πολική γωνία του σημείου αναφοράς (S) του αεροσκάφους (ICAO 2005)



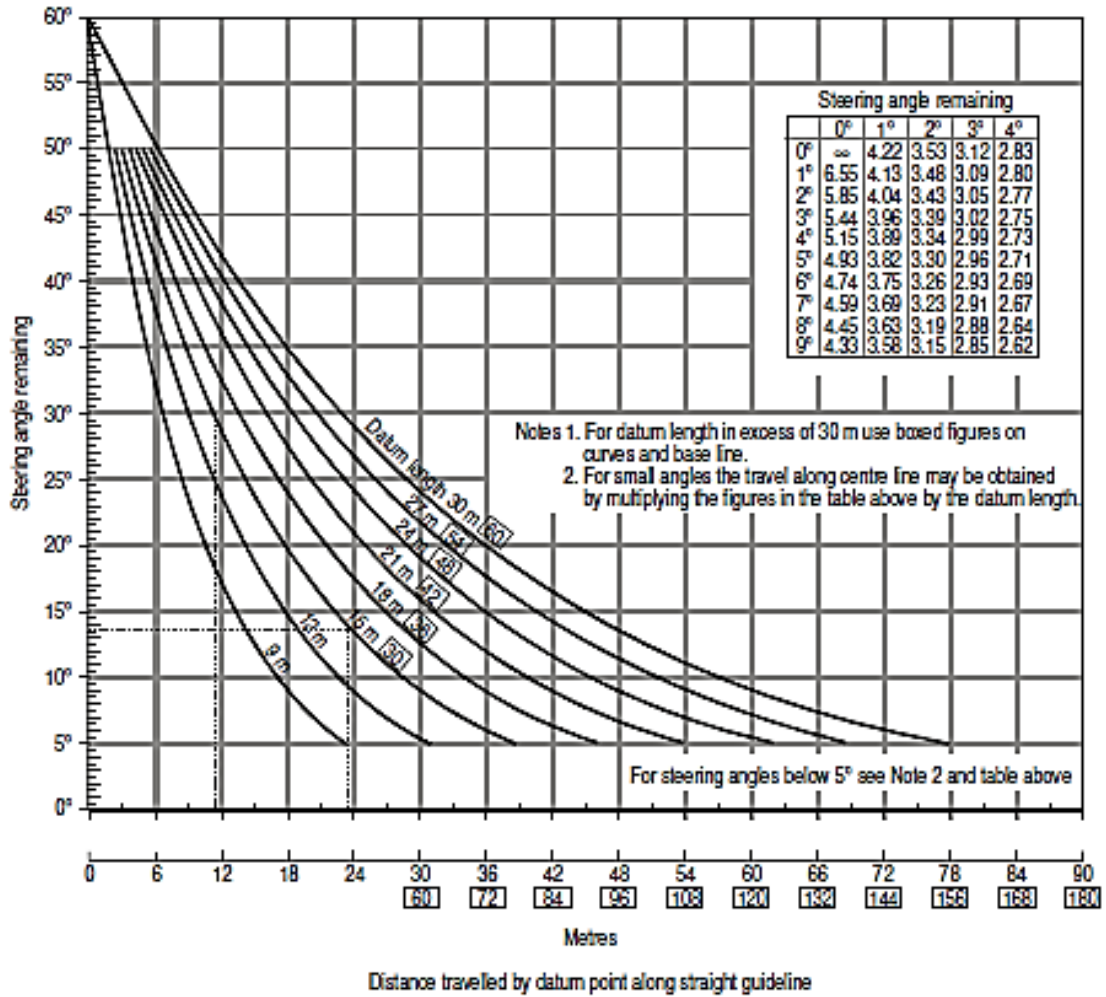
Σχήμα 3.10 Μέγιστη απόκλιση (λ max) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους (ICAO 2005)



Σχήμα 3.11 Γωνία οδήγησης (β) και απόκλιση (λ) του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους (ICAO 2005)



Σχήμα 3.12 Αύξηση της γωνίας οδήγησης κατά τη διάρκεια μιας στροφής (ICAO 2005)



Σχήμα 3.13 Μείωση της γωνίας οδήγησης κατά την ολοκλήρωση της στροφής (ICAO 2005)

3.3.2 Καθορισμός τροχιάς με χρήση γραφημάτων

Αυτή η μέθοδος συνεπάγεται τον καθορισμό διαφόρων διαδοχικών θέσεων του αεροσκάφους, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω παραμέτρους:

- την γωνία οδήγησης β και
- την απόκλιση λ του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών

και σχεδιάζει την θέση του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών, σημείο προς σημείο κατά την διάρκεια εκτέλεσης του ελιγμού από το αεροσκάφος. Το γραφικό αποτέλεσμα που προκύπτει πρέπει να ελέγχεται, για να επαληθευθεί ότι η γωνία οδήγησης κατά την διάρκεια της στροφής παραμένει εντός των επιτρεπόμενων ορίων για τον ρινιαίο τροχό του αεροσκάφους.

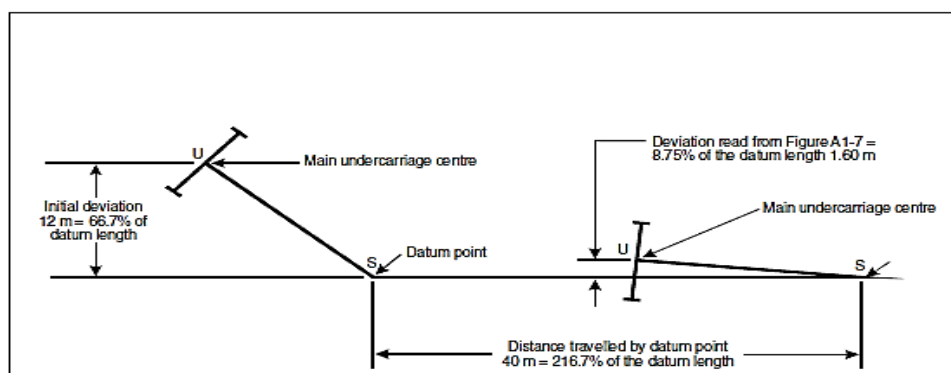
Το σημείο αναφοράς (S) κινείται σε ευθεία γραμμή

Καθορισμός του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών (U)

Δεδομένης της αρχικής απόκλισης του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών (U) του αεροσκάφους από την ευθεία γραμμή που ακολουθεί το σημείο αναφοράς (S) και την διανυόμενη απόσταση F, είναι δυνατό από το Σχήμα 3.7 να υπολογιστεί η απόκλιση του σημείου (U) για την παραπάνω απόσταση F.

Παράδειγμα

Έστω αεροσκάφος με μήκος αναφοράς $d = 18 \text{ m}$, το οποίο κινείται κατά απόσταση $F=40 \text{ m}$ σε ευθύγραμμο τμήμα τροχοδρόμου, όταν η αρχική του απόκλιση ήταν $\lambda_0 = 12 \text{ m}$ από την ευθύγραμμη τροχιά. Ζητείται η τελική απόκλιση του σημείου (U) μετά το πέρας της κίνησης του αεροσκάφους. (Σχήμα 3.14)



Σχήμα 3.14 Παράδειγμα υπολογισμού απόκλισης βάσης κύριου συστήματος τροχών όταν το αεροσκάφος εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση (ICAO 2005)

Ο υπολογισμός της ζητούμενης απόκλισης προκύπτει ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1 : Εκφράζεται η αρχική απόκλιση σε ποσοστό επί τοις εκατό ως προς το μήκος αναφοράς του αεροσκάφους. Δηλαδή:

$$(\lambda_0 / d) * 100 = (12 \text{ m} / 18 \text{ m}) * 100 = 66,7 \%$$

Βήμα 2 : Ομοίως εκφράζεται η διανυόμενη απόσταση F σε ποσοστό επί τοις εκατό ως προς το μήκος αναφοράς του αεροσκάφους. Δηλαδή :

$$(F / d) * 100 = (40 \text{ m} / 18 \text{ m}) * 100 = 216,7 \%$$

Βήμα 3 : Από το διάγραμμα του Σχήματος 3.7 προκύπτει ότι η απόκλιση του κέντρου (U) της βάσης κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους σε ποσοστό επί τοις εκατό ως προς το μήκος αναφοράς του αεροσκάφους είναι 8,75 %. Δηλαδή η απόκλιση σε αυτή τη θέση είναι 1,60m.

Το σημείο αναφοράς (S) κινείται σε κυκλικό τόξο

Καθορισμός του κέντρου (U) βάσης κύριου συστήματος τροχών

Τα διαγράμματα στα Σχήματα 3.8 έχουν σχεδιαστεί για επιλεγμένες τιμές της αναλογίας:

$$R / d = (\text{ακτίνα κυκλικού τόξου}) / (\text{μήκος αναφοράς αεροσκάφους})$$

Συγκεκριμένα οι τιμές της παραπάνω αναλογίας κυμαίνονται μεταξύ 0,5 και 10,0 με βήμα 0,5. Κάθε διάγραμμα εμφανίζει τα εξής μεγέθη:

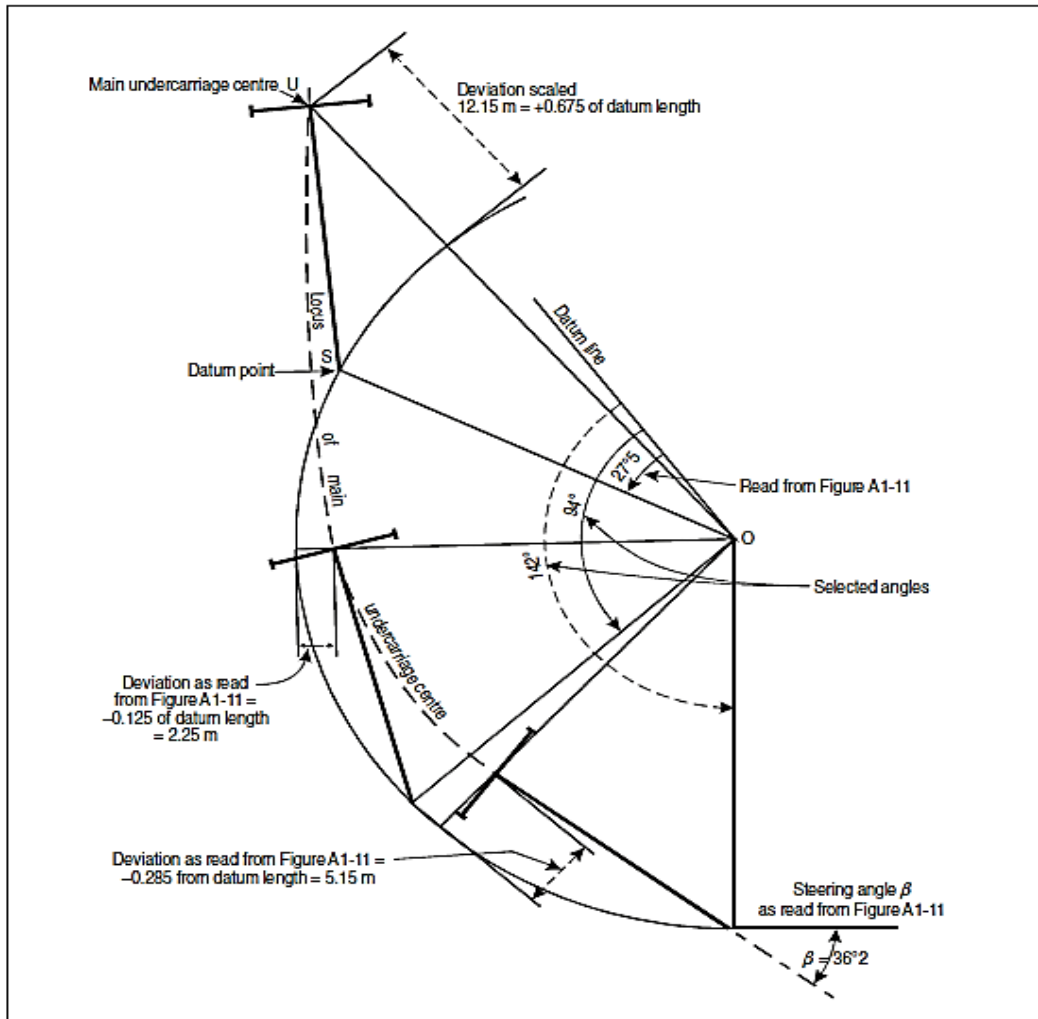
- i) την απόκλιση (λ) του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών (U) (συνεχής γραμμή)
- ii) την γωνία οδήγησης (β) του αεροσκάφους (διακεκομμένη γραμμή)

ως συνάρτηση των τιμών της πολικής γωνίας του σημείου αναφοράς του αεροσκάφους.

Γνωρίζοντας την αρχική απόκλιση του κέντρου (U) της βάσης του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους από την κυκλική τροχιά που ακολουθεί το σημείο αναφοράς (S) και την πολική γωνία θ_s που αντιστοιχεί στο διανυόμενο κυκλικό τόξο, είναι δυνατό από τα προηγούμενα διαγράμματα να υπολογιστεί η απόκλιση του σημείου (U) για την παραπάνω πολική γωνία θ_s .

Παράδειγμα

Έστω αεροσκάφος με μήκος αναφοράς $d = 18 \text{ m}$, το οποίο κινείται σε άξονα τροχοδρόμου κυκλικής τροχιάς με ακτίνα $R = 27 \text{ m}$ με αρχική του απόκλιση $\lambda_0 = 12,15 \text{ m}$ από την ευθύγραμμη τροχιά. Ζητείται η τελική απόκλιση του σημείου (U) στο πέρας της κίνησης του αεροσκάφους, όταν έχει διαγραφεί γωνία $\theta_s = 142^\circ$ (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15 Παράδειγμα υπολογισμού απόκλισης βάσης κυρίου συστήματος τροχών όταν το αεροσκάφος ακολουθεί καμπύλη τροχιά (ICAO 2005)

Ο υπολογισμός της ζητούμενης απόκλισης προκύπτει ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1: Εκφράζεται η αρχική απόκλιση ως ποσοστό του μήκους αναφοράς του αεροσκάφους:

$$(\lambda_0 / d) = (12,5 \text{ m} / 18 \text{ m}) = 0,675$$

Παρατηρώ ότι η απόκλιση αυτή ορίζεται γραφικά με τον εξής τρόπο. Φέρουμε την εφαπτομένη στο σημείο τομής της κυκλικής τροχιάς με την επιβατική ακτίνα ΟΥ, όπου Ο το κέντρο της κυκλικής τροχιάς. Η απόσταση μεταξύ αυτής και της παράλληλης της που διέρχεται από το σημείο U είναι η αρχική απόκλιση του προηγούμενου σημείου από την καμπύλη τροχιά.

Βήμα 2 : Υπολογίζεται η αναλογία R / d :

$$R / d = 27 \text{ m} / 18 \text{ m} = 1,5$$

Βήμα 3 : Από το Σχήμα 3.9 για τιμή $(R / d) = 1,5$ βρίσκεται η πολική γωνία του σημείου αναφοράς (S) που αντιστοιχεί στην αρχική απόκλιση του Βήματος 1.

Για $\lambda = +0,675$ προκύπτει $\theta_s = 27.5^\circ$

Βήμα 4 : Χρησιμοποιώντας την ευρεθείσα πολική γωνία, σχεδιάζεται η γραμμή αναφοράς ΟΧ.

Βήμα 5 : Λαμβάνοντας την τιμή της πολικής γωνίας θ_s , βρίσκουμε την αντίστοιχη απόκλιση, η οποία είναι 0,285 του μήκους αναφοράς. Δηλαδή η ζητούμενη απόκλιση είναι 5,15 m.

Βήμα 6 : Με την διαδικασία του βήματος 5 προσδιορίζονται οι διαδοχικές θέσεις του σημείου U, κατά την κίνηση του αεροσκάφους.

Βήμα 7 : Από το ίδιο διάγραμμα μπορούν να υπολογιστούν οι γωνίες οδήγησης (διακεκομμένη γραμμή) για κάθε επιλεγόμενη πολική γωνία του σημείου αναφοράς του αεροσκάφους. Για παράδειγμα στην πολική γωνία με τιμή $\theta_s = 142^\circ$ αντιστοιχεί η γωνία οδήγησης με τιμή $\beta = 36,2^\circ$

Σημείωση : Στα διαγράμματα, η διακεκομμένη γραμμή της γωνίας οδήγησης αντιστοιχεί στην συνεχή γραμμή που αντιπροσωπεύει την απόκλιση του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών. Όταν η απόκλιση του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών δείχνεται με διακεκομμένη γραμμή, η γωνία οδήγησης που διαβάζεται θα πρέπει να αντιστοιχεί στην διακεκομμένη γραμμή.

Γωνιακές αποκλίσεις ρινιαίου τροχού

Γνωρίζοντας την αναλογία $X = d / w$, του μήκους αναφοράς d του αεροσκάφους προς την απόσταση w , του ρινιαίου τροχού από το κέντρο της βάσης του κύριου συστήματος τροχών, οι γωνιακές αποκλίσεις του ρινιαίου τροχού για κάθε τιμή της γωνίας οδήγησης β δίνονται από τον Πίνακα 3.1. Η χρήση του πίνακα εξηγείται με το ακόλουθο παράδειγμα.

Παράδειγμα

Αεροσκάφος με μήκος αναφοράς $d = 55$ m και απόσταση του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών από το ρινιαίο τροχό $w = 36,6$ m αναπτύσσει γωνία οδήγησης $\beta = 77,778^\circ$ κατά την κίνηση του σε κυκλικό τόξο. Η γωνιακή απόκλιση του ρινιαίου τροχού υπολογίζεται ως εξής:

Η αναλογία X είναι: $X = d / w = (55 \text{ m} / 36,6 \text{ m}) = 1,5$

Από τον Πίνακα 3.1 για $X = 1,5$ προκύπτει ότι η αντίστοιχη γωνιακή απόκλιση του ρινιαίου τροχού για την δεδομένη γωνία οδήγησης είναι 72° .

Προσοχή: Είναι αναγκαίο να πραγματοποιείται έλεγχος για να διασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει υπέρβαση της μέγιστης γωνιακής απόκλισης του αεροσκάφους. Αν αυτό συμβεί, μια μεγαλύτερη τιμή ακτίνας της τροχιάς θα πρέπει να επιλεγεί και η καμπύλη συναρμογής θα είναι μεγαλύτερη. Παρόλα αυτά σε μερικές περιπτώσεις θα ήταν προτιμότερο να ξανασχεδιαστεί ο τροχόδρομος, λαμβάνοντας μια μεγαλύτερη τιμή ακτίνας για την καμπύλη του άξονα του τροχοδρόμου.

Πίνακας 3.1 Σχέση μεταξύ γωνίας οδήγησης και γωνιακής απόκλισης ριναίου τροχού (ICAO 2005)

Nose wheel deflection angle (°)	X = 1.0	X = 1.1	X = 1.2	X = 1.3	X = 1.4	X = 1.5	X = 1.6	X = 1.7	X = 1.8	X = 1.9	X = 2.0
0.5	0.500	0.550	0.600	0.650	0.700	0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	1.000
1.0	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400	1.500	1.600	1.700	1.800	1.899	1.999
1.5	1.500	1.650	1.800	1.950	2.100	2.249	2.399	2.549	2.699	2.848	2.998
2.0	2.000	2.200	2.400	2.599	2.799	2.998	3.198	3.397	3.597	3.796	3.995
2.5	2.500	2.750	2.999	3.249	3.498	3.747	3.996	4.245	4.494	4.742	4.991
3.0	3.000	3.299	3.599	3.898	4.196	4.495	4.793	5.091	5.389	5.686	5.984
3.5	3.500	3.849	4.198	4.546	4.894	5.242	5.589	5.936	6.283	6.629	6.974
4.0	4.000	4.399	4.797	5.194	5.591	5.988	6.384	6.779	7.174	7.568	7.961
4.5	4.500	4.948	5.395	5.842	6.288	6.733	7.177	7.621	8.063	8.505	8.945
5.0	5.000	5.497	5.993	6.489	6.983	7.476	7.969	8.460	8.949	9.438	9.925
5.5	5.500	6.046	6.591	7.135	7.677	8.219	8.758	9.296	9.833	10.368	10.900
6.0	6.000	6.595	7.188	7.780	8.371	8.959	9.546	10.131	10.713	11.293	11.871
6.5	6.500	7.144	7.785	8.425	9.063	9.698	10.331	10.962	11.590	12.215	12.837
7.0	7.000	7.692	8.382	9.069	9.754	10.436	11.115	11.790	12.463	13.132	13.797
7.5	7.500	8.240	8.978	9.712	10.443	11.171	11.895	12.615	13.332	14.044	14.751
8.0	8.000	8.788	9.573	10.354	11.131	11.904	12.673	13.437	14.196	14.951	15.700
8.5	8.500	9.336	10.167	10.995	11.818	12.635	13.448	14.255	15.057	15.852	16.642
9.0	9.000	9.883	10.761	11.635	12.502	13.364	14.220	15.070	15.912	16.748	17.577
9.5	9.500	10.430	11.355	12.273	13.185	14.091	14.989	15.880	16.763	17.638	18.505
10.0	10.000	10.977	11.947	12.911	13.867	14.815	15.755	16.686	17.609	18.522	19.425
10.5	10.500	11.523	12.539	13.547	14.546	15.536	16.517	17.488	18.449	19.399	20.339
11.0	11.000	12.069	13.130	14.181	15.223	16.255	17.276	18.286	19.284	20.270	21.244
11.5	11.500	12.612	13.720	14.815	15.899	16.971	18.031	19.079	20.113	21.134	22.142
12.0	12.000	13.160	14.309	15.447	16.572	17.684	18.783	19.867	20.937	21.992	23.031
12.5	12.500	13.705	14.898	16.077	17.243	18.394	19.530	20.650	21.754	22.842	23.912
13.0	13.000	14.249	15.485	16.706	17.912	19.101	20.274	21.429	22.566	23.685	24.784
13.5	13.500	14.793	16.071	17.333	18.578	19.805	21.013	22.202	23.371	24.520	25.648
14.0	14.000	15.337	16.657	17.959	19.242	20.505	21.748	22.970	24.170	25.348	26.503
14.5	14.500	15.880	17.241	18.583	19.904	21.203	22.479	23.733	24.963	26.168	27.350
15.0	15.000	16.423	17.825	19.205	20.563	21.896	23.206	24.490	25.748	26.981	28.187
15.5	15.500	16.965	18.407	19.825	21.219	22.587	23.928	25.242	26.528	27.785	29.015
16.0	16.000	17.506	18.988	20.444	21.873	23.273	24.645	25.988	27.300	28.582	29.834
16.5	16.500	18.047	19.568	21.061	22.524	23.957	25.358	26.728	28.066	29.371	30.644
17.0	17.000	18.588	20.147	21.675	23.172	24.636	26.066	27.463	28.825	30.152	31.444
17.5	17.500	19.128	20.725	22.288	23.818	25.312	26.770	28.192	29.577	30.924	32.235
18.0	18.000	19.667	21.301	22.899	24.460	25.984	27.469	28.915	30.321	31.689	33.017
18.5	18.500	20.206	21.876	23.508	25.100	26.652	28.162	29.632	31.059	32.445	33.790
19.0	19.000	20.745	22.450	24.115	25.737	27.316	28.851	30.343	31.790	33.194	34.553
19.5	19.500	21.282	23.023	24.719	26.371	27.976	29.535	31.048	32.514	33.934	35.308
20.0	20.000	21.820	23.594	25.322	27.001	28.633	30.214	31.747	33.231	34.666	36.052
20.5	20.500	22.356	24.164	25.922	27.629	29.285	30.889	32.440	33.940	35.389	36.788
21.0	21.000	22.892	24.733	26.520	28.254	29.933	31.558	33.127	34.643	36.105	37.514
21.5	21.500	23.427	25.300	27.116	28.876	30.577	32.221	33.808	35.338	36.812	38.232
22.0	22.000	23.962	25.866	27.710	29.494	31.218	32.880	34.483	36.026	37.512	38.940
22.5	22.500	24.496	26.430	28.301	30.109	31.854	33.534	35.152	36.708	38.203	39.639
23.0	23.000	25.029	26.993	28.891	30.722	32.485	34.183	35.814	37.283	38.886	40.330
23.5	23.500	25.561	27.554	29.478	31.330	33.113	34.826	36.471	38.049	39.562	41.011
24.0	24.000	26.093	28.114	30.062	31.936	33.737	35.465	37.122	38.709	40.229	41.684
24.5	24.500	26.625	28.673	30.644	32.539	34.356	36.098	37.766	39.362	40.889	42.348
25.0	25.000	25.155	29.230	31.224	33.128	34.971	36.726	38.405	40.009	41.540	43.003
25.5	25.500	27.685	29.786	31.802	33.734	35.582	37.349	39.037	40.648	42.185	43.650
26.0	26.000	28.214	30.340	32.377	34.326	36.189	37.967	39.664	41.281	42.821	44.288
26.5	26.500	28.742	30.892	32.950	34.916	36.792	38.580	40.284	41.906	43.450	44.919
27.0	27.000	29.270	31.443	33.520	35.502	37.390	39.188	40.899	42.525	44.071	45.541
27.5	27.500	29.796	31.992	34.088	36.084	37.985	39.791	41.508	43.138	44.685	46.155
28.0	28.000	30.323	32.540	34.653	36.664	38.575	40.389	42.111	43.744	45.292	46.760

3.4 Μέθοδοι σχεδιασμού διαπλατύνσεων κατά ICAO

3.4.1 Γραφική Μέθοδος

Η διεθνής βιβλιογραφία αναπτύσσει την γραφική μέθοδο καθορισμού του κέντρου βάσης κυρίου συστήματος τροχών (U) ενός αεροσκάφους κατά δύο διαφορετικούς τρόπους :

(α) Σύμφωνα με το βιβλίο του Robert Horonjeff (1975), περιγράφεται μια απλή γραφική επίλυση με ικανοποιητική ακρίβεια καθορισμού της καμπύλης συναρμογής. Η μέθοδος αυτή προσομοιάζει την κίνηση του αεροσκάφους σχεδιάζοντας την σε κλίμακα.

Δηλαδή το αεροσκάφος σχεδιασμού τοποθετείται διαδοχικά σε διάφορες θέσεις. Για κάθε θέση το σημείο αναφοράς S βρίσκεται επί της καθοδηγητικής γραμμής του τροχοδρόμου. Τα τμήματα S_i προσδιορίζονται διαδοχικά από τις προηγούμενες θέσεις του κέντρου βάσης του κυρίου συστήματος τροχών (U) του αεροσκάφους, έτσι ώστε $SU = d$. Στην προέκταση της βάσης των κυρίων τροχών μετρείται το περιθώριο ασφάλειας M και έτσι προκύπτει η εσωτερική οριογραμμή. Στο τέλος η οριογραμμή μορφώνεται συνήθως σαν κυκλικό τόξο εγγεγραμμένο στην περιβάλλουσα. Αναλυτικότερα η μέθοδος αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Βήμα 1.* Σχεδιάζεται η τροχιά που ακολουθεί ο ρινιαίος τροχός σε μια ικανοποιητική κλίμακα. Σημειώνεται ότι η κλίμακα αυτή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια.
- Βήμα 2.* Λαμβάνεται το μήκος αναφοράς (d) του αεροσκάφους σαν μονάδα SU στην κλίμακα σχεδιασμού που επιλέχθηκε.
- Βήμα 3.* Σημειώνεται η αρχική θέση της κλίμακας στην οδηγό γραμμή.
- Βήμα 4.* Τοποθετείται το σημείο U της κλίμακας στο σημείο U_2 , σε μικρή απόσταση από το σημείο U_1 , και σημειώνεται το σημείο S_2 στην οδηγό γραμμή. Η απόσταση U_1U_2 αναπαριστά την πρώτη αύξηση μετακίνησης των κύριων τροχών, στο τέλος του οποίου ο ρινιαίος τροχός βρίσκεται στο σημείο S_2 .
- Βήμα 5.* Στην διεύθυνση που ορίζεται από τα σημεία U_2S_2 , μετακινούμε το σημείο U της κλίμακας, κατά μια μικρή απόσταση στο σημείο U_3 , και σημειώνουμε το σημείο S_3 , που είναι η νέα θέση του ρινιαίου τροχού στην προκαθορισμένη τροχιά του άξονα του τροχοδρόμου.
- Βήμα 6.* Ομοίως, στην διεύθυνση που ορίζεται από τα σημεία U_3S_3 , μετακινούμε το σημείο S_4 , που είναι η νέα θέση του ρινιαίου τροχού στην προκαθορισμένη τροχιά του άξονα του τροχοδρόμου.
- Βήμα 7.* Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η τροχιά του κέντρου U βάσης του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους, καθορισθεί από τα σημεία U_1, U_2, U_3 , και ούτω καθεξής. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πρώτη φάση της στροφής οι αυξήσεις των μετακινήσεων των κυρίων τροχών πρέπει να είναι λογικά μεγάλες χωρίς αξιοσημείωτη απώλεια ακριβείας, αλλά μικρότερες αυξήσεις είναι επιθυμητές σε επόμενη φάση για να περιοριστεί η αλλαγής της διεύθυνσης του άξονα του αεροσκάφους μεταξύ

διαδοχικών θέσεων του ριναίου τροχού. Μετά από την εξοικείωση με την μέθοδο αυτή, γίνεται κατανοητό το εύρος των τιμών της αύξησης της μετακίνησης που θεωρείται αποδεκτό.

Βήμα 8. Η καμπύλη γραμμή που ορίζεται από τα σημεία U_1, U_2, \dots, U_n αντιπροσωπεύει την τροχιά του κέντρου U της βάσης του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους.

Βήμα 9. Από την καμπύλη γραμμή που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα σχεδιάζεται μια παράλληλη γραμμή σε απόσταση $(T/2 + M)$. Κατά αυτό τον τρόπο προκύπτει η εσωτερική οριογραμμή του τροχοδρόμου η οποία καλύπτει τις απαιτήσεις σχετικά με το ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας M .

(β) Σύμφωνα με το εγχειρίδιο Aerodrome Design Manual (Part 2) (ICAO 2005) η γραφική μέθοδος συνιστάται στον καθορισμό της διαπλάτυνσης, αποτυπώνοντας το πρόβλημα σε σχέδιο υπό κλίμακα. Όμοια με την προηγούμενη μέθοδο, η κλίμακα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να εξασφαλίζεται σημαντική ακρίβεια. Το σχήμα της γραφικής μεθόδου προσδιορισμού της διαπλάτυνσης προκύπτει από τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1. Σχεδιάζονται οι άξονες των τροχοδρόμων ή διαδρόμων που διασταυρώνονται,

Βήμα 2. Σχεδιάζονται οι οριογραμμές των τροχοδρόμων ή διαδρόμων

Βήμα 3. Σχεδιάζεται η τροχιά του κέντρου βάσης κύριου συστήματος τροχών για το συγκεκριμένο τύπο αεροσκάφους σημείο προς σημείο.

Βήμα 4. Σχεδιάζεται η διαπλάτυνση

Παράδειγμα

Σχεδιασμός καμπύλης συναρμογής με χρήση της γραφικής μεθόδου.

	Δεδομένα
Αλλαγή διεύθυνσης τροχοδρόμου	90,0 °
Ακτίνα άξονα τροχοδρόμου (R)	36,3 m
Πλάτος τροχοδρόμου (X)	23,0 m
Μήκος αναφοράς αεροσκάφους (d)	18,3 m
Πλάτος βάσης κύριου συστήματος τροχών (T)	8,0 m
Ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας (M)	4,5 m

Οπότε έχουμε τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1. Από το Σχήμα 3.3.6 για $(R/d) = 2$, προκύπτει ότι:

(α) Η τιμή της πολικής γωνίας θ_s του σημείου αναφοράς (S) στην αρχή της στροφής, που αντιστοιχεί σε γωνία οδήγησης $\beta=0$ είναι $\theta_s = 43^\circ$.

(β) Η τιμή της απόκλισης του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών η οποία εκφράζεται σαν δεκαδικό μέρος του μήκους αναφοράς του αεροσκάφους είναι 0,235. Στη συνέχεια προκειμένου να καλύψουμε την αλλαγή διεύθυνσης τροχοδρόμων κατά 90° δημιουργούμε ένα πίνακα τιμών πολικής γωνίας με βήμα αύξησης 20° . Στον πίνακα αυτόν εμφανίζονται αντίστοιχα τα μεγέθη (λ/d) και β .

θ_s	$\frac{\lambda}{d}$	β
43°	+0.235	0
60°	+0.03	13°
80°	-0.11	21°
100°	-0.19	25°
120°	-0.22	27°
133°	-0.24	28°

Βήμα 2. Προκειμένου να καλυφθεί, η περίπτωση της κίνησης του αεροσκάφους στο ευθύγραμμο τμήμα του τροχοδρόμου, στο οποίο ισχύει τιμή της γωνίας οδήγησης 28° , λαμβάνονται από το Σχήμα 3.3.5 τιμές της αναλογίας λ/d με αρχική την τιμή $\lambda/d = \sin 28^\circ = 0,47$, που αντιστοιχεί σε μηδενικό διανυόμενο διάστημα. Ως βήμα μεταβολής της απόκλισης επιλέγεται η τιμή 0,10. Έτσι προκύπτει ο επόμενος πίνακας:

$\frac{\lambda}{d}$	0.47	0.35	0.25	0.15	0.10	0.05
$\frac{F}{d}$	0	0.34	0.69	1.21	1.62	2.31

Βήμα 3. Η σχεδίαση των καμπυλών επιτυγχάνεται ως εξής (Σχήμα 3.16):

(α) Αρχικά σχεδιάζεται η γραμμή αναφοράς

(β) Για κάθε τιμή της πολικής γωνίας θ_s του Βήματος 1, σχεδιάζεται το αντίστοιχο σημείο U . Για αυτό, τοποθετείται το σημείο S στην οδηγό γραμμή, σχεδιάζοντας τον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους με την αντίστοιχη γωνία οδήγησης β και σημειώνεται το σημείο U σε απόσταση $d=18,3$ m από το σημείο S . Χρησιμοποιώντας τις τιμές του πηλίκου λ/d του Βήματος 1, ελέγχουμε την ακρίβεια σχεδίασης.

(γ) Όπου το σημείο αναφοράς (S) επανέρχεται σε ευθύγραμμη τροχιά μετά το πέρας της στροφής, χρησιμοποιούμε τις τιμές των αναλογιών λ/d και F/d του Βήματος 2, σχεδιάζοντας την θέση του κέντρου (U) της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών.

(δ) Στην κάθετο που άγεται από το σημείο U στον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους λαμβάνεται απόσταση ίση με $(T/2 + M) = (4+4,5) = 8,5$ m προς τα κοίλα της τροχιάς, για κάθε επιλεγμένο σημείο U . Η γραμμή που ορίζεται από τα προηγούμενα σημεία είναι μια καμπύλη παράλληλη στην τροχιά του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών. Αυτό είναι το θεωρητικά ελάχιστο όριο για τον σχεδιασμό της διαπλάτυνσης.

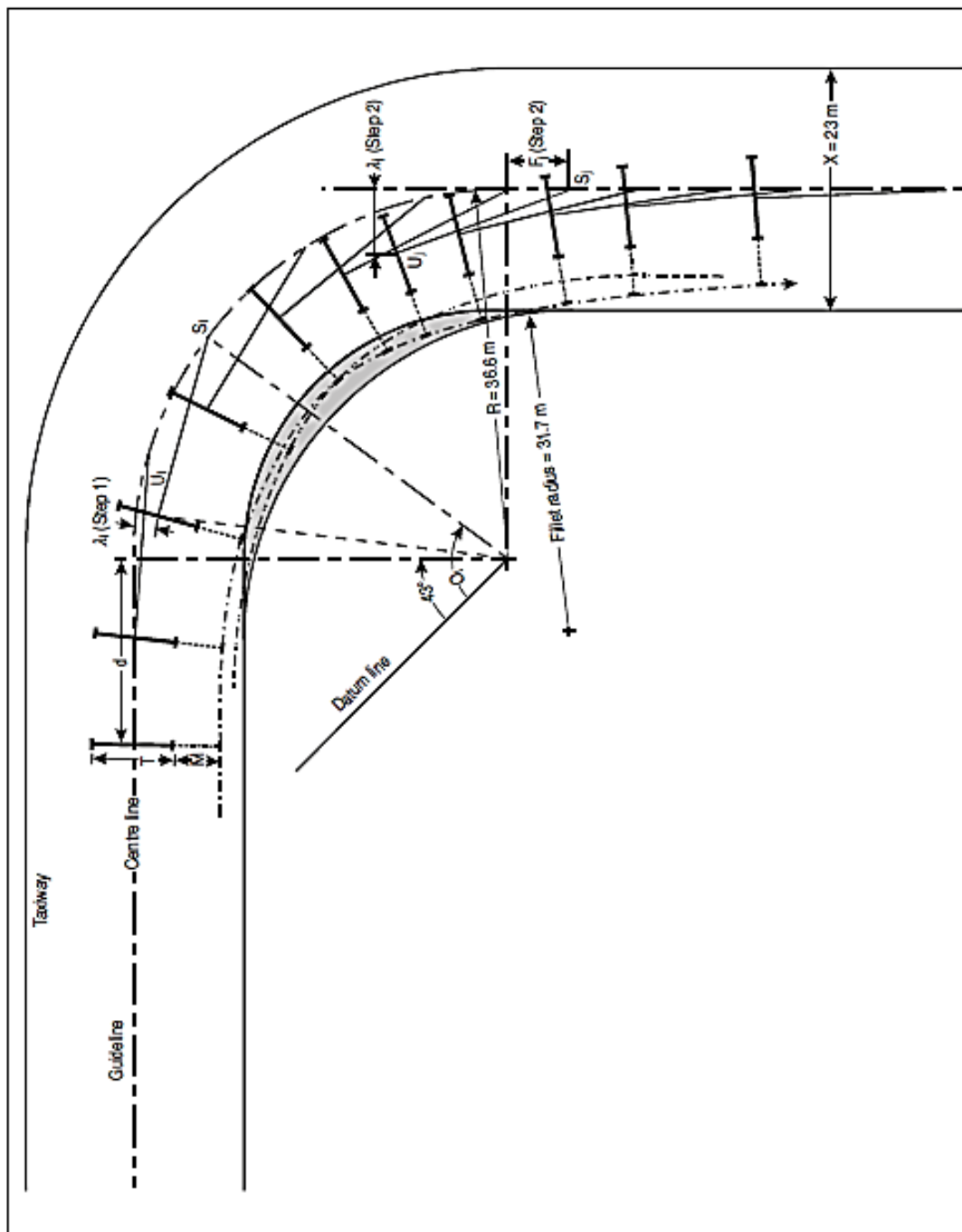
Παρατήρηση: Αν ο τροχόδρομος χρησιμοποιείται από αεροσκάφη και στις δύο κατευθύνσεις, τότε με παρόμοιο τρόπο σχεδιάζεται και η δεύτερη καμπύλη συναρμογής. Τελικά φέρεται η περιβάλλουσα των δύο προηγούμενων καμπυλών, οπότε προκύπτει η ζητούμενη διαπλάτυνση.

(ε) Η επιλογή σχεδίασης της καμπύλης συναρμογής πρέπει να λαμβάνει σαν κριτήριο την ευκολία κατασκευής. Σαν κανόνα είναι προτιμότερο να επιλέγεται μια περίμετρος η οποία αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα και ένα τόξο κύκλου.

Βήμα 4. Τέλος εκτελούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι:

(α) Αν καλύπτεται η απαίτηση για το ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας M για κάθε σημείο της καμπύλης συναρμογής, και

(β) Αν η μέγιστη τιμή της γωνίας οδήγησης, (για το εν λόγω παράδειγμα $\max \beta = 28^\circ$) είναι συμβατή με τα λειτουργικά όρια γωνιακής απόκλισης του ρινιαίου τροχού για όλους τους τύπους αεροσκαφών που θα εξυπηρετηθούν από το αεροδρόμιο.



Σχήμα 3.16 Γραφική μέθοδος σχεδιασμού διαπλατύνσεων (ICAO 2005)

3.4.2 Μέθοδος τόξου και εφαπτομένης

Η μέθοδος που περιγράφεται σε αυτήν την ενότητα προέρχεται από έρευνες του Ηνωμένου Βασιλείου, η οποία στη συνέχεια έγινε αντικείμενο προσοχής στην Αυστραλία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Παρόλα αυτά η μέθοδος προσεγγίζει με επαρκή ακρίβεια την πραγματικότητα και χαρακτηρίζεται ως ρεαλιστική για τον σχεδιασμό των διαπλάτυνσεων.

Η τροχιά του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών ενός αεροσκάφους κατά την κίνηση του σε στροφή είναι μια πολύπλοκη καμπύλη, η οποία μπορεί να προσεγγισθεί από ένα τόξο κύκλου και τις εφαπτόμενες αυτού. Ο σχεδιασμός της καμπύλης διαπλάτυνσης που πιστά ακολουθεί την τροχιά του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών και επιτρέπει το ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο ασφαλείας που απαιτείται, μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας:

- (α) ένα τόξο ομόκεντρο με τον άξονα του τροχοδρόμου, ώστε να παρέχεται το απαιτούμενο επιπρόσθετο πλάτος οδοστρώματος στο εσωτερικό της στροφής, και
- (β) μια εφαπτομένη σε κάθε άκρο του τόξου, για την διαμόρφωση του υπόλοιπου μέρους της διαπλάτυνσης, ώστε να καλύπτεται η απόκλιση της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους.

Για τον σχεδιασμό της διαπλάτυνσης, επαρκεί η γνώση της ακτίνας (r) του τόξου και το μήκος (l) των εφαπτόμενων σε κάθε άκρο του τόξου (Σχήμα 3.17).

Καθορισμός ακτίνας τόξου διαπλάτυνσης

Η ακτίνα του τόξου καθορίζεται από την σχέση : $r = R - (\lambda_{\max} + M + T/2)$

όπου:

R : η ακτίνα του άξονα του τροχοδρόμου η οποία λαμβάνεται ως οδηγός γραμμή

λ_{\max} : η μέγιστη τιμή της απόκλισης της βάσης του κύριου συστήματος τροχών

M : το ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας

T : το πλάτος της βάσης του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους

Η μέγιστη τιμή απόκλισης της βάσης του κύριου συστήματος τροχών λ_{\max} εξαρτάται από το μήκος αναφοράς (d), την ακτίνα καμπυλότητας του άξονα του τροχοδρόμου (R), και βαθμό αλλαγής διεύθυνσης. Η μέγιστη τιμή υπολογίζεται από το Σχήμα 3.10 ως ποσοστό του μήκους αναφοράς του αεροσκάφους για κάθε τιμή της αναλογίας R/d μεταξύ των τιμών 1 και 5.

Όταν το μήκος αναφοράς του αεροσκάφους (d) είναι μεγαλύτερο από την ακτίνα του άξονα του τροχοδρόμου (R), η κατασκευαζόμενη γραμμή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί με τιμή για ακτίνα ίση με το μήκος αναφοράς υποθέτοντας ότι ισχύει $R/d = 1$. Τα σημεία στα οποία η κατασκευαζόμενη γραμμή συναντά τον ευθύγραμμο τομέα του άξονα του τροχοδρόμου πρέπει να σχεδιάζονται σε σχήμα σφήνας.

Καθορισμός μήκους άκρων διαπλάτυνσης σφηνοειδούς μορφής

Η διαπλάτυνση δεν απαιτείται πλέον, όταν η απόκλιση της βάσης του κύριου συστήματος τροχών είναι μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση χωρίς εφαρμογή της διαπλάτυνσης. Η απόκλιση αυτή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda = X / 2 - (M + T / 2)$$

όπου :

X : το πλάτος του τροχοδρόμου

M : το ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας

T : το πλάτος βάσης του κυρίου συστήματος τροχών

Η υπολειπόμενη απόκλιση επιτυγχάνεται στο τέλος της στροφής, όταν το σημείο αναφοράς (S) έχει καλύψει απόσταση F κατά μήκος του άξονα του ευθύγραμμου τροχοδρόμου, και η οποία δίνεται από την σχέση (17)

$$\log \tan \frac{\beta}{2} = \log \tan \frac{\beta_{\max}}{2} - \frac{F}{d} \quad (17)$$

η οποία εκφράζει την προοδευτική ελάττωση της γωνίας οδήγησης (β).

Η προηγούμενη εξίσωση (17) επιτρέπει στην διανυόμενη απόσταση F να εκφρασθεί συναρτήσει των:

- (α) β , η υπολειπόμενη γωνία οδήγησης που αντιστοιχεί στην απόκλιση λ όπως αναλύεται παραπάνω, και
- (β) β_{\max} , η μέγιστη τιμή της γωνίας οδήγησης κατά την διάρκεια μιας στροφής. Αυτή η τιμή επιτυγχάνεται όταν η απόκλιση λ λαμβάνει την μέγιστη τιμή της, όπως δίνεται στο Σχήμα 3.10.

Επομένως το μήκος (l) των επαπτόμενων σε κάθε άκρο του τόξου δίνεται από τη σχέση:

$$l = F - d$$

Η χρήση διαγραμμάτων απαλλάσσει τον χρήστη από τους μαθηματικούς υπολογισμούς. Η παραμένουσα γωνία οδήγησης (β) επιτυγχάνεται όταν η απόκλιση είναι ίση με την μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση χωρίς να είναι απαραίτητη η εφαρμογή διαπλάτυνσης και προσδιορίζεται με την εφαρμογή του Σχήματος 3.11. (Σημειώνεται ότι τα Σχήματα 3.11-3.13 καλύπτουν ένα πεδίο τιμών για το μήκος αναφοράς (d) μεταξύ 12 και 60 m). Η μέγιστη τιμή της γωνίας οδήγησης κατά την διάρκεια της στροφής προκύπτει από το Σχήμα 3.11, έχοντας ως δεδομένα την αλλαγή διεύθυνσης του τροχοδρόμου και της αναλογίας R/d . Τελικά το Σχήμα 3.13 δίνει την απόσταση F που διανύει το σημείο αναφοράς στο ευθύγραμμο τμήμα σε σχέση με την σταδιακή μείωση της γωνίας οδήγησης.

Είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται ότι η γωνία οδήγησης δεν υπερβαίνει την προσδοκώμενη μέγιστη γωνία στροφής του ρινιαίου τροχού του αεροσκάφους. Αν αυτό συμβεί, τότε η ακτίνα καμπυλότητας της οδηγού γραμμής και το μέγεθος της διαπλάτυνσης θα πρέπει να αυξηθεί.

Σημείωση: Στην πραγματικότητα το σημείο αναφοράς του αεροσκάφους δεν συμπίπτει με τον ρινιαίο τροχό, οπότε προκύπτει ένα μικρό σφάλμα, το οποίο όμως είναι της ασφάλειας.

Σχεδιασμός Διαπλάτυνσης

Η απαιτούμενη διαπλάτυνση επιτυγχάνεται με τα παρακάτω βήματα:

- (α) Σχεδιάζεται ένα ομόκεντρο κυκλικό τόξο με τον άξονα του τροχοδρόμου χρησιμοποιώντας ακτίνα (r).
- (β) Κατά μήκος της εσωτερικής οριογραμμής του τροχοδρόμου, σημειώνονται τα σημεία Q1 και Q2 σε απόσταση l από το καμπύλο τμήμα της καθοδηγητικής γραμμής.
- (γ) Από τα προηγούμενα σημεία σχεδιάζονται εφαπτόμενες στο κυκλικό τόξο ακτίνας (r).

Η χρήση των προηγούμενων διαγραμμάτων μπορεί να επεξηγηθεί από το ακόλουθο παράδειγμα.

Παράδειγμα

Σχεδιασμός καμπύλης συναρμογής με χρήση της μεθόδου τόξου και εφαπτόμενης.

	Δεδομένα
Αλλαγή διεύθυνσης τροχοδρόμου	135°
Ακτίνα άξονα τροχοδρόμου (R)	42 m
Πλάτος τροχοδρόμου (X)	23 m
Μήκος αναφοράς αεροσκάφους (d)	22 m
Πλάτος βάσης κυρίου συστήματος τροχών (T)	8 m
Ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας (M)	4,5 m

Οπότε προκύπτουν τα παρακάτω:

Η αναλογία $R/d = 42/22 = 1,9$

Η μέγιστη απόκλιση από το Σχήμα 3.10 ανέρχεται σε ποσοστό 27% του μήκους αναφοράς d άρα προκύπτει $\lambda_{max} = 6$ m.

Η ακτίνα r του τόξου της καμπύλης συναρμογής υπολογίζεται ως εξής:

$$r = R - (\lambda_{max} + M + T/2) = 42 - (6 + 4 + 4,5) = 27,5 \text{ m}$$

Η μέγιστη απόκλιση χωρίς καμπύλη συναρμογής προκύπτει από την σχέση:

$$\lambda = X / 2 - (M + T / 2) = 11,5 - (4,5 + 4) = 3 \text{ m}$$

Από το Σχήμα 3.11 για το δεδομένο μήκος αναφοράς και την μέγιστη απόκλιση χωρίς την εφαρμογή της συναρμογής, προκύπτει γωνία οδήγησης 7,6°.

Από το Σχήμα 3.12 σύμφωνα με την αλλαγή διεύθυνσης του τροχοδρόμου και την αναλογία R/d προκύπτει αύξηση της γωνίας οδήγησης σε 31°.

Οι παραπάνω γωνίες οδήγησης μετατρέπονται σε διανυόμενες αποστάσεις από το σημείο αναφοράς του αεροσκάφους κατά μήκος του ευθύγραμμου άξονα του τροχοδρόμου χρησιμοποιώντας το Σχήμα 3.13 και προκύπτει ότι:

- για γωνία οδήγησης 7,6° αντιστοιχεί απόσταση $L_1 = 47,9$ m
- για γωνία οδήγησης 31° αντιστοιχεί απόσταση $L_2 = 16,5$ m

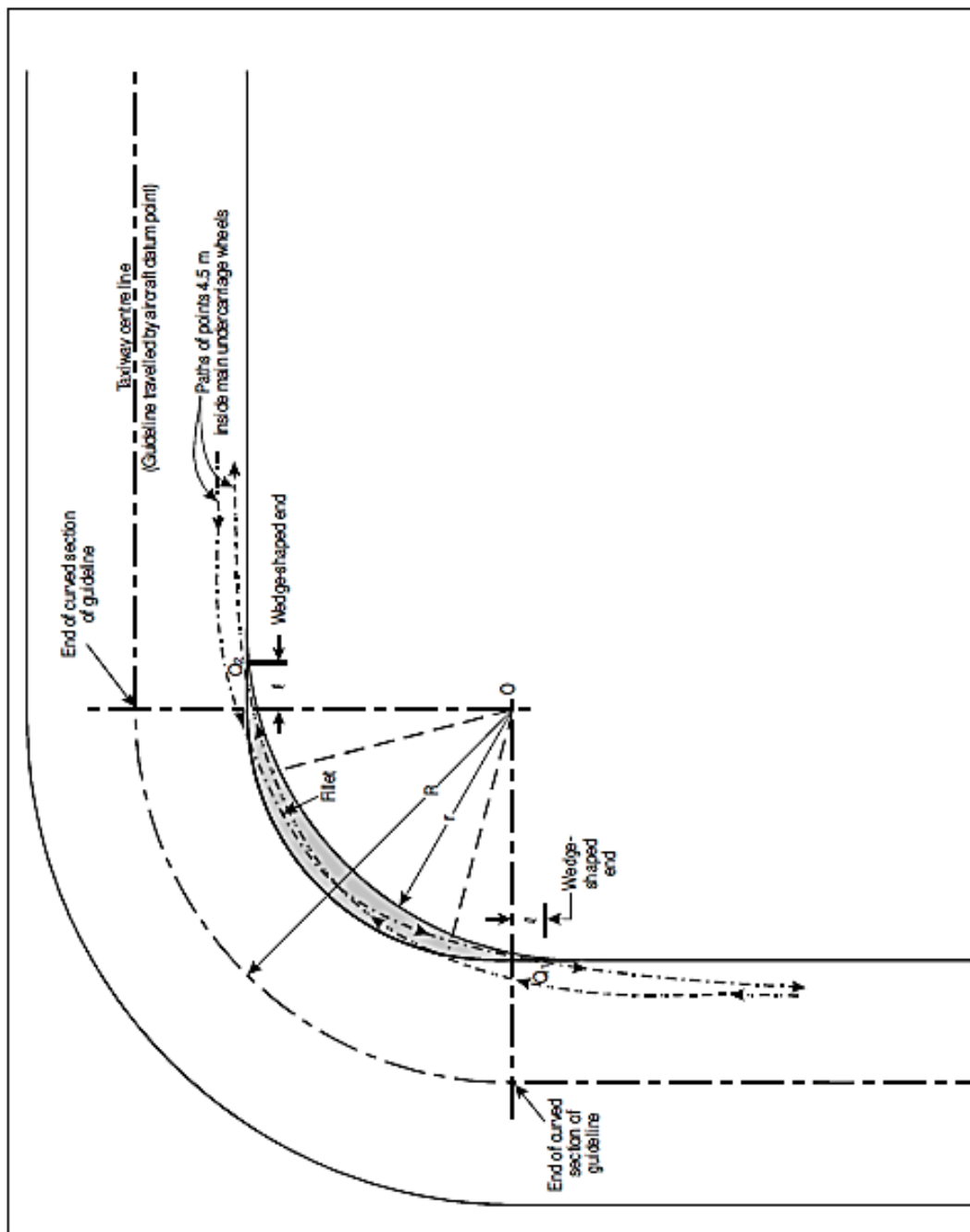
Η διαφορά των παραπάνω αποστάσεων δίνουν την απόσταση L_3 η οποία είναι η διανύσιμη απόσταση του σημείου αναφοράς κατά την μείωση της γωνίας οδήγησης από 31° σε $7,6^\circ$.

$$L_3 = L_1 - L_2 = 47,9 - 16,5 = 31,4 \text{ m}$$

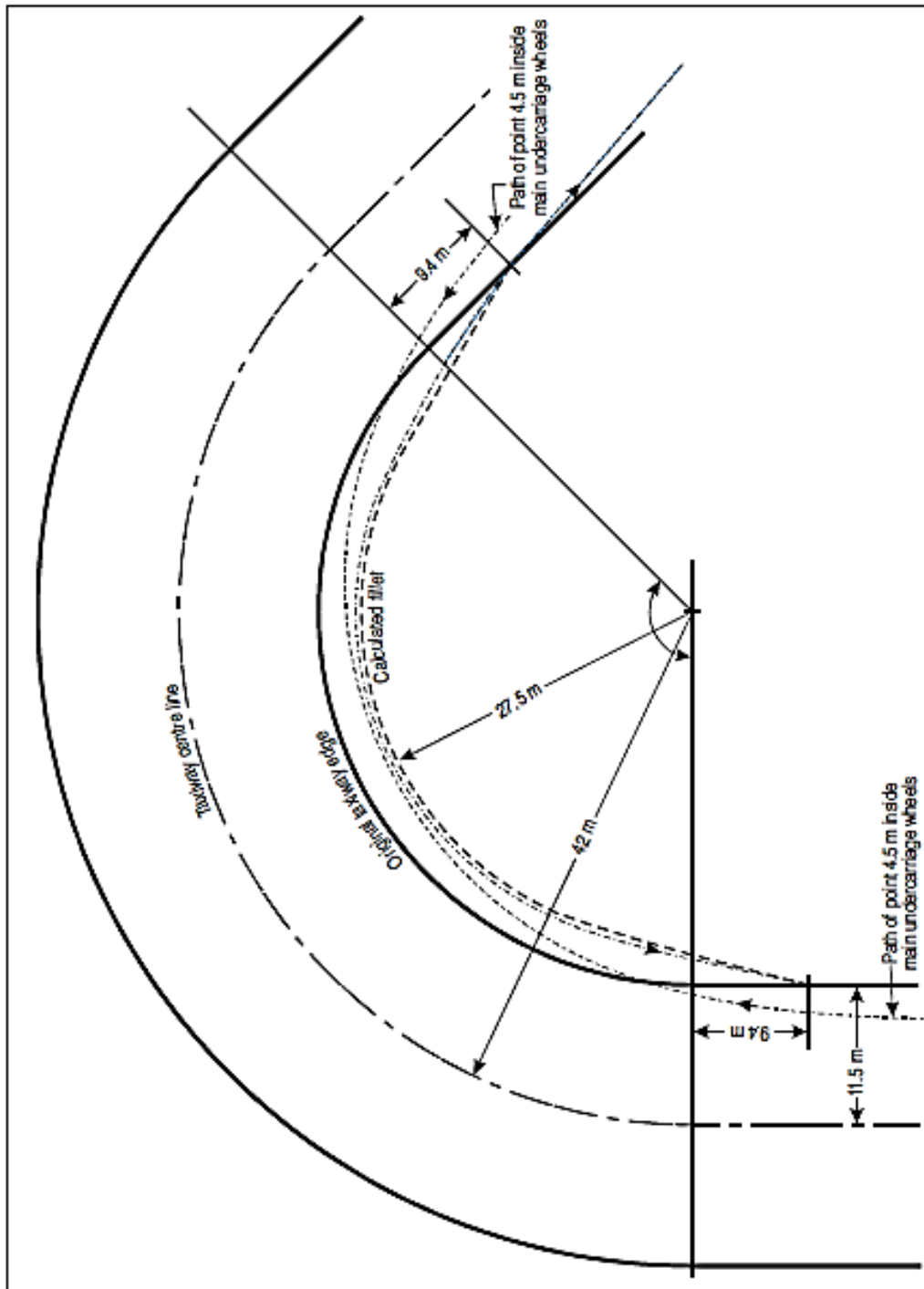
Η απόσταση του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών είναι πέρα από το τέλος της καμπύλης και υπολογίζεται από την διαφορά του μήκους αναφοράς και της απόστασης L_3 . ($31,4 - 22 = 9,4 \text{ m}$)

Τελικά η σχεδίαση της καμπύλης συναρμογής προκύπτει ως εξής (Σχήμα 3.18):

1. Σχεδιάζεται τόξο ομόκεντρο του άξονα του τροχοδρόμου και ακτίνας 27,5 m.
2. Σημειώνονται σημεία πάνω στην εσωτερική οριογραμμή του τροχοδρόμου και σε απόσταση 9,4 m πέρα από το τέλος της καμπύλης.
3. Σχεδιάζονται οι εφαπτόμενες στο τόξο συναρμογής από τα σημεία του προηγούμενου βήματος.



Σχήμα 3.17 Σχεδιασμός διαπλάτυσεων με τη μέθοδο τόξου και εφαπτομένης (ICAO 2005)



Σχήμα 3.18 Παράδειγμα σχεδιασμού διαπλατύνσεων με τη μέθοδο τόξου και εφαπτομένης (ICAO 2005)

Παραλλαγή της μεθόδου τόξου και εφαπτομένης

Μία καλύτερη προσέγγιση της απαιτούμενης διαπλάτυνσης είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη χρήση δύο ικανοποιητικών γραμμών. Το δεύτερο σημείο επιτυγχάνεται με επανυπολογισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης απόκλισης χωρίς διαπλάτυνση, αλλά λαμβάνοντας ένα μικρότερο περιθώριο ασφαλείας. Η πρακτική μέθοδος και τα αποτελέσματα που προκύπτουν απεικονίζονται στο παράδειγμα που ακολουθεί.

Παράδειγμα

Σύνθετη καμπύλη συναρμογής για αεροσκάφη με μεγάλο μήκος αναφοράς

	Δεδομένα
Αλλαγή διεύθυνσης τροχοδρόμου	90°
Ακτίνα άξονα τροχοδρόμου (R)	34,3 m
Πλάτος τροχοδρόμου (X)	23 m
Μήκος αναφοράς αεροσκάφους (d)	25,6 m
Πλάτος βάσης κυρίου συστήματος τροχών (T)	13,1 m
Ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας (M)	4,6 m

Για τον προσδιορισμό του πρώτου σημείου της καμπύλης συναρμογής απαιτούνται τα εξής:

Η αναλογία $R/d = 34,3/25,3 = 1,34$

Η μέγιστη απόκλιση από το Σχήμα 3.10 ανέρχεται σε ποσοστό 32,6% του μήκους αναφοράς d άρα προκύπτει $\lambda_{max} = 8,3$ m.

Η ακτίνα r του τόξου της καμπύλης συναρμογής υπολογίζεται ως εξής:

$$r = R - (\lambda_{max} + M + T/2) = 34,3 - (8,36 + 4,6 + 6,6) = 14,8 \text{ m}$$

Η μέγιστη απόκλιση χωρίς καμπύλη συναρμογής προκύπτει από την σχέση:

$$\lambda = X / 2 - (M + T / 2) = 11,5 - (4,6 + 6,6) = 0,3 \text{ m}$$

Από το Σχήμα 3.11 για το δεδομένο μήκος αναφοράς και την μέγιστη απόκλιση χωρίς την εφαρμογή της συναρμογής, προκύπτει γωνία οδήγησης 0,7°.

Από το Σχήμα 3.12 σύμφωνα με την αλλαγή διεύθυνσης του τροχοδρόμου (90°) και την αναλογία $R/d = 1,34$ προκύπτει αύξηση της γωνίας οδήγησης σε 39°.

Οι παραπάνω γωνίες οδήγησης μετατρέπονται σε διανυόμενες αποστάσεις από το σημείο αναφοράς του αεροσκάφους κατά μήκος του ευθύγραμμου άξονα του τροχοδρόμου χρησιμοποιώντας το Σχήμα 3.13 και προκύπτει ότι:

- για γωνία οδήγησης $0,7^\circ$ αντιστοιχεί απόσταση $L_1 = 4,59 * d = 117,5 \text{ m}$
- για γωνία οδήγησης 39° αντιστοιχεί απόσταση $L_2 = 12,5 \text{ m}$

Η διαφορά των παραπάνω αποστάσεων δίνουν την απόσταση L_3 η οποία είναι η διανυόμενη απόσταση του σημείου αναφοράς κατά την μείωση της γωνίας οδήγησης από 39° σε $0,9^\circ$.

$$L_3 = L_1 - L_2 = 117,5 - 12,5 = 105 \text{ m}$$

Η απόσταση του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών είναι πέρα από το τέλος της καμπύλης και υπολογίζεται από την διαφορά του μήκους αναφοράς και της απόστασης L_3 . ($105 - 25,6 = 79,4 \text{ m}$)

Για τον προσδιορισμό του δεύτερου σημείου της καμπύλης συναρμογής απαιτείται επανεκτέλεση των υπολογισμών λαμβάνοντας μειωμένη τιμή του περιθωρίου ασφαλείας.

Τα παρακάτω βήματα παραμένουν αμετάβλητα:

Η αναλογία $R/d = 34,3/25,3 = 1,34$

Η μέγιστη απόκλιση $\lambda_{\max} = 8,3 \text{ m}$

Η γωνία οδήγησης στο τέλος της καμπύλης $= 39^\circ$

Η απόσταση αναφοράς που αντιστοιχεί σε γωνία οδήγησης 39° $L_2 = 12,5 \text{ m}$

Στη συνέχεια επιλέγεται νέα μειωμένη τιμή για το περιθώριο ασφαλείας $M_1 = 1,5 \text{ m}$

Η μέγιστη απόκλιση χωρίς καμπύλη συναρμογής προκύπτει από την σχέση:

$$\lambda = X / 2 - (M + T / 2) = 11,5 - (1,5 + 6,6) = 3,4 \text{ m}$$

Από το Σχήμα 3.11 για το δεδομένο μήκος αναφοράς και την μέγιστη απόκλιση χωρίς την εφαρμογή της συναρμογής, προκύπτει γωνία οδήγησης $7,5^\circ$ που μετατρέπεται από το Σχήμα 3.13 σε απόσταση αναφοράς $L_1 = 55,5 \text{ m}$. Από την διαφορά των L_1 και L_2 , προκύπτει η διανυόμενη απόσταση του σημείου αναφοράς κατά την μείωση της γωνίας οδήγησης από 39° σε $7,5^\circ$.

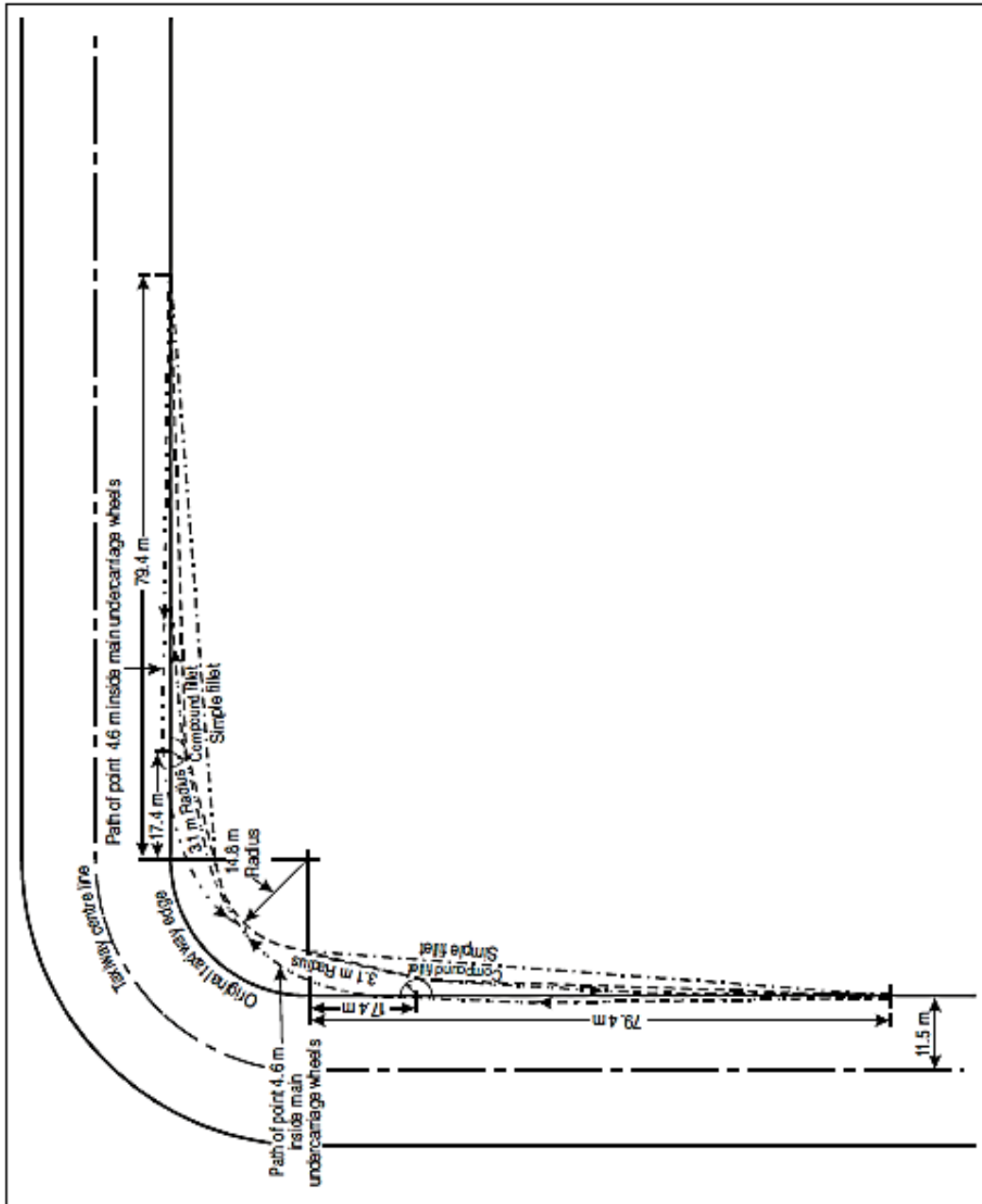
$$L_3 = L_1 - L_2 = 55,5 - 12,5 = 43 \text{ m}$$

Η απόσταση του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών είναι πέρα από το τέλος της καμπύλης και υπολογίζεται από την διαφορά του μήκους αναφοράς και της απόστασης L_3 . ($43 - 25,6 = 17,4$ m)

Σε αυτό το σημείο παρέχεται ένα περιθώριο ασφαλείας 1,5 m. Εφόσον απαιτούνται τουλάχιστον 4,6 m, η τελική διαπλάτυνση θα πρέπει να διέρχεται σε απόσταση 3,1 m εσωτερικά του σημείου.

Τελικά η σχεδίαση της καμπύλης συναρμογής προκύπτει ως εξής (Σχήμα 3.19):

1. Σχεδιάζεται τόξο ομόκεντρο του άξονα του τροχοδρόμου και ακτίνας 14,8 m.
2. Σημειώνονται σημεία πάνω στην εσωτερική οριογραμμή του τροχοδρόμου και σε απόσταση 17,4 m πέρα από το τέλος της καμπύλης.
3. Σχεδιάζονται τόξα με κέντρα τα σημεία του βήματος 2 και ακτίνας 3,1 m.
4. Σχεδιάζονται οι κοινές εφαπτόμενες στο τόξο συναρμογής από τα σημεία των βημάτων 1 και 3.
5. Σημειώνονται σημεία πάνω στην εσωτερική οριογραμμή του τροχοδρόμου και σε απόσταση 79,4 m πέρα από το τέλος της καμπύλης.
6. Σχεδιάζονται οι εφαπτόμενες στα τόξα του βήματος 3 από τα σημεία του βήματος 5.



Σχήμα 3.19 Σύνθετη καμπύλη συναρμογής για αεροσκάφος με μεγάλο μήκος αναφοράς (ICAO 2005)

3.4.3 Ταχεία μέθοδος γραφημάτων

Η ταχεία μέθοδος γραφημάτων παρέχει την δυνατότητα σχεδίασης καμπύλων συναρμογής σε στροφές τροχοδρόμων με σχετικά απλό τρόπο. Συγκεκριμένα η μέθοδος αυτή προσδίδει σταθερές τιμές σε καθορισμένες μεταβλητές, όπως:

- το πλάτος των τροχοδρόμων (X) και το ελάχιστο περιθώριο ασφάλειας (M), οι οποίες καθορίζονται από την κατηγορία του μεγαλύτερου διαδρόμου που εξυπηρετείται, και
- το μήκος αναφοράς (d) του αεροσκάφους και το πλάτος της βάσης του κύριου συστήματος τροχών (T), οι οποίες καθορίζονται από τον πιο απαιτητικό τύπο αεροσκάφους που εξυπηρετείται.

Το Σχήμα 3.21 έχει δημιουργηθεί για ένα συγκεκριμένο τύπο αεροσκάφους, του Boeing 747, σύμφωνα με τις ακόλουθες σταθερές τιμές όπως αυτές προτείνονται από το παράρτημα 14 της ICAO:

- Πλάτος τροχοδρόμων $X = 23$ m
- Ελάχιστο περιθώριο ασφάλειας $M = 4,5$ m

και λαμβάνοντας σαν οδηγό γραμμή τον άξονα του τροχοδρόμου. Ακόμα σημειώνεται ότι το σημείο αναφοράς του αεροσκάφους λαμβάνεται σαν εκείνο το σημείο το οποίο βρίσκεται κατακόρυφα κάτω από τον θάλαμο διακυβέρνησης αυτού. Οι ακόλουθες σταθερές τιμές συσχετίζονται με τον τύπο του αεροσκάφους:

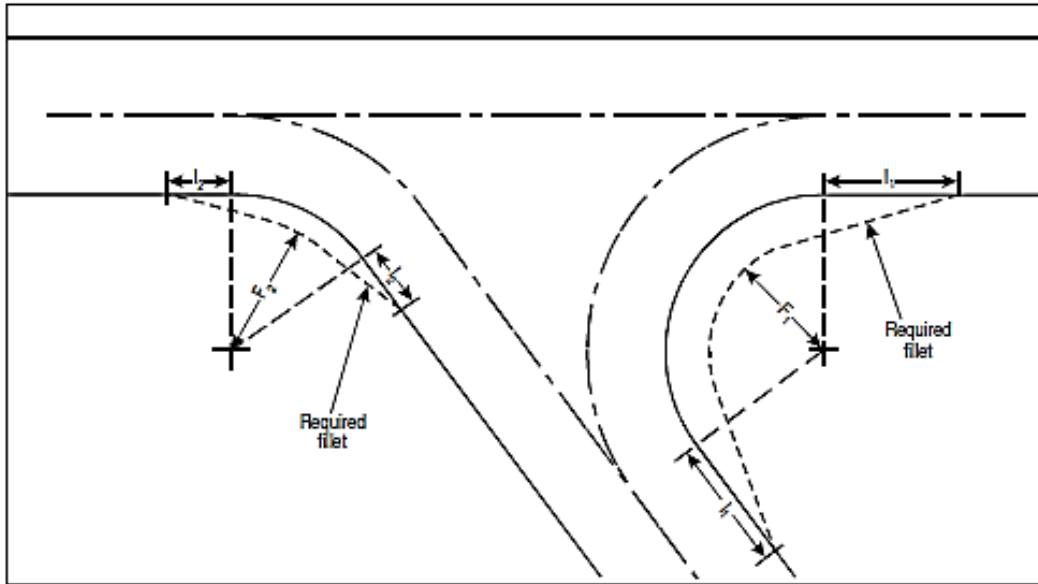
	B 747
Μήκος αναφοράς (d)	27,7 m
Πλάτος βάσης κύριου συστήματος τροχών (T)	12,8 m

Η σχεδίαση της καμπύλης συναρμογής καθορίζεται από τα παρακάτω βήματα:

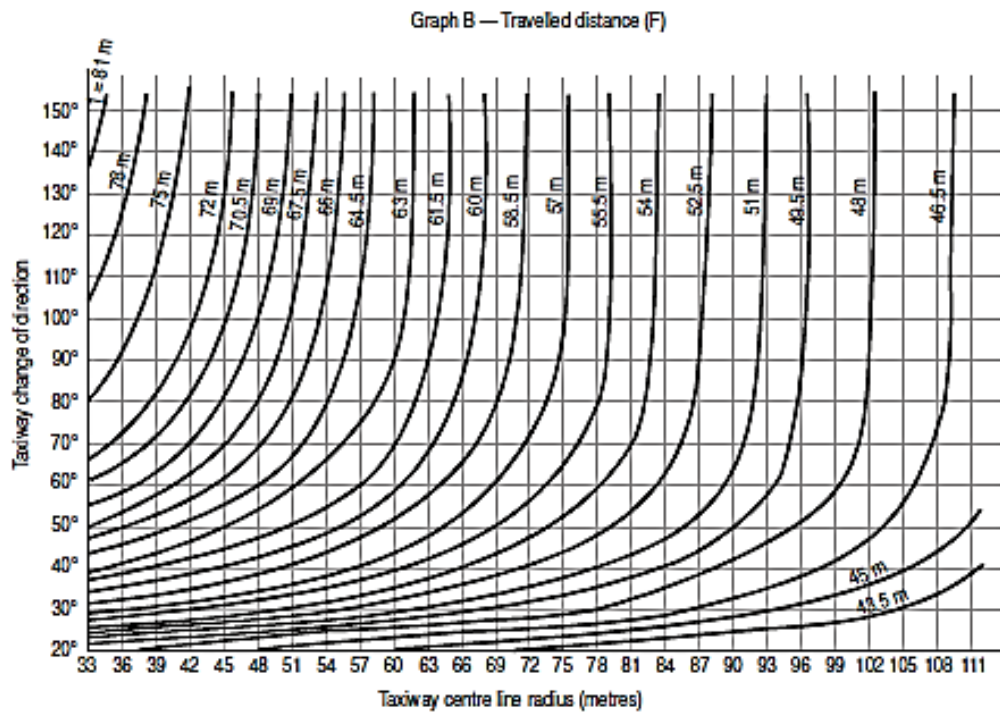
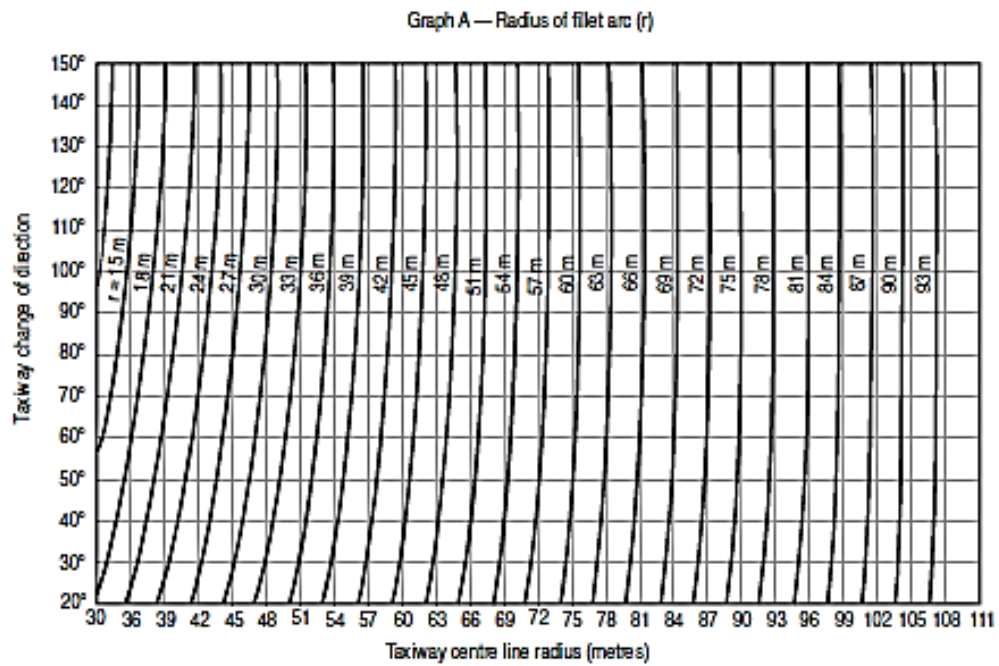
Βήμα 1. Αρχικά η ακτίνα του κυκλικού τόξου συναρμογής προσδιορίζεται από τον καθορισμό του σημείου που προκύπτει από το γράφημα A στο Σχήμα 3.21 και ανταποκρίνεται στη αλλαγή της διεύθυνσης του τροχοδρόμου και της ακτίνας του καμπύλου άξονα αυτού σε συμφωνία με το τύπο του αεροσκάφους. Η τιμή λαμβάνεται από παρεμβολή μεταξύ των καμπύλων των διαγραμμάτων που έχουν σχεδιαστεί για διάφορες τιμές της r και χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό ενός ομόκεντρου τόξου με αυτό της οδηγού γραμμής.

Βήμα 2. Η διανομένη απόσταση (F) από το σημείο, όπου η διαπλάτυνση δεν είναι απαραίτητη επιτυγχάνεται με τον ίδιο απλό τρόπο από το γράφημα B του Σχήματος 3.21 συναρτήσει του τύπου του αεροσκάφους. Αυτή είναι η απόσταση από το σημείο εκείνο όπου η εσωτερική οριογραμμή του τροχοδρόμου γίνεται και πάλι ευθύγραμμη.

Βήμα 3. Οι εφαπτόμενες του κυκλικού τόξου σχεδιάζονται έτσι ώστε να τέμνουν την οριογραμμή του τροχοδρόμου στο τέλος της διανυόμενης απόστασης (F). Η τελική γραμμή που προκύπτει είναι η απαιτούμενη καμπύλη συναρμογής (Σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.20 Λιάγραμμα διαπλάτυνσης τροχοδρόμου (ICAO 2005)



Σχήμα 3.21 Ταχεία μέθοδος γραφημάτων για το Boeing 747 (ICAO 2005)

3.5 Μέθοδος σχεδιασμού διαπλατύνσεων κατά FAA

3.5.1 Γενικά

Όπως έχει προαναφερθεί, ένας πιλότος αεροσκάφους αντιμετωπίζει την στροφή ενός τροχοδρόμου με δυο τρόπους:

- (α) Ακολουθώντας πιστά τον άξονα του τροχοδρόμου, παραμένοντας ο θάλαμος διακυβέρνησης πάνω από αυτόν, και
- (β) Με τροχιά η οποία επιλέγεται από τον πιλότο, η οποία συνήθως είναι παράλληλη με τον άξονα του τροχοδρόμου και μετατεθειμένη προς τα κυρτά της καμπύλης κατά απόσταση που επιλέγει ο ίδιος.

Από λειτουργικής άποψης, ο πρώτος τρόπος ελαττώνει την πιθανότητα παρέκκλισης από τον τροχοδρόμο. Από σχεδιαστικής άποψης, ο δεύτερος τρόπος παρουσιάζει την ελάχιστη απαίτηση διαπλάτυνσης του καταστρώματος στις συμβολές τροχοδρόμων.

Τα βασικά σχέδια για τους πιο κοινούς τύπους συμβόλων τροχοδρόμων σύμφωνα με το εγχειρίδιο Airport Design Standards – Transport Airports, Advisory Circular (FAA 2014) απεικονίζονται στο Σχήμα 3.22. Τα στοιχεία των μεταβλητών στα Σχήματα 3.22 και 3.23 λαμβάνονται συναρτήσει του αεροσκάφους σχεδιασμού.

Επισημαίνεται ότι αυτά τα σχέδια συμβόλων επίσης χρησιμοποιούνται για συμβολές μεταξύ τροχοδρόμου – δαπέδου στάθμευσης.

Περιορισμοί

Τα κριτήρια σχεδιασμού που περιγράφονται στα Σχήματα 3.5.1 και 3.5.2 είναι δυνατό να εφαρμοστούν σε συμβολές μεταξύ:

- i. Τροχοδρόμου – τροχοδρόμου
 - ii. Τροχοδρόμου – δαπέδου στάθμευσης
- αλλά όχι σε συμβολές διαδρόμου – τροχοδρόμου

3.5.2 Τεχνική ορολογία και Συμβολισμοί

Οι συμβολισμοί που ακολουθούν χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της τροχιάς της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους, καθώς και του σχεδιασμού της διαπλάτυνσης στις καμπύλες και τις συνδέσεις του τροχοδρομικού συστήματος ενός αεροδρομίου. Στα σχήματα 3.22 και 3.23 απεικονίζονται όλοι οι όροι και συμβολισμοί που αναφέρονται στη συγκεκριμένη ενότητα.

(α) *Γωνία A* : η γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στην οδηγό γραμμή με τον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους στο σημείο N (σημείο αναφοράς)

(1) Για την περίπτωση όπου $R < d$:

$$A = 2 \tan^{-1} [x * \tan (\tan^{-1} ((\tan(0,5 * A_o) - R/d) / x) + 28,648 * x * S/R) + R/d]$$

$$\text{όπου } x = (1 - (R/d)^2)^{0,5}$$

(2) Για $R = d$:

$$A = 2 \tan^{-1} [1/1/(\tan(0,5 * A_o) - 1) - 0,5 S/R) + 1]$$

(3) Για $R > d$:

$$A = 2 \tan^{-1} [y (2 / (1 - z) - 1) + R/d]$$

$$\text{όπου } y = (R/d)^2 - 1)^{0,5}$$

$$\text{και } z = 2,7183^{y * S/R} (R/d + y - \tan(0,5 * A_o)) / (R/d - y - \tan(0,5 * A_o))$$

(4) Για το τμήμα της εφαπτομένης:

$$A = 2 \tan^{-1} [\tan(0,5 * A_t) / 2,7183^{S/d}]$$

(β) *Γωνία A_{max}* : η γωνία A, όταν το σημείο N βρίσκεται στο σημείο επαφής ή αλλαγής καμπυλότητας P.C.C (Point of Change of Curvature). Στο τέλος μιας μεγάλης καμπύλης:

$$A_{max} = \sin^{-1} (d/R)$$

(γ) *Γωνία A_o* : η γωνία A, όταν το σημείο N βρίσκεται στο σημείο καμπυλότητας. Η τιμή της γωνίας A_o μετά το τέλος μιας μεγάλης ευθυγραμμίας είναι 0° .

(δ) *Γωνία A_t* : η γωνία A, όταν το σημείο N βρίσκεται στο αρχικό σημείο της ευθυγραμμίας P.T. (Point of Tangency)

- (ε) *Γωνία οδήγησης ρινιαίου τροχού B* : η γωνία που σχηματίζει ο ρινιαίος τροχός με τον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους.

Σημείωση: Στο σχεδιασμό διαπλάτυνσης καταστρώματος τροχοδρόμου, πρέπει να ελέγχεται ότι η γωνία οδήγησης του ρινιαίου τροχού δεν υπερβαίνει τις 50 μοίρες. Αν αυτό το όριο ξεπεραστεί, είναι αναγκαίο να επιλεγεί μια μεγαλύτερη ακτίνα (R) κυκλικής τροχιάς.

$$B = \tan^{-1} [(w/d) \tan A]$$

$$B_{\max} = \tan^{-1} [(w/d) \tan A_{\max}]$$

- (στ) *Μήκος αναφοράς αεροσκάφους (d)* : απόσταση μεταξύ του σημείου αναφοράς και του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους.
- (ζ) *Ακτίνα τόξου συναρμογής (F)* : η ακτίνα του τόξου της διαπλάτυνσης, μετρημένη από το κέντρο (0) της καμπύλης του άξονα του τροχοδρόμου. Προκειμένου να παρέχεται ένα αποδεκτό περιθώριο ασφαλείας M, πρέπει να ισχύει:

$$F \leq (R^2 + d^2 - 2 \cdot R \cdot d \cdot \sin A_{\max})^{0.5} - 0,5 \cdot u - M$$

- (η) *Μήκος (L)* : η απόσταση από το αρχικό σημείο της ευθυγραμμίας P.T. μέχρι το τέλος της διαπλάτυνσης. Προκειμένου να παρέχεται ένα αποδεκτό περιθώριο ασφαλείας M, πρέπει να ισχύει:

$$L = d * \{ \ln[4 \cdot d * \tan(0,5 \cdot A_t) / (W - u - 2 \cdot M)] \} - d$$

- (θ) *Περιθώριο ασφαλείας από την οριογραμμή του τροχοδρόμου (M)* : η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του εξώτατου τροχού του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους και της οριογραμμής του τροχοδρόμου.
- (ι) *Σημείο αναφοράς (N)* : το σημείο κάτω από τον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους, το οποίο ακολουθεί την καθοδηγητική γραμμή του καταστρώματος. Το σημείο αναφοράς, ανάλογα με τον τρόπο που αντιμετωπίζει ο χειριστής του αεροσκάφους μια στροφή, τοποθετείται:

- (1) Όταν ο θάλαμος διακυβέρνησης βρίσκεται πάνω από την αξονική τροχιά του τροχοδρόμου, το σημείο αναφοράς N τοποθετείται ακριβώς κάτω από το θάλαμο διακυβέρνησης.
- (2) Όταν η τροχιά επιλέγεται από τον πιλότο, το σημείο αναφοράς N τοποθετείται ακριβώς κάτω από τον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους και σε απόσταση από το κέντρο της βάσης του κύριου συστήματος τροχών του που υπολογίζεται ως εξής:

- Σχεδίαση διαπλάτυνσης μόνο στην εσωτερική οριογραμμή:

$$d = (R^2 - (R + 0,5*W - 2*M)^2 + w^2)^{0,5}$$

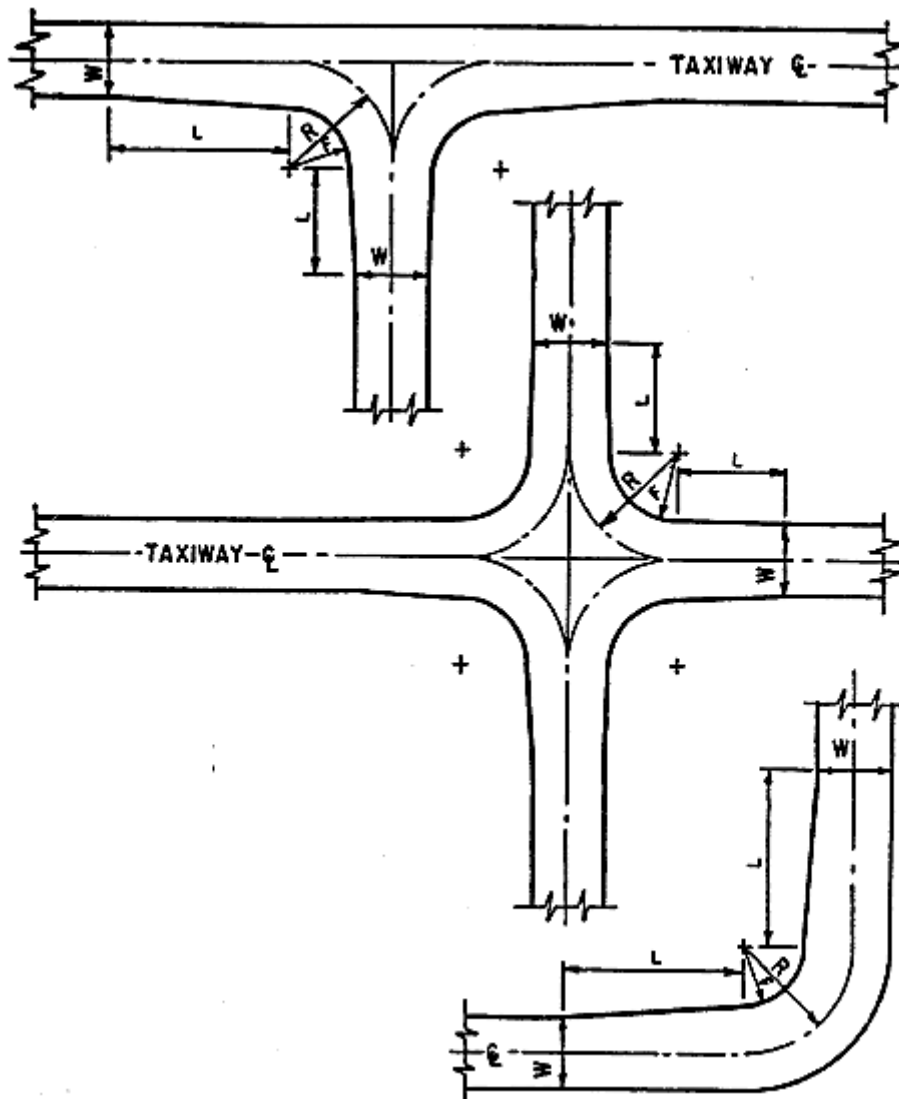
- Συμμετρική σχεδίαση διαπλάτυνσης:

$$d = (R^2 - (2*R - F - 2*M)^2 + w^2)^{0,5}$$

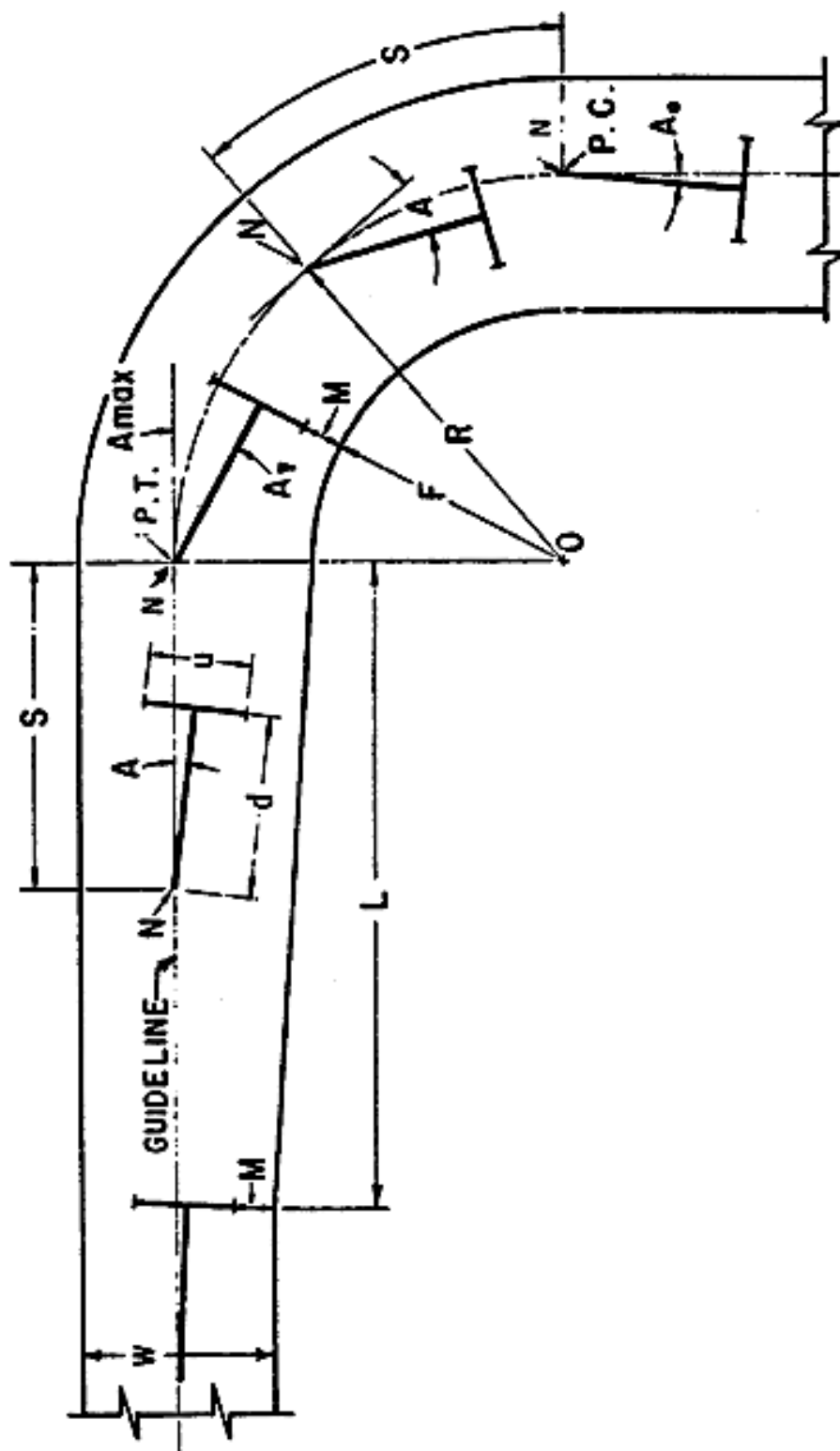
Σημείωση: Οι παραπάνω αποστάσεις παρέχουν μία αποδεκτή τιμή του περιθωρίου ασφαλείας M, τέτοιο ώστε να εξουδετερώσει την έλλειψη καλής καθοδήγησης από τον πιλότο.

- (κ) *Ακτίνα κυκλικού τόξου (R)* : η ακτίνα του κυκλικού τόξου στο σημείο N μετρημένη από το κέντρο (O) της καμπύλης τροχοδρόμου μέχρι το σημείο N.
- (λ) *Απόσταση (S)* : το μήκος αυτό ορίζεται ξεχωριστά για την καμπύλη και για την ευθύγραμμη τροχιά. Δηλαδή :
 - Το μήκος από το αρχικό σημείο της κυκλικής τροχιάς P.C. (Point of Curvature) μέχρι το σημείο αναφοράς N κατά μήκος της καμπύλης για κυκλικούς τομείς, και
 - Το μήκος από το αρχικό σημείο της ευθύγραμμη τροχιάς P.T. (Point of Tangency) μέχρι το σημείο αναφοράς N κατά μήκος της ευθυγραμμίας για ευθύγραμμους τομείς.
- (μ) *Πλάτος βάσης κύριου συστήματος τροχών (u)* : η απόσταση μεταξύ των ακρότατων τροχών του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους, συμπεριλαμβανομένου του πλάτους των τροχών.
- (ν) *Απόσταση (w)* : η απόσταση του ρινιαίου τροχού από το κέντρο της βάσης του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους.
- (ξ) *Πλάτος τροχοδρόμου (W)* : το πλάτος καταστρώματος του τροχοδρόμου στην ευθυγραμμία. Το πλάτος του τροχοδρόμου πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα του πλάτους (u) της βάσης του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους συν δυο φορές το αποδεκτό περιθώριο ασφαλείας M. Δηλαδή πρέπει πάντα να ισχύει:

$$W > u + (2 * M)$$



Σχήμα 3.22 Παραδείγματα συμβολών τροχοδρόμων (FAA 2014)



Σχήμα 3.23 Απεικόνιση συμβολισμών διαπλάτωσης (FAA 2014)

3.5.3 Σχεδιασμός διαπλάτυνσης τροχοδρόμου

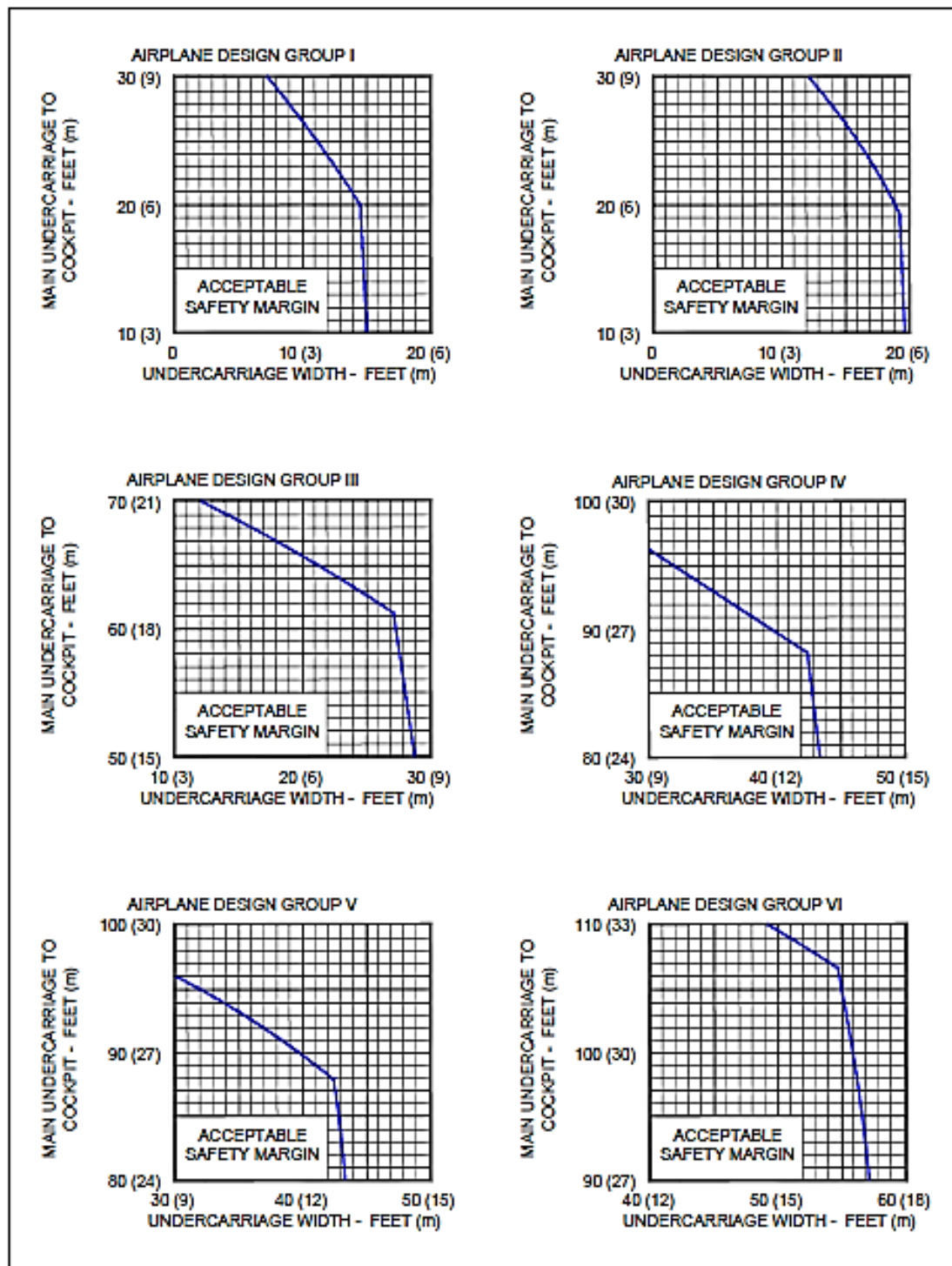
Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η μεθοδολογία για το σχεδιασμό διαπλάτυσεων τροχοδρόμων αεροδρομίου, όπως προτείνεται από το τεύχος «Airport Design Standards – Transport Airports» AC: 150/5300-13 (29-9-89).

Ο τρόπος σχεδίασης της διαπλάτυνσης ενός τροχοδρόμου βασίζεται στις απαιτήσεις των χρηστών (χειριστές αεροσκάφους) του αεροδρομίου. Οι αρχές ενός αεροδρομίου, πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τους δύο τρόπους αντιμετώπισης μιας στροφής από τον πιλότο.

Σχεδιασμός της διαπλάτυνσης με την βοήθεια διαγραμμμάτων

Στο Σχήμα 3.24 απεικονίζονται τα σχέδια διαπλάτυνσης τροχοδρόμου τα οποία παρέχουν αποδεκτό περιθώριο ασφάλειας οριογραμμής τροχοδρόμου συναρτήσει του μήκους αναφοράς (d) και του πλάτους (u) της βάσης κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους.

Σε περίπτωση που δεν διασφαλίζεται το ελάχιστο περιθώριο ασφάλειας τροχοδρόμου, με μια δεδομένη διαπλάτυνση του, ή όταν οι περιορισμοί χώρου απαιτούν διαφορετική από την συνιστώμενη ακτίνα καμπύλης τροχοδρόμου, η διαπλάτυνση του τροχοδρόμου κρίνεται αναγκαίο να σχεδιάζεται με την αναλυτική μέθοδο που παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.24 Αποδεκτές τιμές περιθωρίου ασφαλείας (M), όταν ο ριναίος τροχός ακολουθεί τον άξονα του τροχοδρόμου (FAA 2014)

Αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού διαπλάτυνσης τροχοδρόμου

Η μεθοδολογία που θα αναλυθεί ανταποκρίνεται εξίσου και στους δύο τρόπους αντιμετώπισης μίας στροφής από τον χειριστή του αεροσκάφους. Οι όροι και τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στις μαθηματικές σχέσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.23. Στη συνέχεια θα γίνει εφαρμογή της μεθοδολογίας για τους δύο αυτούς τρόπους αντιμετώπισης.

Παράδειγμα Α

Καθορισμός διαπλάτυνσης, λαμβάνοντας ως τροχιά του ρινιαίου τροχού αυτή που εκτιμάται από τον χειριστή του αεροσκάφους.

Δεδομένα : Έστω αεροσκάφος με άνοιγμα φτερών 59,7 m (196 ft), απόσταση μεταξύ ρινιαίου τροχού και κέντρου βάσης κυρίου συστήματος τροχών $w = 25,6$ m (84 ft) , πλάτος κυρίου συστήματος τροχών αεροσκάφους $u = 12,5$ m (41 ft), και ακτίνα κυκλικής τροχιάς $R = 45$ m (150 ft) για γωνία στροφής 180° . Το πλάτος του τροχοδρόμου είναι $W = 23$ m (75 ft), η ακτίνα διαπλάτυνσης $F = 29$ m (97 ft) για την περίπτωση διαπλάτυνσης μόνο στην εσωτερική οριογραμμή και το μήκος εφαπτομένου τμήματος $L = 75$ m (250 ft).

Από την τιμή του ανοίγματος φτερών του αεροσκάφους, προκύπτει κατάταξη του τροχοδρόμου στην κατηγορία V (Πίνακας 2.3).

Για τον καθορισμό της διαπλάτυνσης ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Βήμα 1.* Για την κατηγορία V προκύπτει αντίστοιχα ελάχιστο αποδεκτό περιθώριο ασφαλείας $M = 4,5$ m.
- Βήμα 2.* Από το μήκος $d = (R^2 - (R + 0,5*W - 2*M)^2 + w^2)^{0,5} = 20,59$ m, υπολογίζεται η μέγιστη γωνία $A_{max} = 27,2^\circ$.
- Βήμα 3.* Υπολογίζεται η μέγιστη γωνία οδήγησης ρινιαίου τροχού $B_{max} = 32,6^\circ$.
- Βήμα 4.* Υπολογίζεται το παρεχόμενο περιθώριο ασφαλείας $M = 4,8$ m

Παράδειγμα Β

Καθορισμός διαπλάτυνσης λαμβάνοντας ως τροχιά του ρινιαίου τροχού την αξονική τροχιά του τροχοδρόμου.

Δεδομένα : Έστω αεροσκάφος με άνοιγμα φτερών 59,7 m (196ft), απόσταση μεταξύ ρινιαίου τροχού και κέντρου βάσης κυρίου συστήματος τροχών $w = 25,6$ m (84 ft), πλάτος κυρίου συστήματος τροχών αεροσκάφους $u = 12,5$ m (41ft), και ακτίνα κυκλικής τροχιάς $R = 45$ m (150 ft) για στροφή 180° . Το πλάτος του τροχοδρόμου $W = 23$ m (75 ft) και το μήκος αναφοράς του αεροσκάφους $d = 27,4$ m (90 ft)

Από την τιμή του ανοίγματος φτερών του αεροσκάφους, προκύπτει κατάταξη του τροχοδρόμου στην κατηγορία V (Πίνακας 2.3).

Για τον καθορισμό της διαπλάτυνσης ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Βήμα 1.* Για την κατηγορία V προκύπτει αντίστοιχα ελάχιστο αποδεκτό περιθώριο ασφαλείας $M = 4,5$ m.
- Βήμα 2.* Υπολογίζεται η μέγιστη γωνία $A_{\max} = 36,4^\circ$.
- Βήμα 3.* Υπολογίζεται η μέγιστη γωνία οδήγησης ρινιαίου τροχού $B_{\max} = 35,1^\circ$.
- Βήμα 4.* Υπολογίζεται η μέγιστη ακτίνα διαπλάτυνσης $F_{\max} = 25,2$ m
- Βήμα 5.* Υπολογίζεται το ελάχιστο μήκος επαπτομένου τμήματος $L_{\min} = 60,2$ m

3.6 Εφαρμογή μεθοδολογίας

Στη συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιείται εφαρμογή των μεθόδων που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια μέσω παραδειγμάτων με κοινά δεδομένα, προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων και των αποτελεσμάτων τους.

Τα παραδείγματα που ακολουθούν πραγματοποιήθηκαν για την κίνηση ενός αεροσκάφους τύπου Airbus 321 κατά μήκος μίας στροφής ακτίνας $R = 35$ m και για αλλαγή διεύθυνσης τροχοδρόμου 90° .

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του αεροσκάφους που θα χρειαστούν για την ανάπτυξη των μεθόδων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος αεροσκάφους	A 321
Μήκος αναφοράς αεροσκάφους (d)	16.9 m
Πλάτος βάσης κύριου συστήματος τροχών (T)	8.95 m
Άνοιγμα φτερών (WS)	35.8 m
Μέγιστη γωνία στροφής ρινιαίου τροχού	75°

Επομένως από τον τύπο του αεροσκάφους προκύπτουν τα εξής χαρακτηριστικά του τροχοδρόμου:

Τύπος αεροσκάφους	A 321
Κατηγορία τροχοδρόμου (ICAO)	C
Κατηγορία τροχοδρόμου (FAA)	III
Πλάτος τροχοδρόμου	15 m
Ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας	3 m

Τελικά τα δεδομένα που απαιτούνται για την ανάπτυξη των διαφορετικών μεθόδων σχεδιασμού διαπλατύνσεων παρουσιάζονται παρακάτω:

	Δεδομένα
Αλλαγή διεύθυνσης τροχοδρόμου	90°
Ακτίνα άξονα τροχοδρόμου (R)	35 m
Πλάτος τροχοδρόμου (X)	15 m
Μήκος αναφοράς αεροσκάφους (d)	16.9 m
Πλάτος βάσης κύριου συστήματος τροχών (T)	8.95 m
Ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας (M)	3 m

3.6.1 Γραφική μέθοδος

Αρχικά υπολογίζεται η τιμή της αναλογίας $(R/d) = 35/16.9 = 2$

Βήμα 1. Από το Σχήμα 3.8 για $(R/d) = 2$, προκύπτει ότι:

(α) Η τιμή της πολικής γωνίας θ_s του σημείου αναφοράς (S) στην αρχή της στροφής, που αντιστοιχεί σε γωνία οδήγησης $\beta=0$ είναι $\theta_s = 43^\circ$.

(β) Η τιμή της απόκλισης του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών η οποία εκφράζεται σαν δεκαδικό μέρος του μήκους αναφοράς του αεροσκάφους είναι 0,235. Στη συνέχεια προκειμένου να καλύψουμε την αλλαγή διεύθυνσης τροχοδρόμων κατά 90° δημιουργούμε ένα πίνακα τιμών πολικής γωνίας με βήμα αύξησης 20° . Στον πίνακα αυτόν εμφανίζονται αντίστοιχα τα μεγέθη (λ / d) και β .

θ_s	$\frac{\lambda}{d}$	β
43°	+0.235	0
60°	+0.03	13°
80°	-0.11	21°
100°	-0.19	25°
120°	-0.22	27°
133°	-0.24	28°

Βήμα 2. Προκειμένου να καλυφθεί, η περίπτωση της κίνησης του αεροσκάφους στο ευθύγραμμο τμήμα του τροχοδρόμου, στο οποίο ισχύει τιμή της γωνίας οδήγησης 28° , λαμβάνονται από το Σχήμα 3.7 τιμές της αναλογίας λ/d με αρχική την τιμή $\lambda / d = \sin 28^\circ = 0,47$, που αντιστοιχεί σε μηδενικό διανυόμενο διάστημα. Ως βήμα μεταβολής της απόκλισης επιλέγεται η τιμή 0,10. Έτσι προκύπτει ο επόμενος πίνακας:

$\frac{\lambda}{d}$	0.47	0.35	0.25	0.15	0.10	0.05
$\frac{F}{d}$	0	0.34	0.69	1.21	1.62	2.31

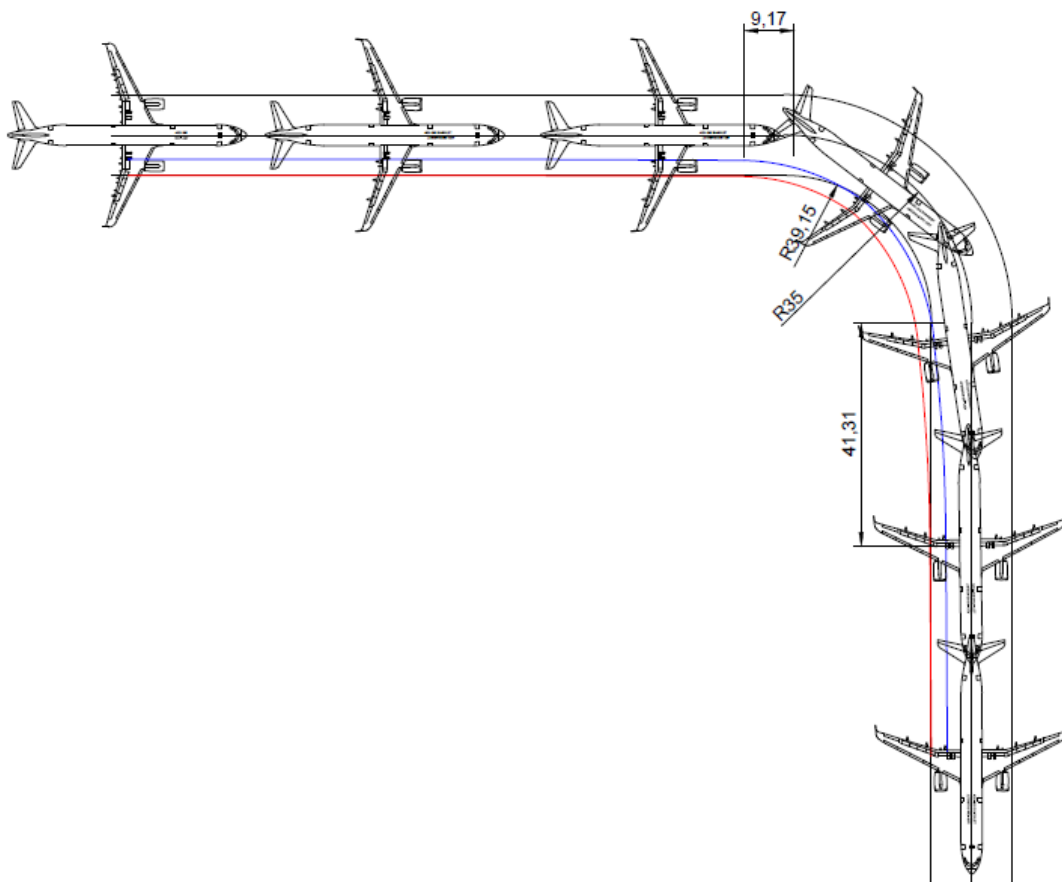
Βήμα 3. Η σχεδίαση των καμπυλών επιτυγχάνεται ως εξής:

(α) Αρχικά σχεδιάζεται η γραμμή αναφοράς (Σχήμα 3.25)

(β) Για κάθε τιμή της πολικής γωνίας θ_s του Βήματος 1, σχεδιάζεται το αντίστοιχο σημείο U . Για αυτό, τοποθετείται το σημείο S στην οδηγό γραμμή, σχεδιάζοντας τον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους με την αντίστοιχη γωνία οδήγησης β και σημειώνεται το σημείο U σε απόσταση $d=16,9$ m από το σημείο S . Χρησιμοποιώντας τις τιμές του πηλίκου λ/d του Βήματος 1, ελέγχουμε την ακρίβεια σχεδίασης.

(γ) Όπου το σημείο αναφοράς (S) επανέρχεται σε ευθύγραμμη τροχιά μετά το πέρας της στροφής, χρησιμοποιούμε τις τιμές των αναλογιών λ/d και F/d του Βήματος 2, σχεδιάζοντας την θέση του κέντρου (U) της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών.

(δ) Στην κάθετο που άγεται από το σημείο U στον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους λαμβάνεται απόσταση ίση με $(T/2+M) = (4,475+3) = 7,925\text{m}$ προς τα κοίλα της τροχιάς, για κάθε επιλεγμένο σημείο U . Η γραμμή που ορίζεται από τα προηγούμενα σημεία είναι μια καμπύλη παράλληλη στην τροχιά του κέντρου της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών. Αυτό είναι το θεωρητικά ελάχιστο όριο για τον σχεδιασμό της διαπλάτυνσης.



Σχήμα 3.25 Γραφική μέθοδος σχεδιασμού διαπλάτυνσεων - Παράδειγμα

3.6.2 Μέθοδος τόξου και εφαπτομένης

Αρχικά υπολογίζεται η τιμή της αναλογίας $(R/d) = 35/16.9 = 2$

Η μέγιστη απόκλιση από το Σχήμα 3.3.8 ανέρχεται σε ποσοστό 24 % του μήκους αναφοράς d άρα προκύπτει $\lambda_{\max} = 4$ m.

Η ακτίνα r του τόξου της καμπύλης συναρμογής υπολογίζεται ως εξής:

$$r = R - (\lambda_{\max} + M + T/2) = 35 - (4 + 3 + 4,475) = 23,525 \text{ m}$$

Η μέγιστη απόκλιση χωρίς καμπύλη συναρμογής προκύπτει από την σχέση:

$$\lambda = X/2 - (M + T/2) = 7,5 - (3 + 4,475) = 0,025 \text{ m}$$

Από το Σχήμα 3.11 για το δεδομένο μήκος αναφοράς και την μέγιστη απόκλιση χωρίς την εφαρμογή της συναρμογής, προκύπτει γωνία οδήγησης $0,1^\circ$.

Από το Σχήμα 3.12 σύμφωνα με την αλλαγή διεύθυνσης του τροχοδρόμου και την αναλογία R/d προκύπτει αύξηση της γωνίας οδήγησης σε 28° .

Οι παραπάνω γωνίες οδήγησης μετατρέπονται σε διανυόμενες αποστάσεις από το σημείο αναφοράς του αεροσκάφους κατά μήκος του ευθύγραμμου άξονα του τροχοδρόμου χρησιμοποιώντας το Σχήμα 3.13 και προκύπτει ότι:

- για γωνία οδήγησης 0° αντιστοιχεί απόσταση $L_1 = 6,55 \cdot 16,9 = 110$ m
- για γωνία οδήγησης 28° αντιστοιχεί απόσταση $L_2 = 14$ m

Η διαφορά των παραπάνω αποστάσεων δίνουν την απόσταση L_3 η οποία είναι η διανυόμενη απόσταση του σημείου αναφοράς κατά την μείωση της γωνίας οδήγησης από 28° σε 0° .

$$L_3 = L_1 - L_2 = 110 - 14 = 96 \text{ m}$$

Η απόσταση του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών είναι πέρα από το τέλος της καμπύλης και υπολογίζεται από την διαφορά του μήκους αναφοράς και της απόστασης L_3 . ($96 - 16,9 = 79,1$ m)

Για τον προσδιορισμό του δεύτερου σημείου της καμπύλης συναρμογής απαιτείται επανεκτέλεση των υπολογισμών λαμβάνοντας μειωμένη τιμή του περιθωρίου ασφαλείας.

Τα παρακάτω βήματα παραμένουν αμετάβλητα:

Η αναλογία $R/d = 35/16.9 = 2$

Η μέγιστη απόκλιση $\lambda_{\max} = 4$ m

Η γωνία οδήγησης στο τέλος της καμπύλης $= 28^\circ$

Η απόσταση αναφοράς που αντιστοιχεί σε γωνία οδήγησης 28° $L_2 = 14$ m

Στη συνέχεια επιλέγεται νέα μειωμένη τιμή για το περιθώριο ασφαλείας $M_1 = 1,5$ m

Η μέγιστη απόκλιση χωρίς καμπύλη συναρμογής προκύπτει από την σχέση:

$$\lambda = X / 2 - (M + T / 2) = 7,5 - (1,5 + 4,475) = 1,525 \text{ m}$$

Από το Σχήμα 3.11 για το δεδομένο μήκος αναφοράς και την μέγιστη απόκλιση χωρίς την εφαρμογή της συναρμογής, προκύπτει γωνία οδήγησης 5° που μετατρέπεται από το Σχήμα 3.13 σε απόσταση αναφοράς $L_1 = 43$ m. Από την διαφορά των L_1 και L_2 , προκύπτει η διανυόμενη απόσταση του σημείου αναφοράς κατά την μείωση της γωνίας οδήγησης από 28° σε 5° .

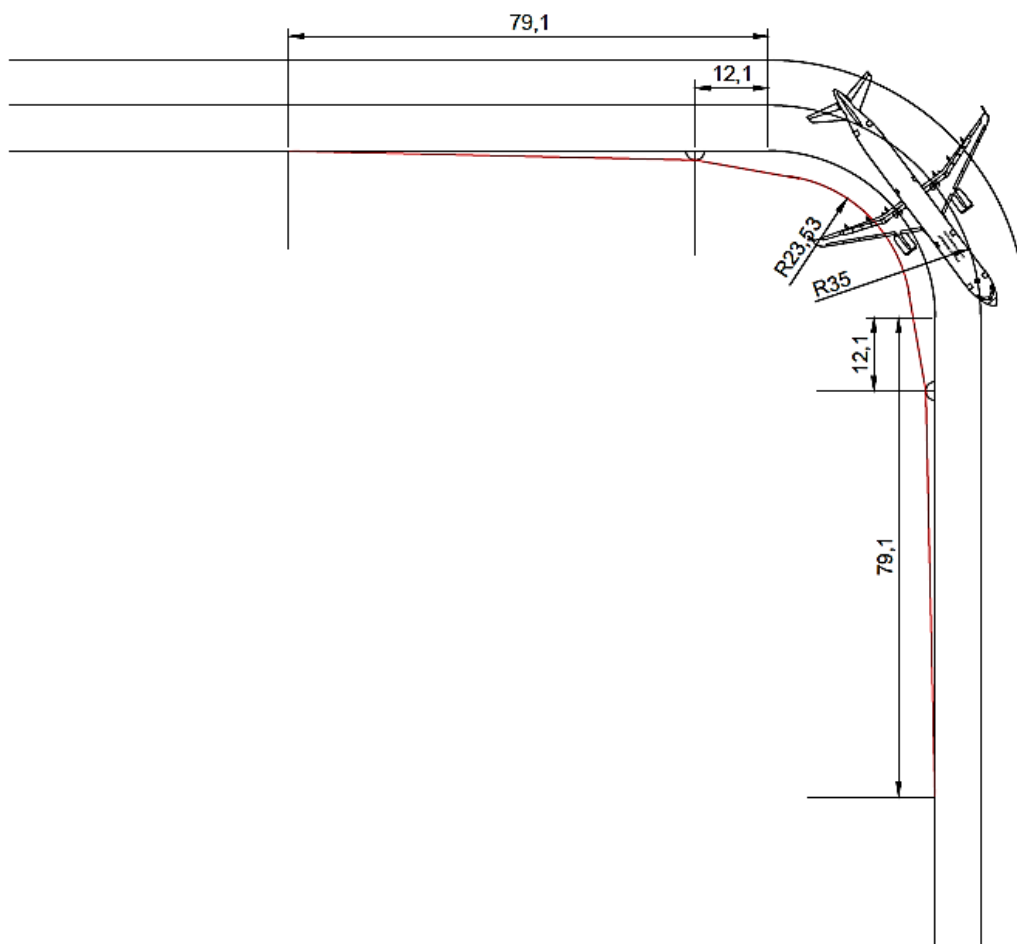
$$L_3 = L_1 - L_2 = 43 - 14 = 29 \text{ m}$$

Η απόσταση του κέντρου της βάσης του κύριου συστήματος τροχών είναι πέρα από το τέλος της καμπύλης και υπολογίζεται από την διαφορά του μήκους αναφοράς και της απόστασης L_3 . ($29 - 16,9 = 12,1$ m)

Σε αυτό το σημείο παρέχεται ένα περιθώριο ασφαλείας 1,5 m. Εφόσον απαιτούνται τουλάχιστον 3 m, η τελική διαπλάτυση θα πρέπει να διέρχεται σε απόσταση 1,5 m εσωτερικά του σημείου.

Τελικά η σχεδίαση της καμπύλης συναρμογής προκύπτει ως εξής (Σχήμα 3.26):

- Βήμα 1.* Σχεδιάζεται τόξο ομόκεντρο του άξονα του τροχοδρόμου και ακτίνας 23,525 m.
- Βήμα 2.* Σημειώνονται σημεία πάνω στην εσωτερική οριογραμμή του τροχοδρόμου και σε απόσταση 12,1 m πέρα από το τέλος της καμπύλης.
- Βήμα 3.* Σχεδιάζονται τόξα με κέντρα τα σημεία του βήματος 2 και ακτίνας 1,5 m.
- Βήμα 4.* Σχεδιάζονται οι κοινές εφαπτόμενες στο τόξο συναρμογής από τα σημεία των βημάτων 1 και 3.
- Βήμα 5.* Σημειώνονται σημεία πάνω στην εσωτερική οριογραμμή του τροχοδρόμου και σε απόσταση 79,1 m πέρα από το τέλος της καμπύλης.
- Βήμα 6.* Σχεδιάζονται οι εφαπτόμενες στα τόξα του βήματος 3 από τα σημεία του βήματος 5.

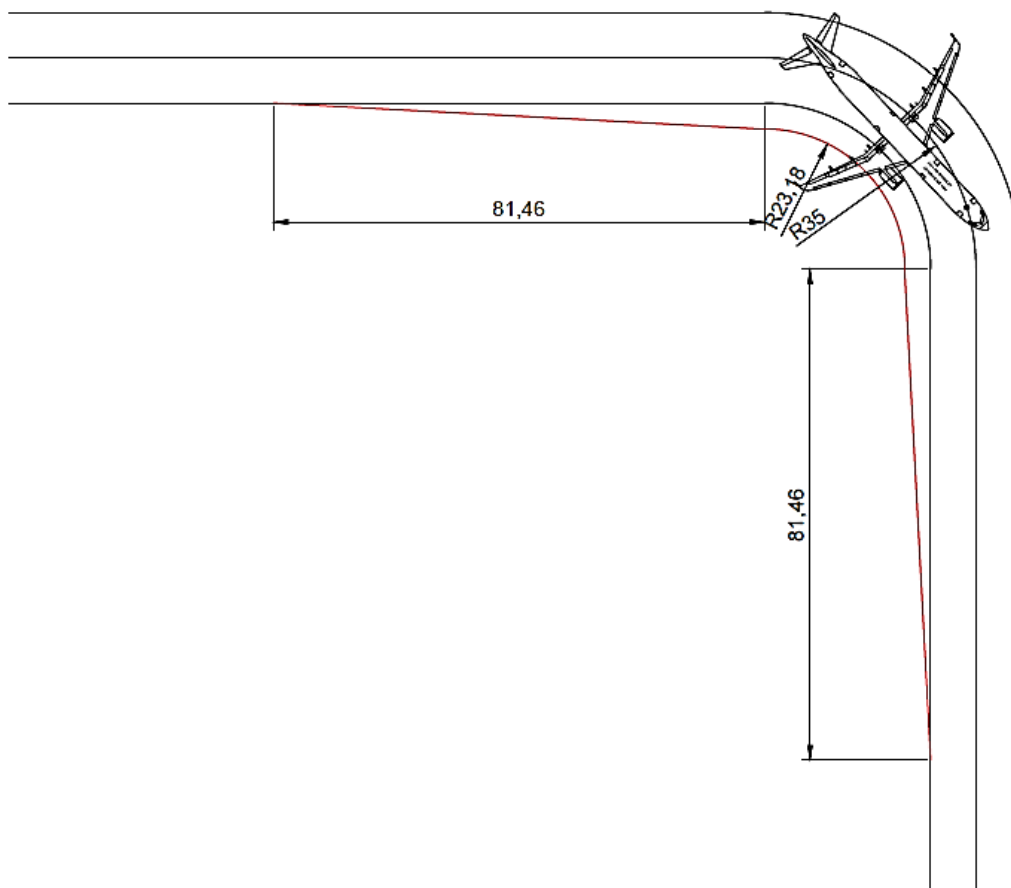


Σχήμα 3.26 Μέθοδος τόξου και εφαπτομένης - Παράδειγμα

3.6.3 Μέθοδος σχεδιασμού διαπλάτυνσεων κατά FAA

Για τον καθορισμό της διαπλάτυνσης (Σχήμα 3.27) ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Βήμα 1.* Υπολογίζεται η μέγιστη γωνία $A_{\max} = \sin^{-1}(d/R) = 28,87^\circ$
- Βήμα 2.* Υπολογίζεται η μέγιστη γωνία οδήγησης ριναίου τροχού
 $B_{\max} = \tan^{-1} [(w/d) \tan A_{\max}] = 27,58^\circ$
- Βήμα 3.* Υπολογίζεται η μέγιστη ακτίνα διαπλάτυνσης
 $F_{\max} = (R^2 + d^2 - 2 \cdot R \cdot d \cdot \sin A_{\max})^{0,5} - 0,5 \cdot u - M = 23,18 \text{ m}$
- Βήμα 4.* Υπολογίζεται το ελάχιστο μήκος εφαπτομένου τμήματος
 $L_{\min} = d \cdot \{ \ln[4 \cdot d \cdot \tan(0,5 \cdot A_t) / (W - u - 2 \cdot M)] \} - d = 81,46 \text{ m}$
 Όπου $A_t = 28^\circ$

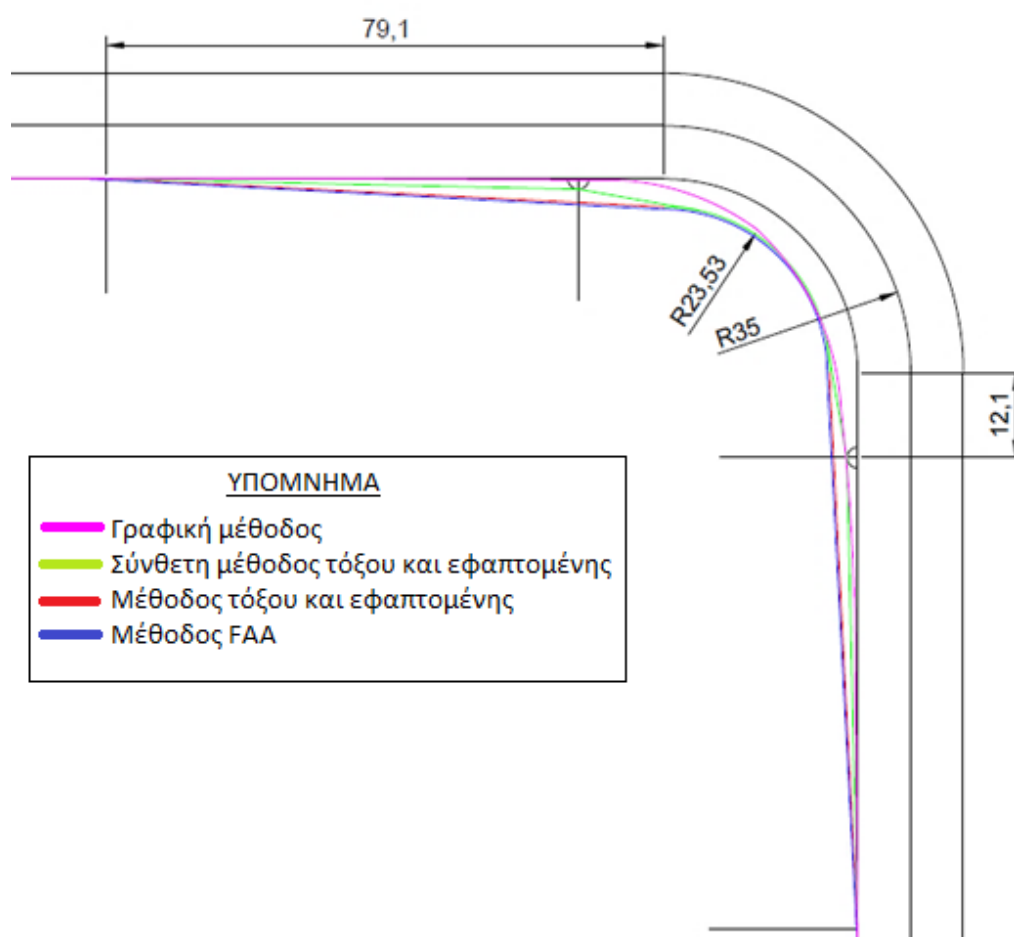


Σχήμα 3.27 Μέθοδος σχεδιασμού διαπλάτυνσεων κατά FAA - Παράδειγμα

3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Από την εφαρμογή της μεθοδολογίας που προηγήθηκε και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διαφορετικές μεθόδους σχεδιασμού, συμπεραίνεται ότι η μέθοδος τόξου και εφαπτομένης (κόκκινη γραμμή) καθώς και η μέθοδος σχεδιασμού κατά FAA (μπλε γραμμή) εμφανίζουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος της FAA καταλήγει σε ελαφρώς μικρότερη ακτίνα διαπλάτυνσης, αλλά σε μεγαλύτερο μήκος εφαπτομένης στο τόξο της διαπλάτυνσης.

Από το Σχήμα 3.28 φαίνεται ακόμα ότι η γραφική μέθοδος (ροζ γραμμή) παρέχει το μικρότερο μήκος συναρμογής με αποτέλεσμα να κρίνεται η πλέον συμφέρουσα οικονομικά λύση, αλλά από την άλλη πλευρά οι μέθοδοι που αποτελούνται από τόξα και ευθύγραμμα τμήματα (πράσινη γραμμή) είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμες και παρέχουν μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας από την οριογραμμή του τροχοδρόμου, γεγονός το οποίο θεωρείται υπέρ της ασφαλείας.



Σχήμα 3.28 Σύνοψη αποτελεσμάτων

4. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ AIRCRAFT TURN – ATR

4.1 Γενικά

Στην παρούσα ενότητα γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας που αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, με στόχο την μελέτη της κίνησης ενός αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα ενός αεροδρομίου μετά την προσγείωσή του στον διάδρομο με κατεύθυνση τα δάπεδα στάθμευσης, και αντίστροφα.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (Aircraft Turn-ATR) σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran που υπολογίζει την τροχιά του αεροσκάφους και αναπαριστά την κίνησή του στο τροχοδρομικό σύστημα, εμφανίζοντας τα αποτελέσματα στο σχεδιαστικό περιβάλλον του AutoCAD.

Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα αεροδρόμια, δεδομένου ότι εισάγονται από τον χρήστη το μοντέλο εδάφους της περιοχής και οι συντεταγμένες των σημείων, καθώς και για όλους τους τύπους αεροσκαφών που εξυπηρετεί το αεροδρόμιο. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται εφαρμογή του προγράμματος για το αεροδρόμιο της Σαντορίνης και για τους εξής τύπους αεροσκαφών: A319, A320, A321 και A380 της κατασκευάστριας εταιρείας Airbus και B737, B747, B757, B767 της Boeing. Η επιλογή των συγκεκριμένων αεροσκαφών έγινε με βάση τους πιο διαδεδομένους τύπους αεροσκαφών που εξυπηρετούνται συχνότερα σε αεροδρόμια. Πιο συγκεκριμένα, από τα στοιχεία του κρατικού αερολιμένα της Σαντορίνης, προέκυψε ότι εξυπηρετεί κυρίως τον στόλο της αεροπορικής εταιρείας Aegean Airlines, ο οποίος απαρτίζεται από τα αεροσκάφη A319, A320 και A321. Επιπλέον, για να καλυφθεί ένα ευρύτερο φάσμα τύπων αεροσκαφών, συλλέχθηκαν στοιχεία κίνησης αεροσκαφών παγκοσμίως και ύστερα από στατιστική επεξεργασία προέκυψε ότι περισσότερες πτήσεις εκτελούν οι τύποι B747, B757 και B767. Τέλος, προκειμένου να ελεγχθεί και η περίπτωση των μεγάλων αεροσκαφών, προστέθηκαν στη μελέτη και τα αεροσκάφη τύπου A380 και B747. Σημειώνεται ότι η μέθοδος προσδιορισμού της κίνησης του αεροσκάφους είναι η γραφική, η απόκλιση της οποίας από τη μαθηματική μέθοδο είναι αμελητέα για επιλογή μικρού βήματος κίνησης του αεροσκάφους.

4.2 Δεδομένα προγράμματος

Αρχικά ο χρήστης ετοιμάζει την τροχιά που ακολουθεί το αεροσκάφος, η οποία ταυτίζεται με τον άξονα του τροχοδρόμου. Το πρόγραμμα διαβάζει τις κορυφές της οριζοντιογραφίας και τις ακτίνες των καμπυλών, καθώς και τις σημαίες της μηκοτομής και εμφανίζει τα αποτελέσματα στο γραφικό περιβάλλον του AutoCAD. Τα αρχεία που περιλαμβάνει τον άξονα της οριζοντιογραφίας είναι το fm39.dat.

Στη συνέχεια επιλέγεται το αεροσκάφος σχεδιασμού που εξυπηρετεί το αεροδρόμιο. Για κάθε τύπο αεροσκάφους που αναφέρθηκε προηγουμένως έχουν ετοιμαστεί αρχεία με τις πραγματικές διαστάσεις του και τις συντεταγμένες των τροχών του. Έτσι για

κάθε τύπο προκύπτει μία πολυγωνική γραμμή που απεικονίζει το περίγραμμά του και τρία σημεία που προσδιορίζουν τις θέσεις των τροχών (ρινιαίος τροχός και βάση κυρίου συστήματος τροχών). Ακόμα για κάθε αεροσκάφος καθορίζονται συναρτήσει του κωδικού αναφοράς τους τα περιθώρια ασφαλείας και σημειώνονται τα αντίστοιχα σημεία, ώστε να προσδιορισθούν οι τροχιές τους. Κάνοντας χρήση αναλυτικής γεωμετρίας με τον κατάλληλο μετασχηματισμό αξόνων (Σχήμα 4.1) προκύπτουν οι συντεταγμένες των σημείων του περιγράμματος του αεροσκάφους για κάθε διαδοχική θέση του πάνω στην τροχιά που ακολουθεί. Με αυτόν τον τρόπο απεικονίζεται το αεροσκάφος σε κάθε θέση και η ακρίβεια της προσομοίωσης της κίνησης του εξαρτάται από το βήμα που εισάγεται από τον χρήστη.

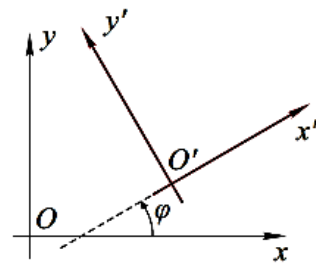
Μεταφορά και στροφή

$$\begin{cases} x = x' \cos \varphi - y' \sin \varphi + x_0 \\ y = x' \sin \varphi + y' \cos \varphi + y_0 \end{cases}$$

ή

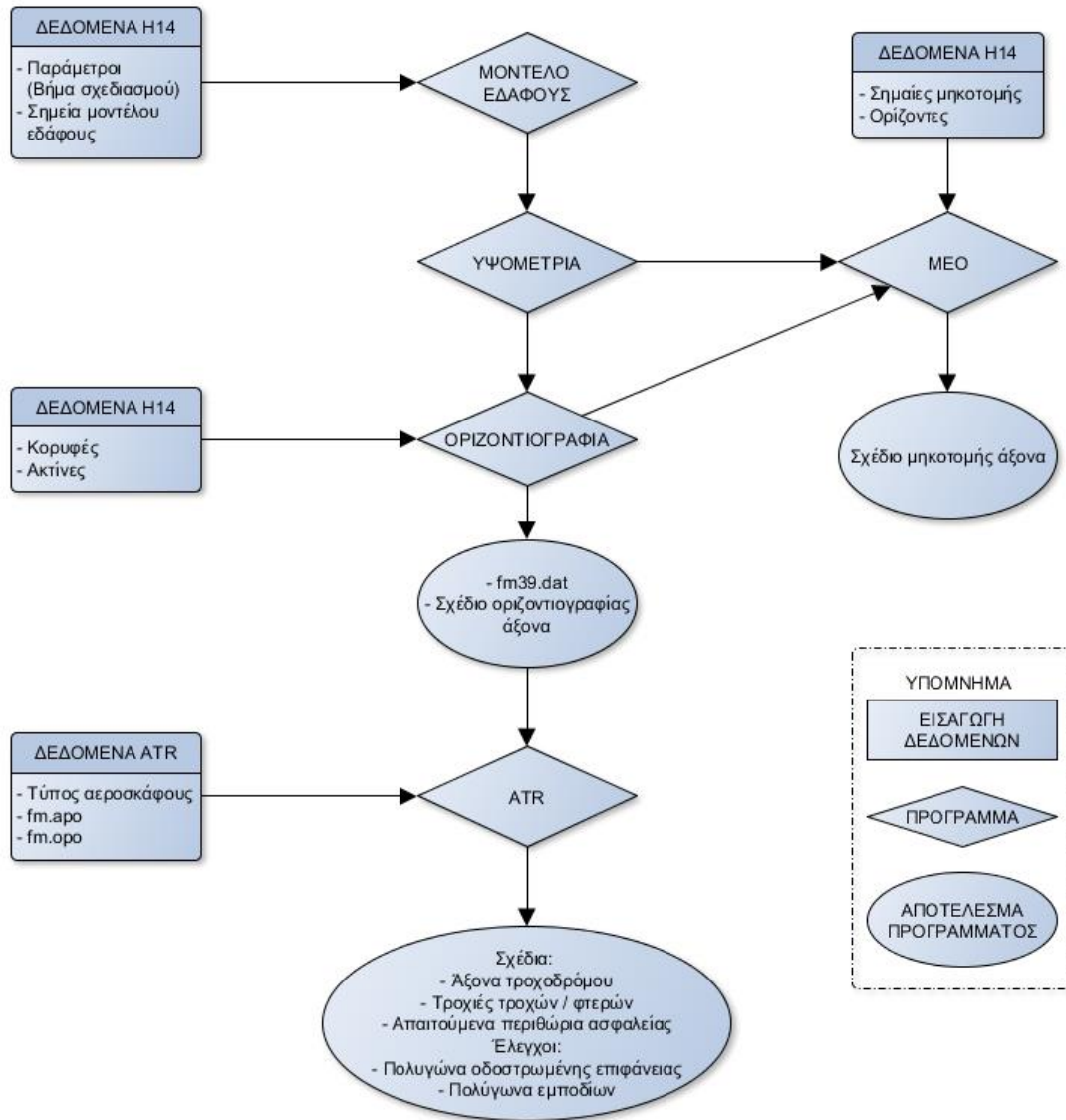
$$\begin{cases} x' = (x - x_0) \cos \varphi + (y - y_0) \sin \varphi \\ y' = (y - y_0) \cos \varphi - (x - x_0) \sin \varphi \end{cases}$$

(x_0, y_0) = συντεταγμένες του O' ως προς το xOy



Σχήμα 4.1 Μετασχηματισμός Συντεταγμένων

Επιπλέον ετοιμάζονται από τον μελετητή τα αρχεία με τις συντεταγμένες των πολυγώνων οδοστρωσίας (fm.apo), όπως επίσης και των πολυγώνων των επιφανειών των εμποδίων που βρίσκονται στον χώρο του αεροδρομίου (fm.opo), τα οποία διαβάζονται από το πρόγραμμα και αποτυπώνονται γραφικά σε σχέδιο του AutoCAD. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι ώστε να καλύπτονται τα απαιτούμενα περιθώρια ασφαλείας καθώς και να μην υπάρχουν σημεία τομής μεταξύ του αεροσκάφους και των πολυγώνων των εμποδίων. Στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα καθώς και τα αποτελέσματα που βγαίνουν από την εφαρμογή του.



Σχήμα 4.2 Συνολικά δεδομένα που εισάγονται στο πρόγραμμα

4.3 Περιγραφή του προγράμματος

4.3.1 Συνοπτική περιγραφή προγράμματος

Στη συγκεκριμένη ενότητα περιγράφεται η λειτουργία του προγράμματος που αναπτύχθηκε για το υφιστάμενο αεροδρόμιο της Σαντορίνης (Σχήμα 4.3). Αρχικά δημιουργήθηκε το αρχείο με το μοντέλο εδάφους της περιοχής (Σχήμα 4.4). Από την εφαρμογή Google Earth και από την ιστοσελίδα της γεωγραφικής υπηρεσίας στρατού (Γ.Υ.Σ.) λήφθηκαν οι συντεταγμένες και τα υψόμετρα χαρακτηριστικών σημείων της περιοχής, τα οποία εισάγονται ως δεδομένα στο πρόγραμμα οδοποιίας H14 που έχει αναπτυχθεί από τον κ. Φ. Μερτζάνη, Επιστημονικό Συνεργάτη ΕΜΠ.

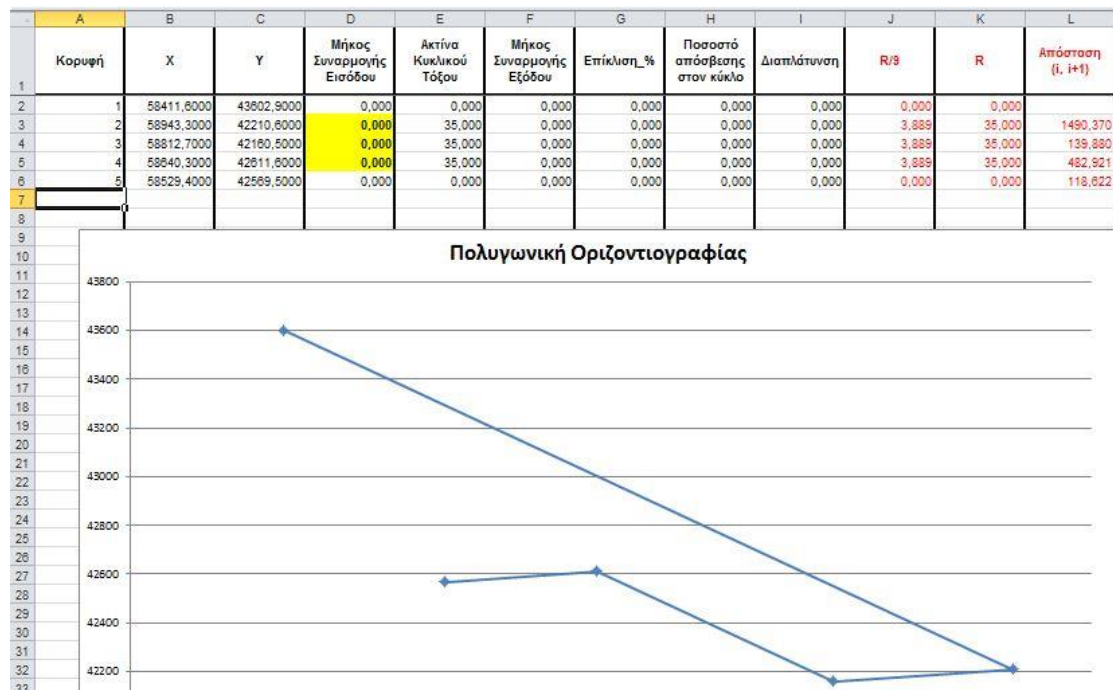


Σχήμα 4.3 Κρατικός Αερολιμένας Σαντορίνης

	A	B	C	D
	X	Y	Z	MENU
1				
2	58087,80	43641,90	42,00	
3	58559,40	43743,60	40,00	
4	59488,30	41354,80	2,00	
5	58767,70	41062,70	30,00	
6	58201,30	42515,10	48,00	
7	58304,90	42584,10	52,00	
8	58224,30	42809,40	54,00	
9	58300,30	42839,30	56,00	
10	58194,30	43110,10	52,00	
11	58295,60	43142,30	48,00	

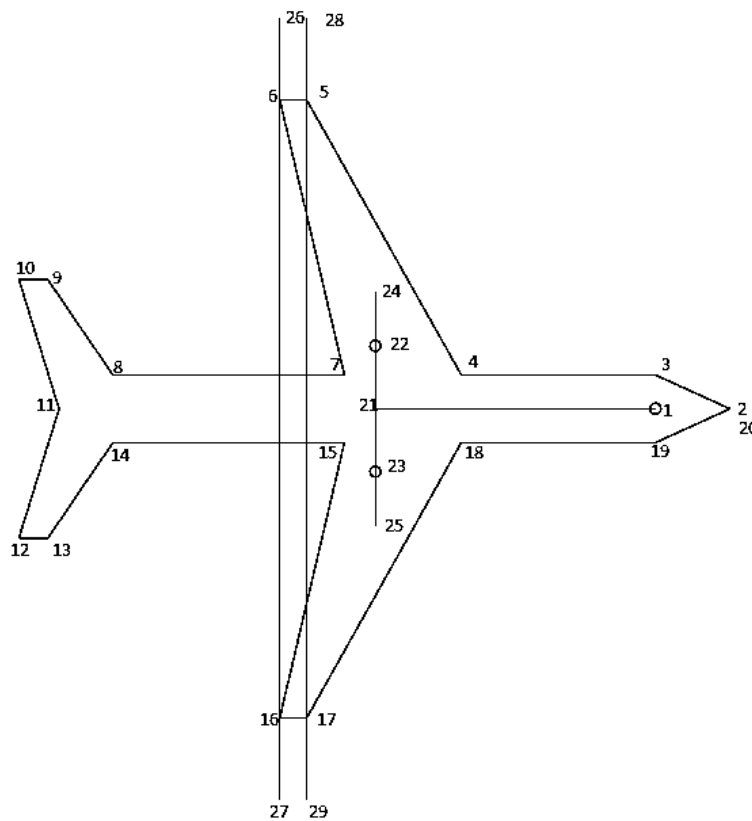
Σχήμα 4.4 Σημεία μοντέλου εδάφους

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι κορυφές της οριζοντιογραφίας καθώς και οι ακτίνες των καμπυλών (Σχήμα 4.5). Το αρχείο fm39 που δημιουργήθηκε για την χάραξη της τροχιάς του αεροσκάφους διαβάζεται από το πρόγραμμα Aircraft Turn (ATR) και εμφανίζεται η γραφική απεικόνιση του άξονα του τροχοδρόμου στο AutoCAD.



Σχήμα 4.5 Κορυφές Οριζοντιογραφίας

Σε επόμενο βήμα ζητείται από τον χρήστη να επιλέξει το αεροσκάφος σχεδιασμού από τη λίστα των οκτώ τύπων αεροσκαφών που αναφέρθηκε στην εισαγωγή. Για κάθε ένα από αυτά τα αεροσκάφη έχει δημιουργηθεί λίστα με τις συντεταγμένες των χαρακτηριστικών σημείων που συνθέτουν το περίγραμμά του, οι τιμές των οποίων προκύπτουν από τα φυσικά χαρακτηριστικά τους και με την παραδοχή ότι ο διαμήκης άξονας του αεροσκάφους είναι οριζόντιος και το σημείο που αντιστοιχεί στον ρινιαίο τροχό ταυτίζεται με την αρχή των αξόνων (0,0). Έτσι προκύπτουν για κάθε τύπο αεροσκάφους 29 χαρακτηριστικά σημεία όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Τα σημεία 1, 22 και 23 αντιπροσωπεύουν τους τροχούς του αεροσκάφους, ενώ τα σημεία 24-29 προκύπτουν από τις απαιτούμενες αποστάσεις ασφαλείας τόσο από τους τροχούς της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών, όσο και από τα άκρα των φτερών του αεροσκάφους.



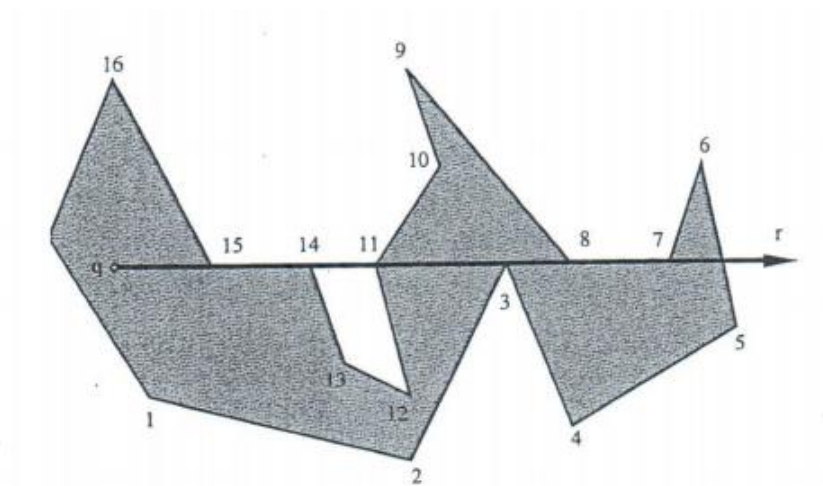
Σχήμα 4.6 Χαρακτηριστικά σημεία αεροσκάφους

Με την παραδοχή ότι ο ρινιαίος τροχός του αεροσκάφους ακολουθεί τον άξονα του τροχοδρόμου και με τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τοποθετείται το αεροσκάφος σε διαδοχικές θέσεις ανάλογα με το βήμα που έχει δοθεί και προσδιορίζονται οι τροχιές της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών και των φτερών του αεροσκάφους. Ακόμα σχεδιάζονται και τροχιές των σημείων 24-29 που αντιστοιχούν στις αποστάσεις ασφαλείας.

Από τον χάρτη της περιοχής του αεροδρομίου προκύπτουν οι συντεταγμένες των πολυγώνων των ασφαλτοστρωμένων επιφανειών όπως επίσης και των επιφανειών των εμποδίων. Οι εν λόγω συντεταγμένες καταγράφονται σε αρχείο το οποίο διαβάζεται από το πρόγραμμα και σχεδιάζονται τα πολύγωνα στο AutoCAD. Ο προσδιορισμός των παραπάνω πολυγώνων γίνεται με στόχο να πραγματοποιηθεί έλεγχος εξασφάλισης των ελάχιστων αποστάσεων ασφαλείας.

Έλεγχος εξασφάλισης απαιτούμενου περιθωρίου ασφαλείας μεταξύ εξώτατου τροχού και οριογραμμής τροχοδρόμου

Προκειμένου να ικανοποιείται η απαίτηση των κανονισμών για το ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οι τροχιές των σημείων 22 και 23 του Σχήματος 4.6 βρίσκονται συνεχώς στο εσωτερικό ενός από τα πολύγωνα ασφαλτοστρωμένης επιφάνειας. Για τον σκοπό αυτό θα πρέπει να πραγματοποιηθεί εντοπισμός σημείου ως προς ένα μη κυρτό πολύγωνο. Γενικά ένα σημείο q ανήκει σε ένα πολύγωνο P εάν και μόνο εάν μία ημιευθεία r με κορυφή το q διασχίζει το σύνορο του πολυγώνου περιττό πλήθος φορών (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7 Εντοπισμός σημείου ως προς μη κυρτό πολύγωνο

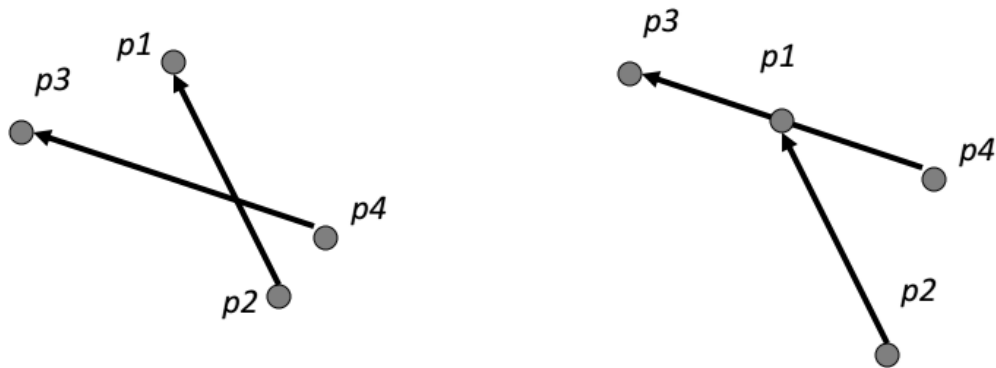
Έλεγχος εξασφάλισης απαιτούμενης απόστασης ασφαλείας από το άκρο του φτερού

Σε αντίθεση με τα πολύγωνα οδοστρωσίας, στα οποία στόχος είναι τα σημεία να βρίσκονται στο εσωτερικό τους, στην περίπτωση των επιφανειών των εμποδίων είναι ζητούμενο να μην υπάρχει κανένα σημείο τομής μεταξύ των πολυγώνων και των ευθύγραμμων τμημάτων που ορίζονται από τα σημεία 26, 27 και 28, 29. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο να εξεταστεί πότε τέμνονται δύο ευθύγραμμα τμήματα.

Γενικά δύο ευθύγραμμα τμήματα (Σχήμα 4.8) τέμνονται αν και μόνο αν τα παρακάτω εξωτερικά γινόμενα είναι ετερόσημα ή ένα από τα δύο είναι μηδέν:

$$(p1 - p4) \times (p3 - p4) \text{ και } (p2 - p4) \times (p3 - p4)$$

$$(p3 - p2) \times (p1 - p2) \text{ και } (p4 - p2) \times (p1 - p2)$$

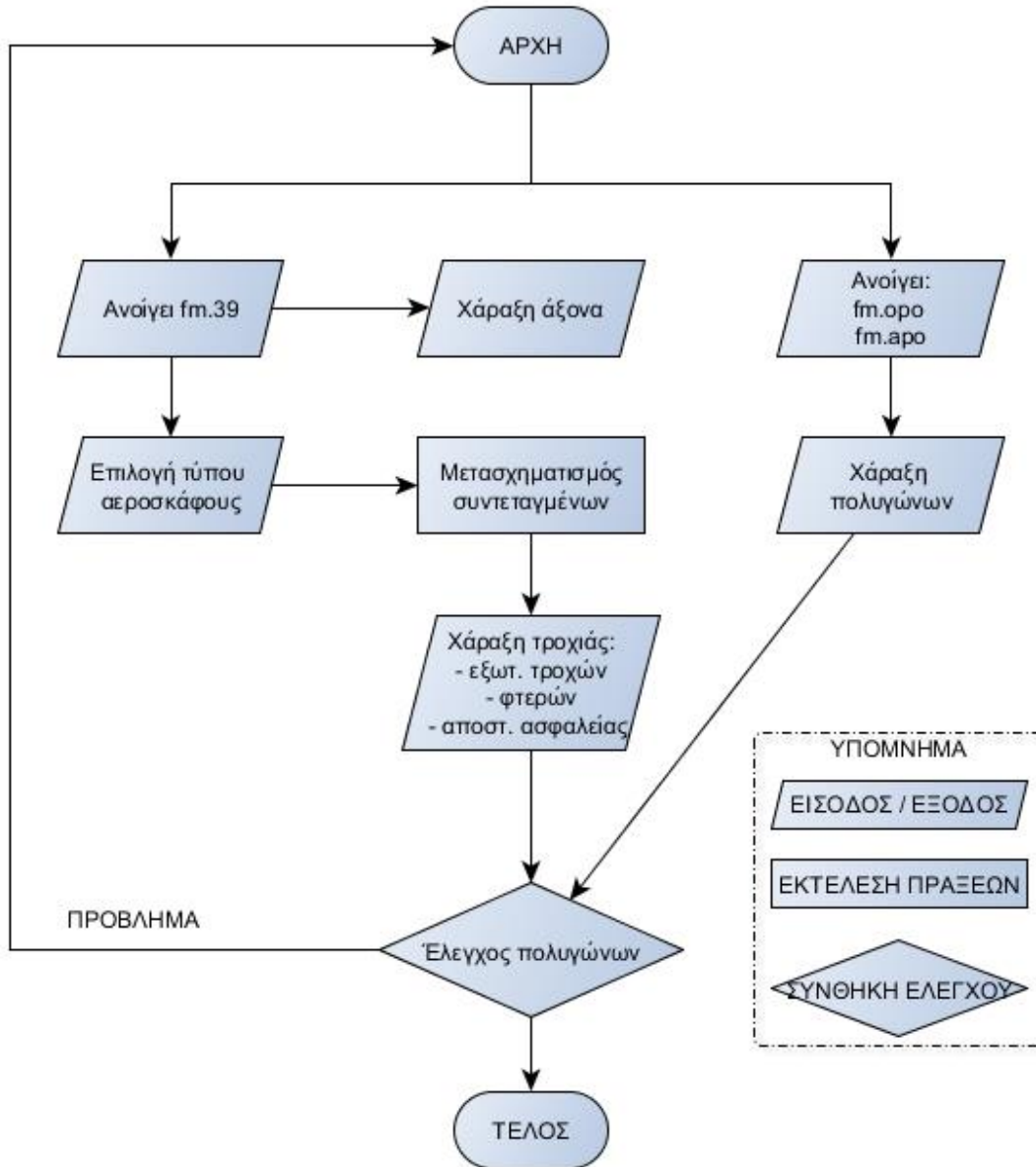


Σχήμα 4.8 Έλεγχος τομής ευθύγραμμων τμημάτων

Αφού πραγματοποιηθούν οι έλεγχοι για την εξασφάλιση των απαιτούμενων αποστάσεων ασφαλείας σχεδιάζονται όλα τα πολύγωνα καθώς και οι τροχιές των χαρακτηριστικών σημείων του αεροσκάφους στο περιβάλλον του AutoCAD.

4.3.2 Αναλυτική περιγραφή προγράμματος

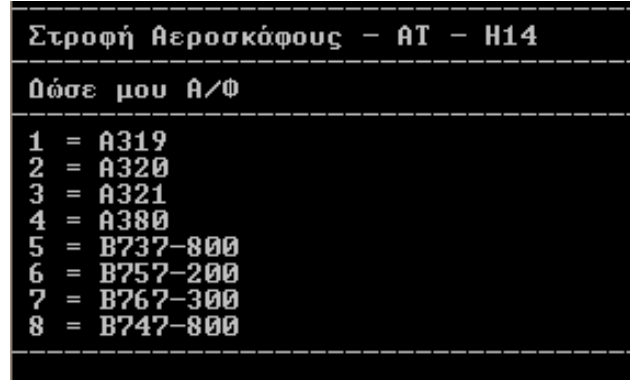
Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των βημάτων που ακολουθεί το πρόγραμμα ATR, μετά τον καθορισμό της οριζοντιογραφίας στο πρόγραμμα οδοποιίας H14, για τη διερεύνηση της κίνησης του αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα του αεροδρομίου. Τα βήματα αρχικά παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 4.9 και στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά.



Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ροής ATR

Βήμα 1. Επιλογή αεροσκάφους

Αρχικά το πρόγραμμα ζητά από τον χρήστη να επιλέξει έναν τύπο αεροσκάφους από συγκεκριμένη λίστα που έχει δημιουργηθεί όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (Σχήμα 4.10).

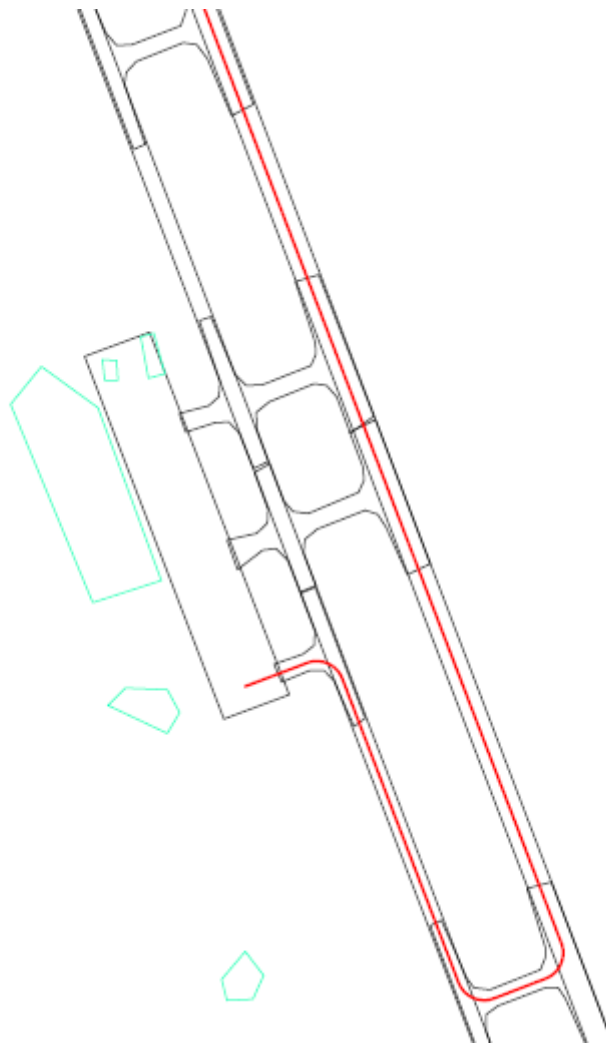


Σχήμα 4.10 Επιλογή αεροσκάφους σχεδιασμού

Ανάλογα με την επιλογή του χρήστη προσδιορίζονται οι αρχικές τιμές των συντεταγμένων x , y των χαρακτηριστικών σημείων του περιγράμματος του αεροσκάφους, των τροχών και των αποστάσεων ασφαλείας.

Βήμα 2. Χάραξη άξονα διαδρόμου – τροχοδρόμου

Το πρόγραμμα διαβάζει το αρχείο fm39 που περιλαμβάνει τις συντεταγμένες των σημείων του άξονα, όπως αυτές προέκυψαν από τις κορυφές τις οριζοντιογραφίας όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο (Σχήμα 4.5). Στη συνέχεια ενώνοντας τα διαδοχικά σημεία σχεδιάζεται ο άξονας, ο οποίος ταυτίζεται με την τροχιά που ακολουθεί ο ριναίος τροχός του αεροσκάφους. Το γραφικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχεδιαστικό περιβάλλον του AutoCAD (Σχήμα 4.11).

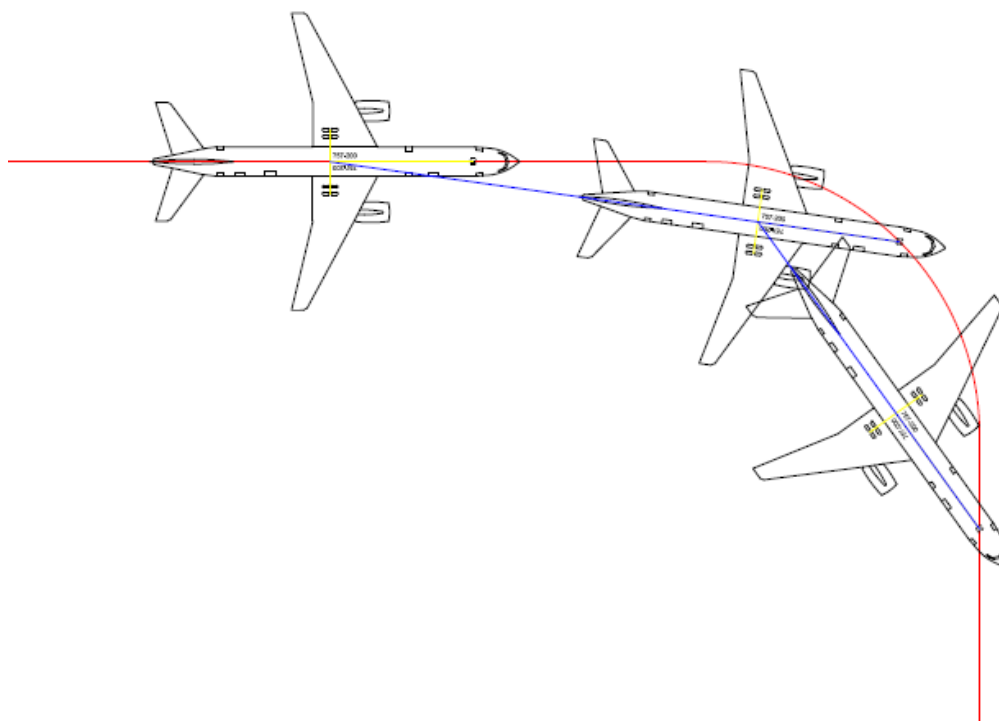


Σχήμα 4.11 Χάραξη άξονα διαδρόμου - τροχοδρόμου

Σημείωση: Στο προηγούμενο σχήμα επισημαίνεται με κόκκινη γραμμή ο άξονας της οριζοντιογραφίας που αποτελείται από τον άξονα του διαδρόμου, των εξόδων και του τροχοδρόμου.

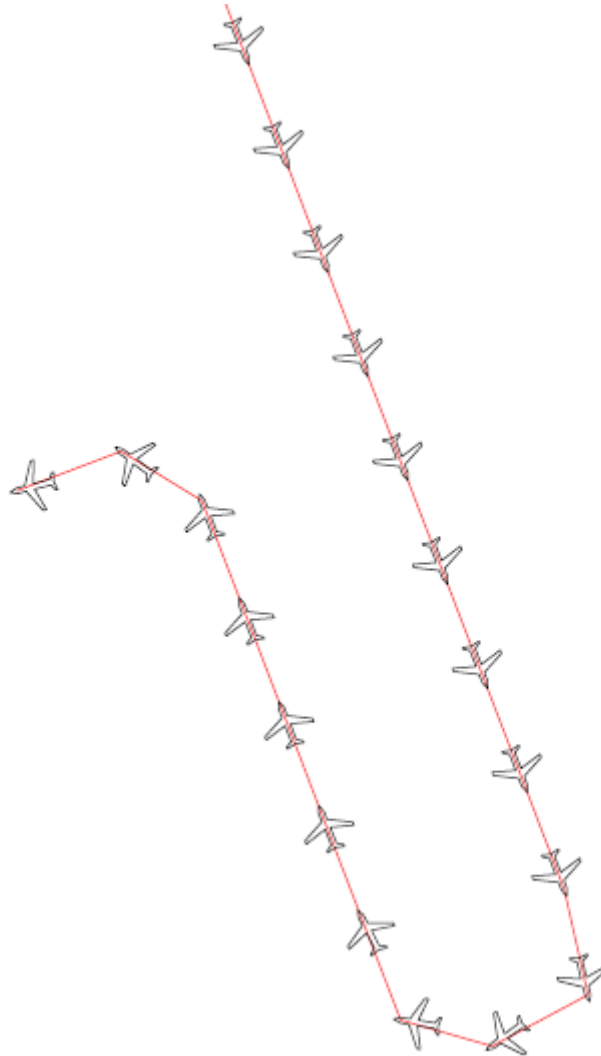
Βήμα 3. Τοποθέτηση αεροσκάφους στον χώρο

Ο προσδιορισμός της θέσης του αεροσκάφους επιτυγχάνεται με τη γραφική μέθοδο, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η διεύθυνση δηλαδή του άξονα του αεροσκάφους σε κάθε διαδοχική θέση προκύπτει από την προηγούμενη ενώνοντας τον ρινιαίο τροχό στην υπάρχουσα θέση με το κέντρο της βάσης του κυρίου συστήματος τροχών στην προηγούμενη θέση (Σχήμα 4.12). Η ακρίβεια του προσδιορισμού της θέσης του αεροσκάφους εξαρτάται από το βήμα σχεδιασμού που έχει επιλέξει ο χρήστης και εισάγεται στις παραμέτρους του προγράμματος H14. Δηλαδή όσο μικρότερο είναι το βήμα σχεδιασμού, τόσο ακριβέστερος είναι ο προσδιορισμός των διαδοχικών θέσεων του αεροσκάφους και στη συνέχεια ο καθορισμός των τροχιών των τροχών και των φτερών του.



Σχήμα 4.12 Γραφική μέθοδος προσδιορισμού θέσης αεροσκάφους

Με τον μετασχηματισμό των αξόνων που περιγράφηκε προηγουμένως προκύπτουν οι συντεταγμένες των χαρακτηριστικών σημείων του αεροσκάφους για κάθε διαδοχική θέση. Με αυτόν τον τρόπο τοποθετείται το αεροσκάφος στις διαδοχικές του θέσεις, οι οποίες σχεδιάζονται και εμφανίζονται στο AutoCAD (Σχήμα 4.13).

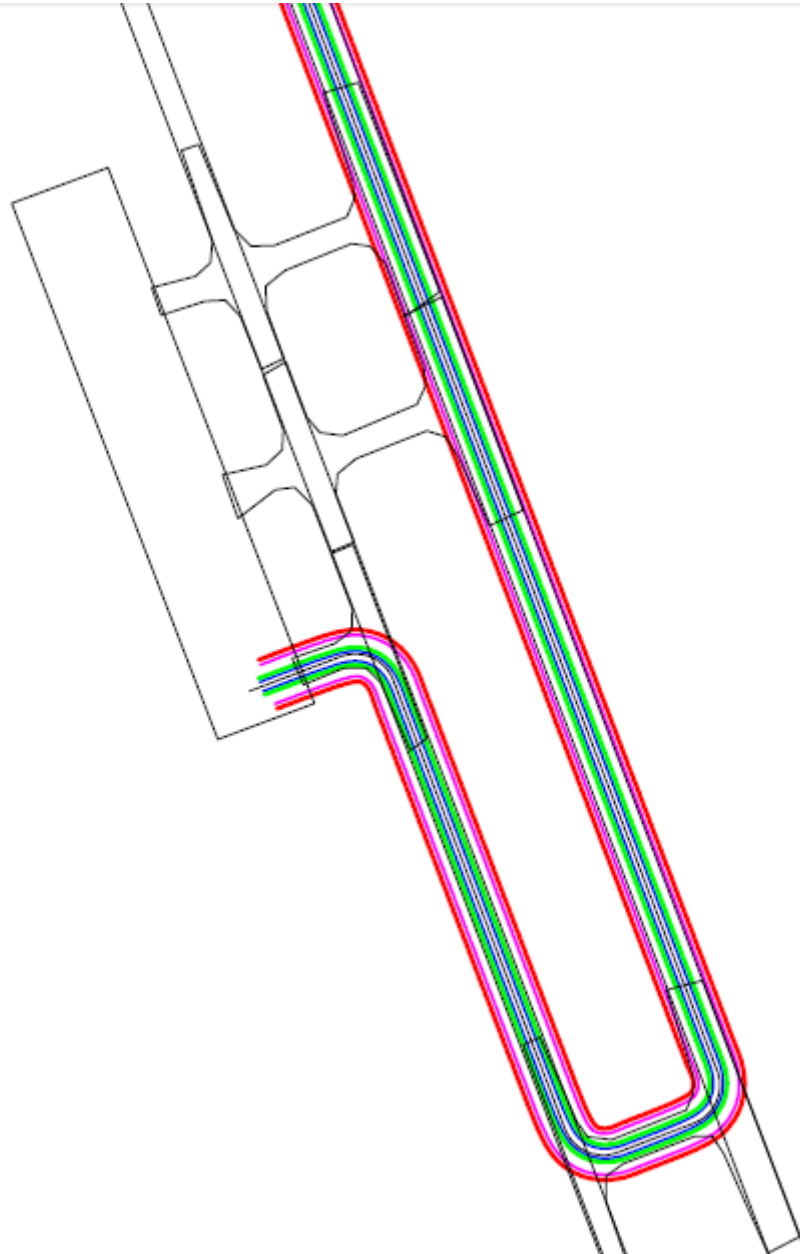


Σχήμα 4.13 Τοποθέτηση αεροσκάφους σε διαδοχικές θέσεις

Σημείωση: Στο παραπάνω σχήμα έχει επιλεγεί επίτηδες μία μεγάλη τιμή βήματος σχεδιασμού (80 m) ώστε να γίνεται αντιληπτή η μέθοδος προσδιορισμού της θέσης του αεροσκάφους. Παρατηρείται όμως στις στροφές μικρή ακρίβεια στον προσδιορισμό της κίνησης του αεροσκάφους. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις το βήμα σχεδιασμού λαμβάνει την τιμή ένα μέτρο ώστε να προκύπτουν ακριβέστερα σχέδια και συμπεράσματα.

Βήμα 4. Χάραξη τροχιών τροχών και φτερών αεροσκάφους

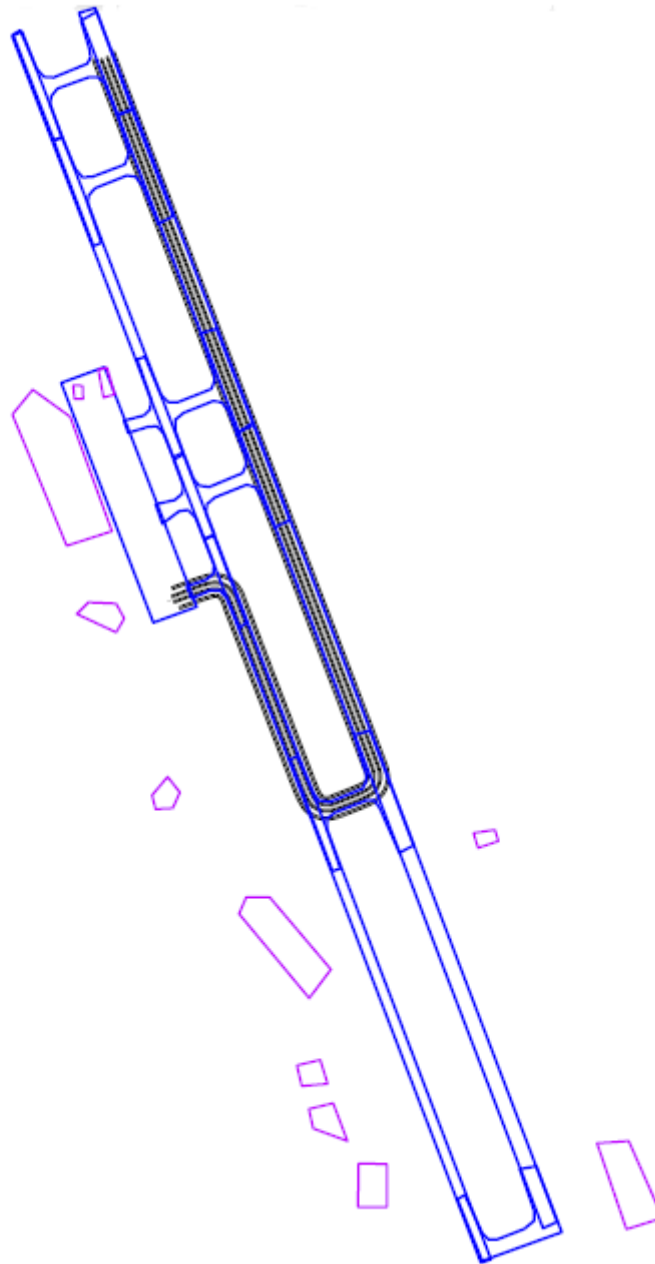
Με την σωστή τοποθέτηση του αεροσκάφους στις διαδοχικές θέσεις πάνω στον άξονα του τροχοδρόμου, προκύπτουν οι συντεταγμένες όλων των σημείων του αεροσκάφους. Ενώνοντας τα διαδοχικά σημεία προκύπτουν οχτώ γραμμές, εκ των οποίων οι τέσσερις αντιστοιχούν στους εξωτερικούς τροχούς και στα φτερά του αεροσκάφους (μπλε και ροζ γραμμές), ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις (πράσινες και κόκκινες γραμμές) στις ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας που πρέπει να παρέχονται από τις άκρες των τροχών και των φτερών αντίστοιχα (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14 Χάραξη τροχιάς εξωτερικών τροχών και φτερών αεροσκάφους

Βήμα 5. Χάραξη πολυγώνων ασφαλτοστρωμένων επιφανειών και επιφανειών εμποδίων

Ο χρήστης ετοιμάζει τα αρχεία fm.apo και fm.opo με τις συντεταγμένες των γωνιακών σημείων των πολυγώνων, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Το πρόγραμμα διαβάζει τα εν λόγω αρχεία και σχεδιάζει τα πολύγωνα ασφαλτοστρωμένης επιφάνειας (μπλε χρώμα) καθώς και τις επιφάνειες εμποδίων (μωβ χρώμα) που υπάρχουν στην περιοχή του αεροδρομίου (Σχήμα 4.15)



Σχήμα 4.15 Χάραξη πολυγώνων οδοστρωσίας και εμποδίων

Βήμα 6. Έλεγχοι πολυγώνων

Στο τελευταίο στάδιο του προγράμματος ελέγχονται για κάθε διαδοχική θέση του αεροσκάφους τα εξής:

- (α) οι εξωτερικοί τροχοί, λαμβάνοντας υπόψη το ελάχιστο περιθώριο ασφαλείας, να βρίσκονται στο εσωτερικό κάποιου από τα δεδομένα πολύγωνα οδοστρωσίας, και
- (β) τα φτερά, λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας, να μην τέμνουν κανένα από τα δεδομένα πολύγωνα εμποδίων.

Οι έλεγχοι αυτοί πραγματοποιούνται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στην παράγραφο 4.3.1 και ο εντοπισμός μη εξασφάλισης τους θα παρουσιαστεί στην επόμενη παράγραφο, όπου θα δοθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του προγράμματος.

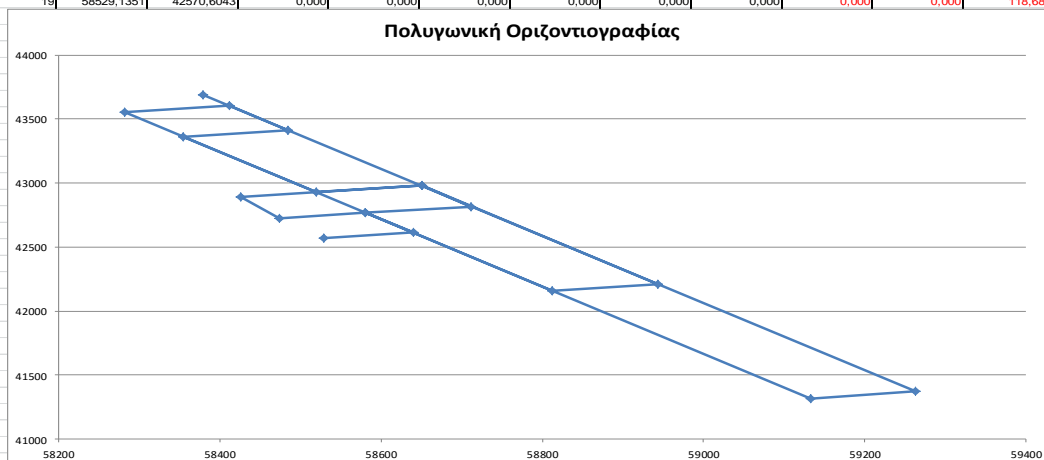
4.4 Παραδείγματα εφαρμογής προγράμματος Aircraft Turn

Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα παρουσιαστούν τρία παραδείγματα για την κατανόηση της λειτουργίας του προγράμματος από τον αναγνώστη. Το πρώτο παράδειγμα παρουσιάζει μια γενική ανασκόπηση της λειτουργίας του προγράμματος όταν όλα τα δεδομένα που δίνονται δεν εμφανίζουν πρόβλημα στους ελέγχους που γίνονται, σε αντίθεση με τα επόμενα δύο παραδείγματα όπου τα δεδομένα οδηγούν σε λάθη τα οποία εντοπίζονται και εμφανίζονται από το πρόγραμμα. Στο τελευταίο παράδειγμα παρουσιάζονται τα προβλήματα που προκύπτουν από την επιλογή ενός μεγαλύτερου τύπου αεροσκάφους. Σε όλα τα παραδείγματα που ακολουθούν ο χρήστης δίνει την οριζοντιογραφία της χάραξης καθώς και τα πολύγωνα ασφαλοστρωμένης επιφάνειας και των επιφανειών των εμποδίων.

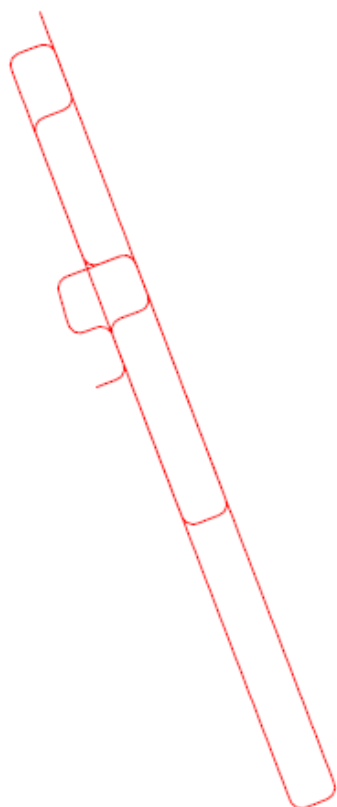
Παράδειγμα 1: Συνολικός έλεγχος πολυγώνων

Στο πρώτο παράδειγμα εισάγεται ως δεδομένη μια σύνθετη τροχιά του αεροσκάφους, τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται ότι το αεροσκάφος διέρχεται από όλα τα τμήματα του τροχοδρομικού συστήματος του αεροδρομίου της Σαντορίνης (Σχήμα 4.16). Πιο συγκεκριμένα εισάγονται οι κορυφές της οριζοντιογραφίας στο πρόγραμμα H14 και αφού τρέξει η οριζοντιογραφία δημιουργείται το αρχείο fm39.dat που διαβάζεται από το πρόγραμμα ATR και σχεδιάζεται η τροχιά που διαγράφει ο ρινιαίος τροχός του αεροσκάφους (Σχήμα 4.17), η τροχιά των εξωτερικών τροχών και των φτερών με τα περιθώρια ασφαλείας (Σχήμα 4.18 και Σχήμα 4.19)

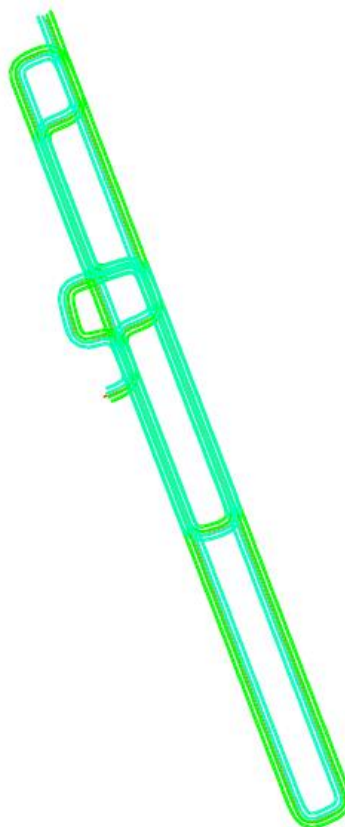
Κορυφή	X	Y	Μήκος Συναρμογής Εισόδου	Ακτίνα Κυκλικού Τόξου	Μήκος Συναρμογής Εξόδου	Επίκλιση_%	Ποσοστό απόσβεσης στον κύκλο	Διαπλάτυση	R/9	R	Απόσταση (i, i+1)
1	58379,1549	43687,9183	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
2	59263,4549	41370,7183	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	2480,202
3	59133,3549	41318,8183	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	140,070
4	58281,3801	43553,2049	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	2391,306
5	58411,7401	43602,9535	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	139,530
6	58484,3388	43412,4274	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	203,889
7	58354,2266	43362,3195	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	139,427
8	58519,1053	42928,5365	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	464,061
9	58650,1411	42978,2606	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	140,153
10	58711,5790	42816,8418	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	172,716
11	58580,6751	42767,2006	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	140,000
12	58812,2389	42161,2481	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	648,691
13	58942,9821	42210,4781	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	139,705
14	58650,1411	42978,2606	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	821,733
15	58425,8750	42892,9877	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	239,931
16	58473,5941	42726,5934	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	173,102
17	58580,6751	42767,2006	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	114,522
18	58640,0280	42612,8879	0,000	35,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,889	35,000	165,334
19	58529,1351	42570,6043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	118,681



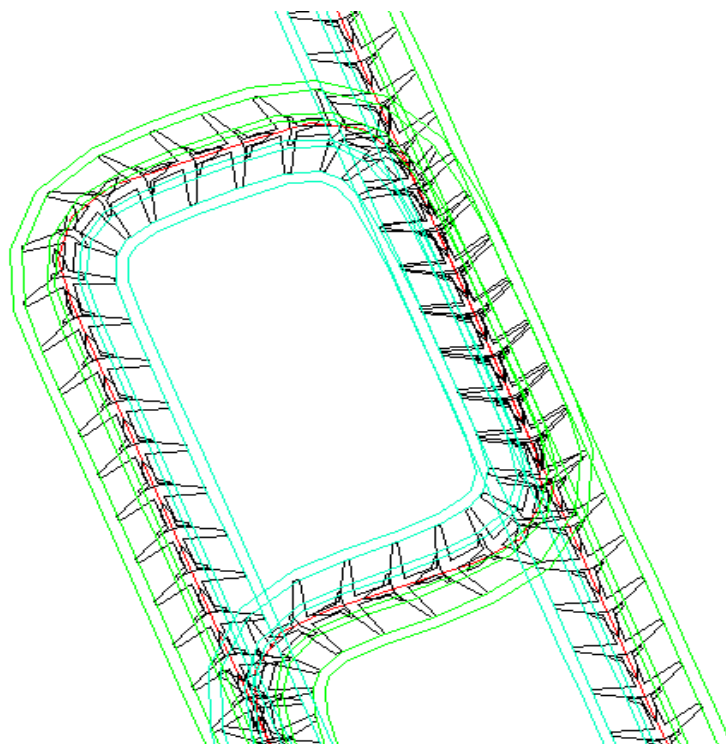
Σχήμα 4.16 Κορυφές Οριζοντιογραφίας - Παράδειγμα 1



Σχήμα 4.17 Τροχιά ριναίου τροχού

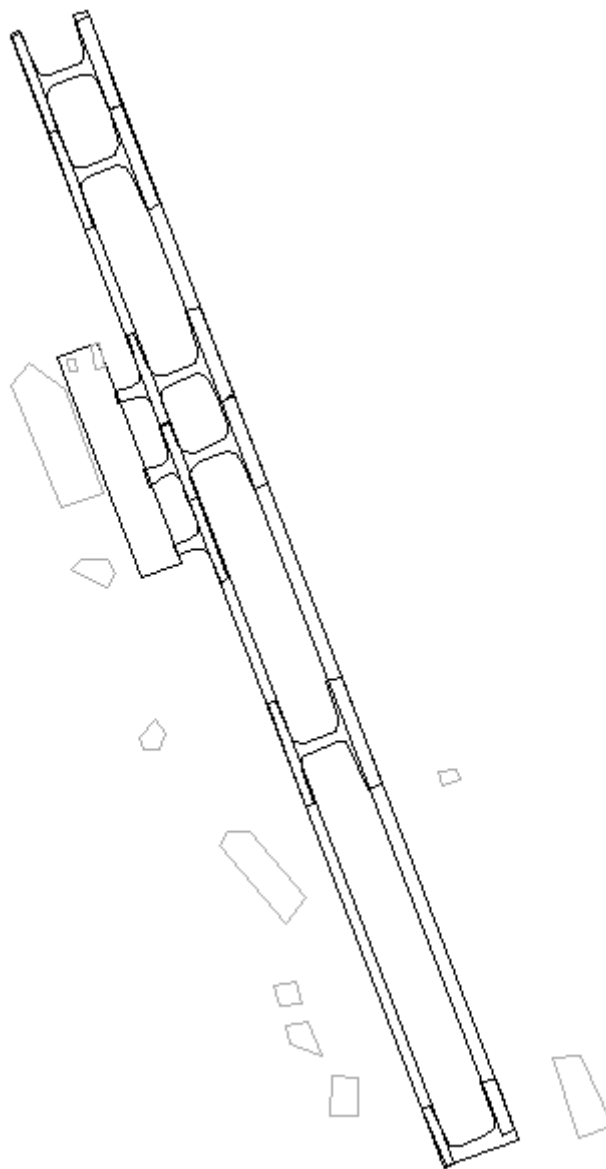


Σχήμα 4.18 Τροχιά εξωτερικών τροχών και φτερών (με αποστάσεις ασφαλείας)

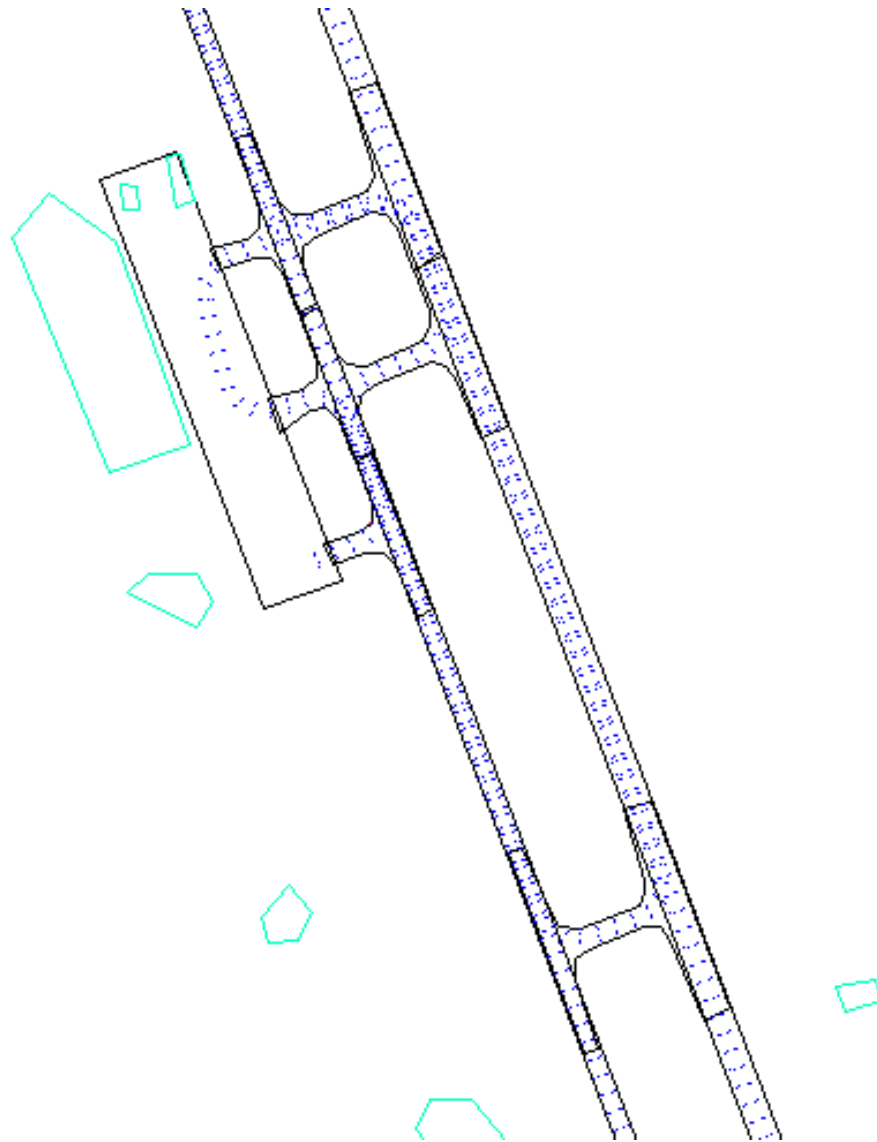


Σχήμα 4.19 Λεπτομέρεια χάραξης τροχιών

Στη συνέχεια δημιουργούνται τα αρχεία fm.apo και fm.opo, τα οποία περιλαμβάνουν τα πολύγωνα οδοστρωσίας και εμποδίων αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα δίνονται κανονικά όλα τα πολύγωνα όπως αυτά προέκυψαν από τον χάρτη της περιοχής, ώστε να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος για τις αποστάσεις ασφαλείας (Σχήμα 4.20). Επιλέγοντας τον τύπο αεροσκάφους A319 από τη λίστα των αεροσκαφών σχεδιασμού, υπολογίζονται οι τροχιές των τροχών και των φτερών του, καθώς και τα ελάχιστα περιθώρια ασφαλείας. Τέλος, γίνεται ο έλεγχος ότι οι τροχοί του αεροσκάφους βρίσκονται συνεχώς στο εσωτερικό κάποιου πολυγώνου ασφαλτοστρωμένης επιφάνειας, ενώ τα φτερά δεν τέμνουν κανένα από τα πολύγωνα των εμποδίων (Σχήμα 4.21).



Σχήμα 4.20 Πολύγωνα οδοστρωσίας και εμποδίων



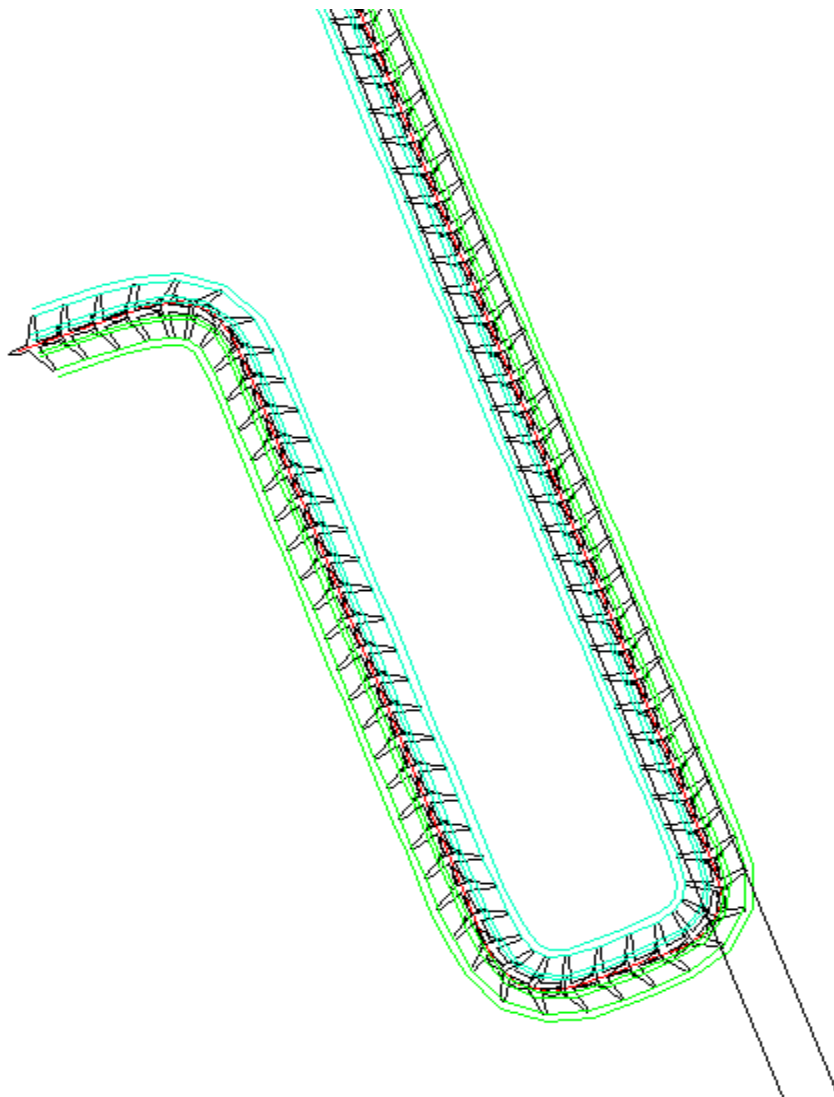
Σχήμα 4.21 Έλεγχος πολυγώνων οδοστρωσίας και εμποδίων

Σημείωση: Στο παραπάνω σχήμα σημειώνονται με μπλε χρώμα τα σημεία όπου γίνεται ο έλεγχος εξασφάλισης του ελάχιστου περιθωρίου ασφαλείας και παρατηρείται ότι όλα τα σημεία βρίσκονται στο εσωτερικό κάποιου πολυγώνου ασφαλείας. Επίσης παρατηρείται ότι δεν σημειώνεται κάποιο σημείο τομής με τα πολύγωνα εμποδίων.

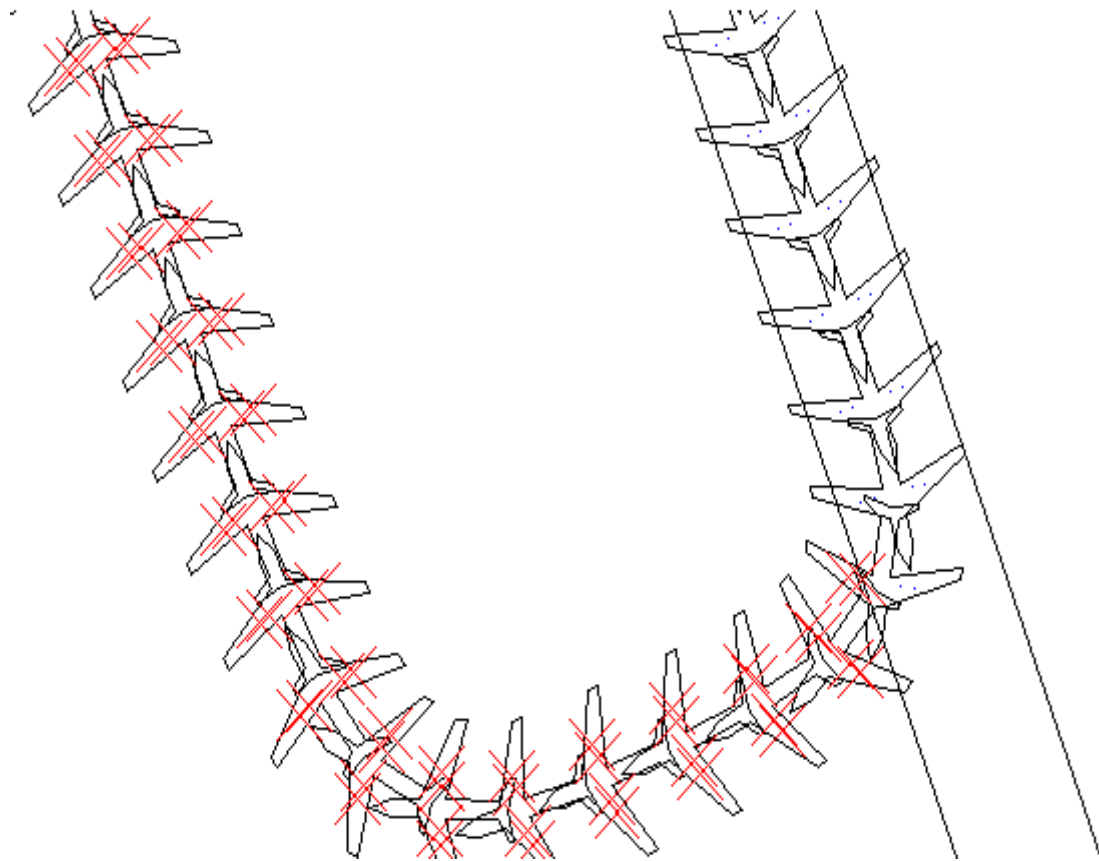
Παράδειγμα 2: Εντοπισμός προβλημάτων στις ασφαλτοστρωμένες επιφάνειες

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα δίνεται η οριζοντιογραφία του Σχήματος 4.5, για την οποία προκύπτει ο άξονας του Σχήματος 4.11, και στόχο έχει να παρουσιάσει τον τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα ελέγχει τα πολύγωνα οδοστρωσίας. Για τον λόγο αυτό δίνονται από τον χρήστη περιορισμένα πολύγωνα ασφαλτοστρωμένης επιφάνειας, ώστε να εντοπιστούν από το πρόγραμμα οι θέσεις όπου δεν ικανοποιούνται οι έλεγχοι.

Πιο συγκεκριμένα έχει δοθεί στο πρόγραμμα μόνο το πολύγωνο που περιλαμβάνει τον διάδρομο προσγείωσης – απογείωσης (Σχήμα 4.22), έτσι ώστε να εντοπιστούν από το πρόγραμμα οι θέσεις στις οποίες οι τροχοί του αεροσκάφους βρίσκονται εκτός οδοστρωμένης επιφάνειας (Σχήμα 4.23).



Σχήμα 4.22 Οριζοντιογραφία με όλες τις τροχιές και το πολύγωνο οδοστρωσίας διαδρόμου

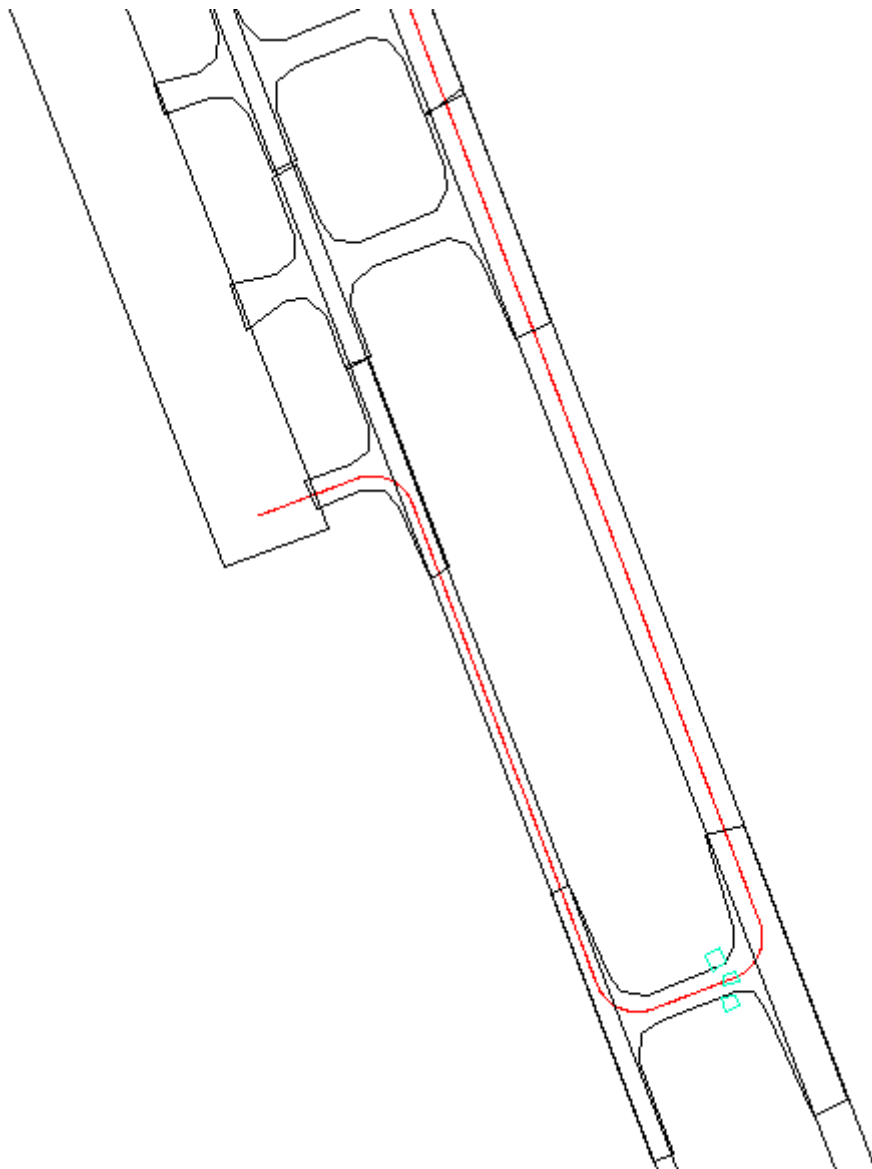


Σχήμα 4.23 Έλεγχος πολυγώνων ασφαλτοστρωμένης επιφάνειας

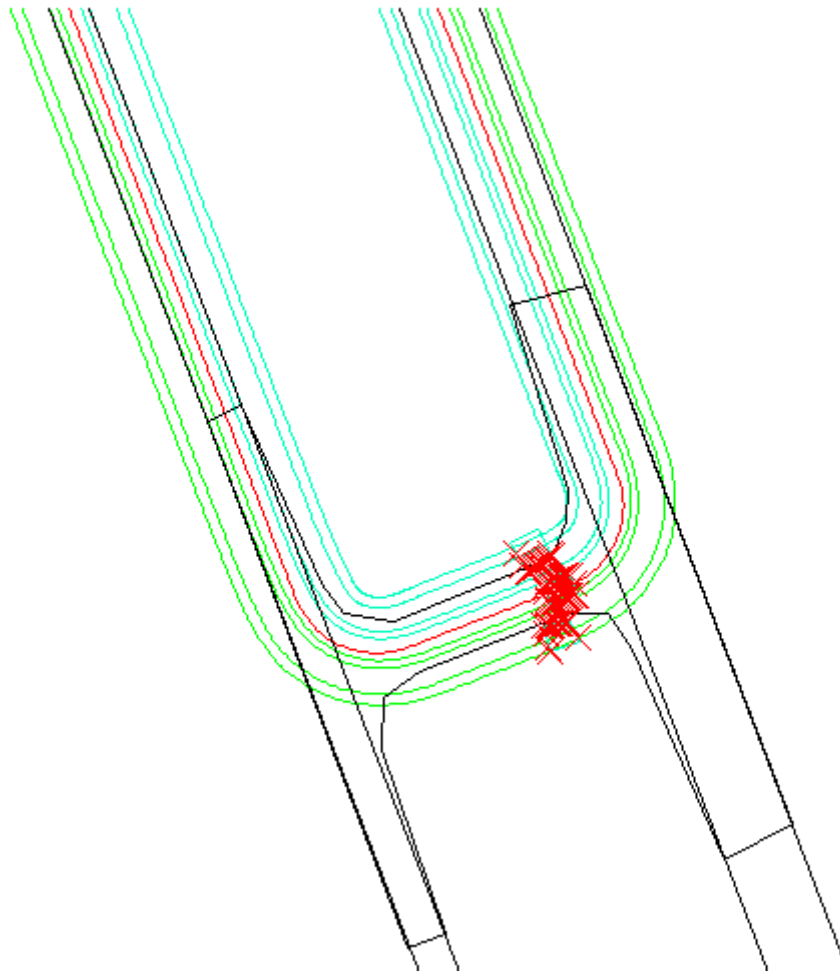
Σημείωση: Στο παραπάνω σχήμα σημειώνονται με μπλε χρώμα οι θέσεις στις οποίες ικανοποιείται ο έλεγχος για την εξασφάλιση του απαιτούμενου περιθωρίου ασφαλείας και με κόκκινο χρώμα οι θέσεις στις οποίες οι τροχοί βρίσκονται εκτός ασφαλτοστρωμένης επιφάνειας.

Παράδειγμα 3: Εντοπισμός προβλημάτων στα πολύγωνα εμποδίων

Στο τρίτο παράδειγμα δίνεται η ίδια οριζοντιογραφία με το προηγούμενο καθώς επίσης και όλα τα πολύγωνα οδοστρωμένης επιφάνειας. Επίσης δημιουργείται ένα αρχείο με πολύγωνα εμποδίων που βρίσκονται μέσα στο χώρο που κινείται το αεροσκάφος (Σχήμα 4.24-γαλάζιο χρώμα), έτσι ώστε να εντοπιστούν από το πρόγραμμα τα σημεία τομής του περιγράμματος του αεροσκάφους με αυτά (Σχήμα 4.25).



Σχήμα 4.24 Οριζοντιογραφία με δεδομένα πολύγωνα εμποδίων πάνω στην τροχιά του αεροσκάφους

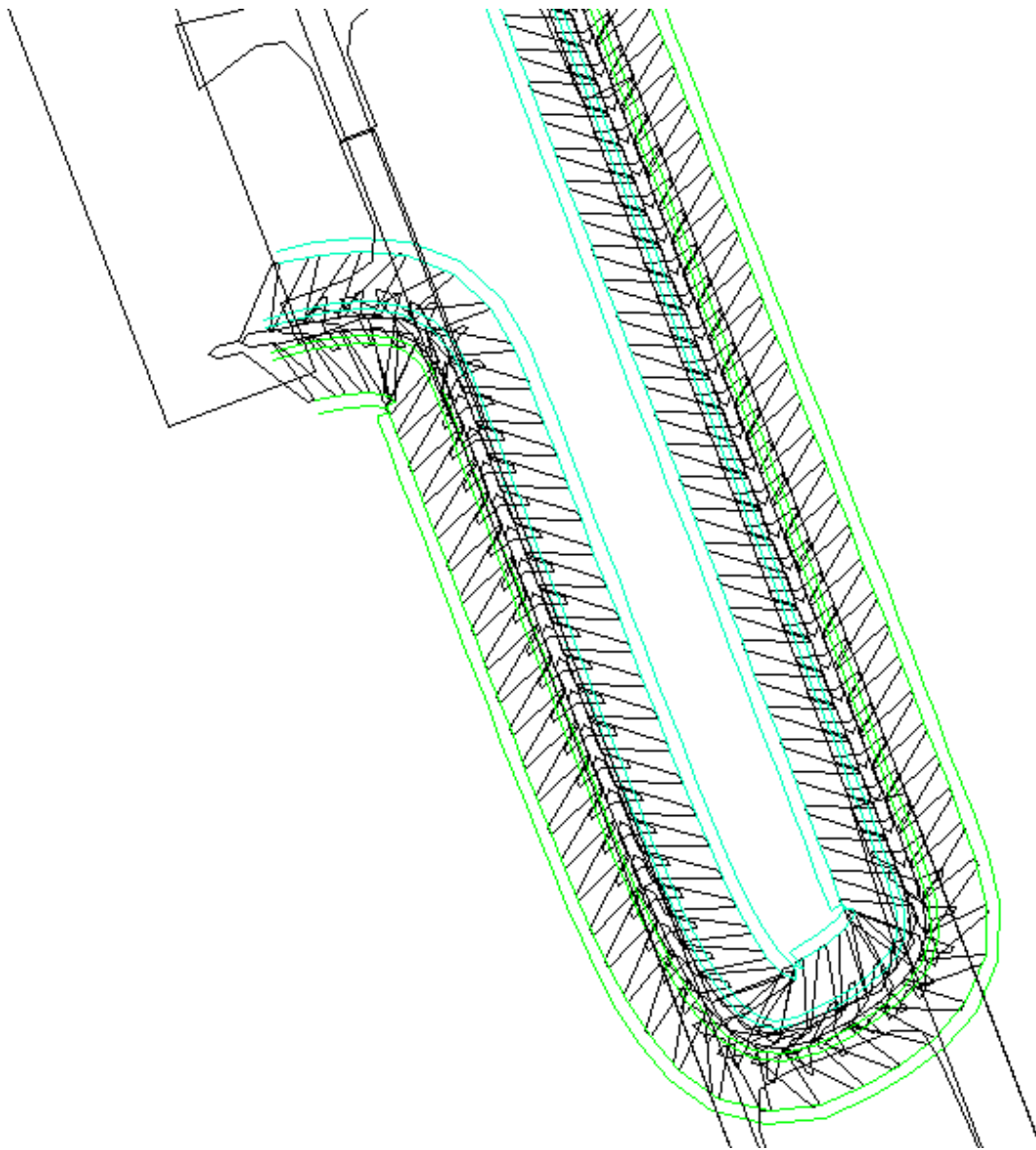


Σχήμα 4.25 Έλεγχος εμποδίων

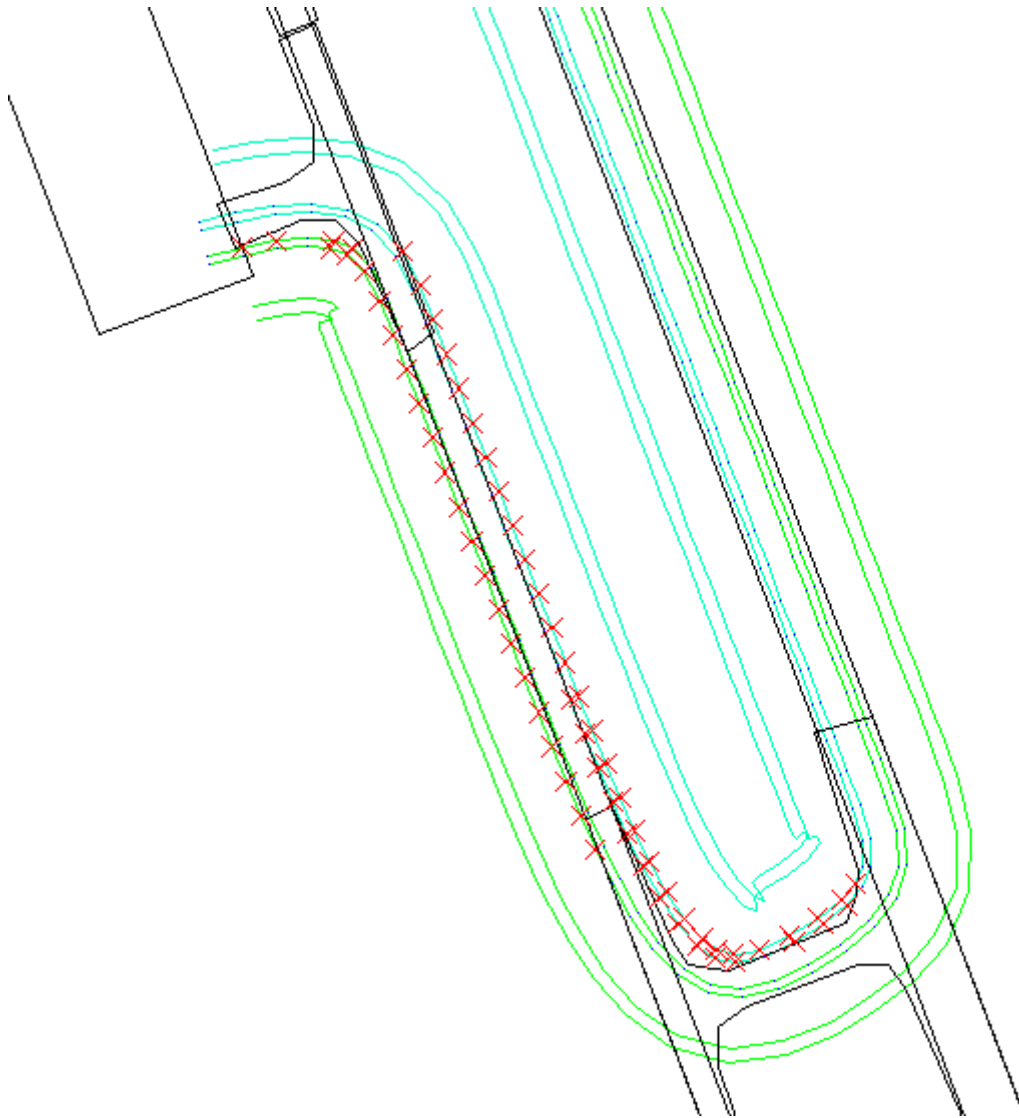
Σημείωση: Στο παραπάνω σχήμα σημειώνονται με κόκκινο χρώμα οι θέσεις στις οποίες οι δεν ικανοποιείται ο έλεγχος των πολυγώνων εμποδίων, δηλαδή εκεί που το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα άκρα των δύο φτερών – συν την απόσταση ασφαλείας – τέμνει κάποιο από τα πολύγωνα εμποδίων.

Παράδειγμα 4: Έλεγχος αεροσκάφους μεγαλύτερων διαστάσεων

Στο τελευταίο παράδειγμα δίνονται ως δεδομένα η χάραξη των προηγούμενων δύο παραδειγμάτων καθώς και όλα τα πολύγωνα ασφαλοστρωμένης επιφάνειας κ εμποδίων όπως στο πρώτο παράδειγμα. Στη συνέχεια επιλέγεται το αεροσκάφος A380 από την λίστα με τους διαθέσιμους τύπους αεροσκαφών και προκύπτουν τα αντίστοιχα σχέδια των τροχιών (Σχήμα 4.26). Σκοπός του παραδείγματος είναι να εντοπιστούν τα προβλήματα που προκύπτουν από την χρησιμοποίηση του αεροδρομίου από έναν μεγαλύτερο τύπο αεροσκάφους. Πράγματι, παρατηρείται από τον έλεγχο οδοστρωμένων επιφανειών (Σχήμα 4.27) που πραγματοποιεί το πρόγραμμα ότι εντοπίζονται όλες οι θέσεις όπου είτε οι τροχοί του αεροσκάφους βρίσκονται εκτός των ορίων των τροχοδρόμων, είτε δεν καλύπτονται τα ελάχιστα απαιτούμενα περιθώρια ασφαλείας.



Σχήμα 4.26 Παράδειγμα πορείας μεγάλου τύπου αεροσκάφους



Σχήμα4.27 Εντοπισμός σφαλμάτων στον έλεγχο πολυγώνων οδοστρωσίας

Σημείωση: Στο προηγούμενο σχήμα επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα τα σημεία όπου δεν ικανοποιείται ο έλεγχος που αφορά στα πολύγωνα ασφαλτοστρωμένων επιφανειών. Παρατηρείται ότι αρχικά προκύπτει πρόβλημα στις καμπύλες του τροχοδρομικού συστήματος, όποτε συμπεραίνεται πως η σχεδιασμένη διαπλάτυνση δεν επαρκεί για την εξυπηρέτηση τέτοιου τύπου αεροσκάφους από το αεροδρόμιο. Ακόμα εντοπίζονται προβλήματα σε όλο το μήκος του τροχοδρόμου, γεγονός το οποίο σημαίνει πως το πλάτος του δεν επαρκεί για τον συγκεκριμένο τύπο αεροσκάφους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

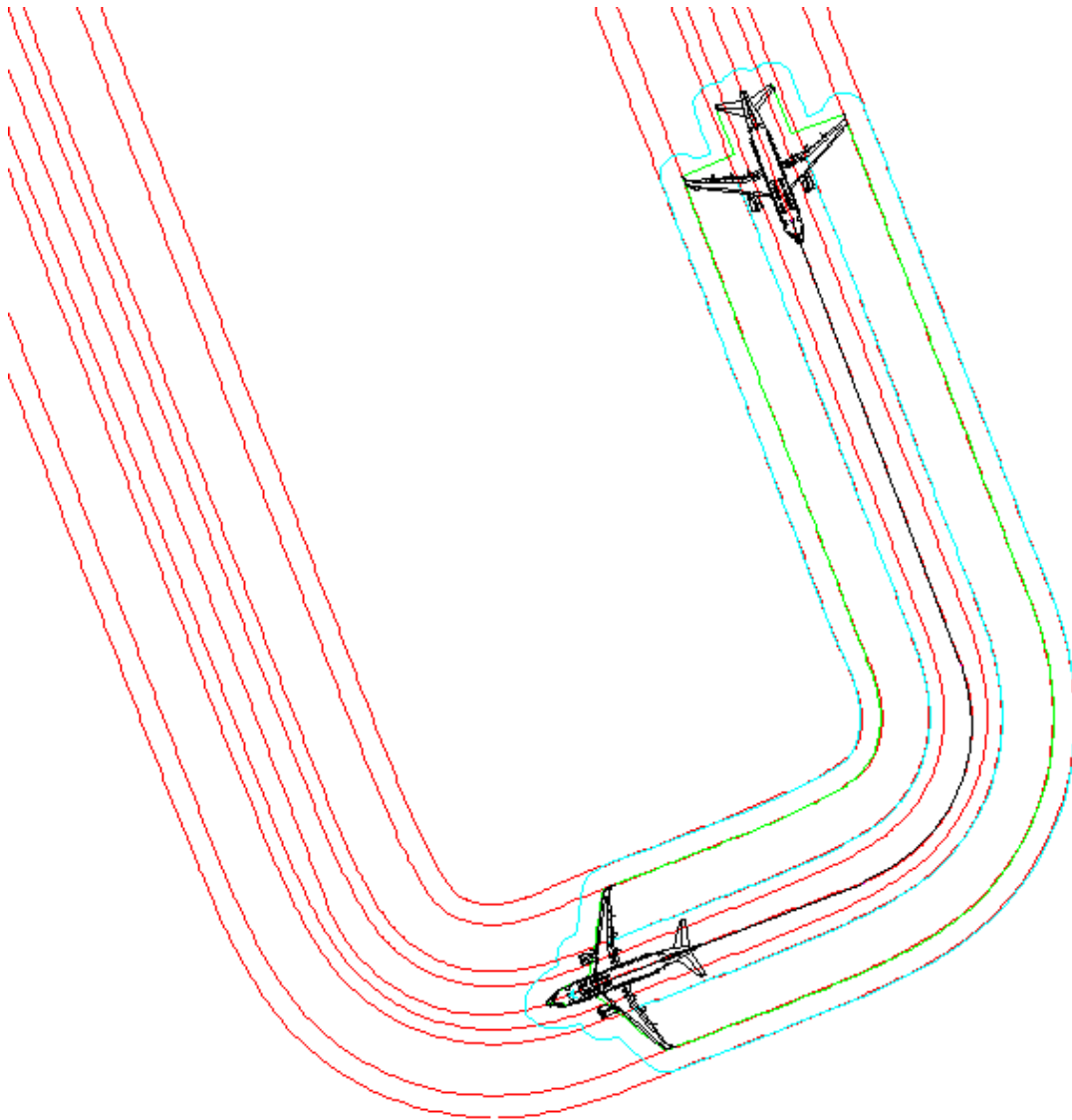
Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της κίνησης του αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα αεροδρομίου. Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια της κίνησης του αεροσκάφους έγινε χρήση του λογισμικού AeroTURN Pro 3D της εταιρείας Transoft Solutions στο σχεδιαστικό περιβάλλον του AutoCAD. Τέλος, παρατίθενται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετική με θέματα σχεδιασμού αεροδρομίων και μελέτης κίνησης αεροσκαφών.

5.1 Συνολικά συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα η μελέτη της κίνησης του αεροσκάφους πραγματοποιείται με την παραδοχή ότι το σημείο αναφοράς του – που ταυτίζεται με τον ρινιαίο τροχό – ακολουθεί την τροχιά του άξονα του τροχοδρόμου η οποία είναι σημειωμένη με χρώμα στο οδόστρωμα. Η παραδοχή αυτή είναι υπέρ της ασφαλείας καθώς αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση προσδιορισμού της διαπλάτυνσης. Ακόμα, τα σχέδια που προκύπτουν από την εφαρμογή του προγράμματος Aircraft Turn (ATR) καθορίζονται σύμφωνα με την γραφική μέθοδο, όπως έχει περιγραφεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφού συμπεραίνεται ότι περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια την κίνηση του αεροσκάφους δεδομένου ότι λαμβάνεται μικρή τιμή βήματος σχεδιασμού.

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του προγράμματος χρησιμοποιείται το πρόγραμμα AeroTURN Pro 3D της Transoft Solutions, το οποίο διαθέτει ένα ευρύ φάσμα τύπων αεροσκαφών και για κάθε δεδομένη τροχιά που επιλέγεται από τον χρήστη σχεδιάζονται οι τροχιές που ακολουθούν οι τροχοί και τα φτερά του αεροσκάφους. Ακόμα ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δώσει οποιαδήποτε τιμή για τα περιθώρια και τις αποστάσεις ασφαλείας, ώστε να προκύψουν και οι αντίστοιχες τροχιές των σημείων αυτών. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο προγραμμάτων για την κίνηση του αεροσκάφους. Σημειώνεται ότι με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι τροχιές όπως προκύπτουν από τον πρόγραμμα ATR, ενώ με πράσινο και μπλε οι τροχιές που προκύπτουν αυτόματα από το AeroTURN Pro 3D, όταν δοθεί ο άξονας που έχει σχεδιαστεί από το ATR.

Από την σύγκριση των δύο αποτελεσμάτων τροχιών παρατηρείται πως δεν υπάρχει αξιοσημείωτη απόκλιση στα ίχνη των τροχών και των φτερών, οπότε συμπεραίνεται πως το πρόγραμμα ATR προσομοιάζει την κίνηση του αεροσκάφους με ικανοποιητική ακρίβεια.



Σχήμα 5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Επιπλέον, βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την εφαρμογή του προγράμματος, είναι πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε αεροδρόμιο, δεδομένου ότι ο χρήστης θα δώσει το μοντέλο εδάφους της περιοχής και τα πολύγωνα ασφαλτοστρωμένης επιφάνειας και επιφανειών των εμποδίων. Έτσι για κάθε τροχιά του αεροσκάφους, που επίσης επιλέγεται από τον χρήστη, πραγματοποιούνται οι αντίστοιχοι έλεγχοι για τα επιμέρους πολύγωνα και επισημαίνονται τα σημεία όπου δεν ικανοποιούνται. Επομένως, συμπεραίνεται πως πρόκειται για ένα χρήσιμο εργαλείο εντοπισμού επικίνδυνων σημείων κατά την κίνηση του αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα.

Ακόμα, από το τελευταίο παράδειγμα εφαρμογής του προγράμματος, συμπεραίνεται πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αποφάσεων που σχετίζεται με το αν μπορεί ένα υφιστάμενο αεροδρόμιο να εξυπηρετήσει έναν μεγαλύτερο τύπο αεροσκάφους. Προφανώς δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μοναδικό κριτήριο για τη λήψη αυτής της απόφασης, εφόσον το μήκος του διαδρόμου αποτελεί το βασικότερο από τα διάφορα κριτήρια, αλλά αποτελεί έναν επιπλέον έλεγχο.

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι είναι πιθανότερο να εντοπιστούν σημεία όπου δεν ικανοποιούνται οι έλεγχοι εξασφάλισης των πολυγώνων οδοστρωσίας στις καμπύλες του τροχοδρομικού συστήματος, οπότε προτείνεται καλύτερος γεωμετρικός σχεδιασμός διαπλατύνσεων, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις των ελάχιστων περιθωρίων ασφαλείας που προτείνουν οι διεθνείς φορείς πολιτικής αεροπορίας. Για τον σκοπό αυτό αναλύθηκαν οι διάφορες μεθοδολογίες υπολογισμού της απαιτούμενης διαπλάτυνσης, από την σύγκριση των οποίων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η γραφική μέθοδος σχεδιασμού διαπλατύνσεων παρέχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών, δεδομένου ότι επιλέγεται ικανοποιητική τιμή βήματος σχεδιασμού, ωστόσο η καμπύλη συναρμογής που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου είναι εξαιρετικά σύνθετη, με αποτέλεσμα να μην είναι κατασκευαστικά δυνατή η πιστή χάραξή της.
- Η μέθοδος τόξου και εφαπτομένης παρέχει σχετικά ικανοποιητική ακρίβεια στον υπολογισμό της απαιτούμενης διαπλάτυνσης χρησιμοποιώντας απλούς υπολογισμούς και το παραγόμενο αποτέλεσμα είναι πολύ πιο εύκολο να κατασκευαστεί και με απόλυτη ακρίβεια.
- Η ταχεία μέθοδος γραφημάτων μειονεκτεί σε σχέση με τις προηγούμενες καθώς απαιτείται δημιουργία ξεχωριστών γραφημάτων για τους διάφορους τύπους αεροσκαφών, οπότε δεν προσφέρει ευρύτητα εφαρμογής.

Επομένως προτείνεται εκ νέου σχεδιασμός του τροχοδρομικού συστήματος με χρήση της μεθόδου τόξου και εφαπτομένης σε περιπτώσεις που δεν ικανοποιείται ο έλεγχος των ασφαλτοστρωμένων επιφανειών.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά την κίνηση του αεροσκάφους σε δισδιάστατο περιβάλλον και ελέγχει την εξασφάλιση των πολυγώνων οδοστρωσίας και εμποδίων μόνο οριζοντιογραφικά. Μία επέκταση του προγράμματος θα μπορούσε να μελετάει την τρισδιάστατη κίνηση του αεροσκάφους στο τροχοδρομικό σύστημα, καθώς και την τρισδιάστατη απεικόνιση των εμποδίων. Με τον τρόπο αυτό θα ήταν εφικτός ο έλεγχος των ελεύθερων επιφανειών που πρέπει να υπάρχουν στην περιοχή του αεροδρομίου.

Μια επιπλέον χρήσιμη επέκταση του προγράμματος είναι η διαστασιολόγηση δαπέδων στάθμευσης. Από το ATR είναι δυνατό να υπολογιστεί και να σχεδιαστεί γραφικά η τροχιά των άκρων των φτερών του αεροσκάφους, υπολογίζοντας ταυτόχρονα και την απαιτούμενη απόσταση ασφαλείας από άλλα εμπόδια. Εισάγοντας ακόμα τον αριθμό των θέσεων στάθμευσης και τις τροχιές των διαδρομών των αεροσκαφών μπορεί να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός των δαπέδων στάθμευσης, δεδομένου ότι έχουν εισαχθεί ήδη στο πρόγραμμα οι διαστάσεις των αεροσκαφών που εξυπηρετεί το αεροδρόμιο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

- Κ.Γ. Αμπακούμκιν (1990). **ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ**. Εκδόσεις Συμμετρία. Αθήνα
- R. de Neufville, A. Odoni, απόδοση και προσαρμογή Β. Ψαράκη-Καλουπτσίδη (2008).**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ, Μελέτη • Σχεδιασμός • Διαχείριση**. Εκδόσεις Παπασωτηρίου. Αθήνα

Διεθνής βιβλιογραφία

- AIRBUS S.A.S. (2014). Aircraft characteristics airport and maintenance planning: **A319/A319NEO**. FRANCE
- AIRBUS S.A.S. (2014). Aircraft characteristics airport and maintenance planning: **A320/A320NEO**. FRANCE
- AIRBUS S.A.S. (2014). Aircraft characteristics airport and maintenance planning: **A321/A321NEO**. FRANCE
- AIRBUS S.A.S. (2014). Aircraft characteristics airport and maintenance planning: **A380**. FRANCE
- Ashford N.and Wright P. H.(1992). **Airport Engineering** – Third Edition. Wiley Interscience
- Boeing Commercial Airplanes (2013). Airplane Characteristics for Airport Planning: **737**. U.S.A.
- Boeing Commercial Airplanes (2013). Airplane Characteristics for Airport Planning: **747**. U.S.A.
- Boeing Commercial Airplanes (2013). Airplane Characteristics for Airport Planning: **757**. U.S.A.
- Boeing Commercial Airplanes (2013). Airplane Characteristics for Airport Planning: **767**. U.S.A.
- FAA (2011). **Airport Cooperative Research Program**. Report 51
- FAA (2014). **Advisory Circular 150/5300-13A, Airport Design**.
- Glushkov G., Babkov V., Goretsky L., Smirnov A. (1988). **Airport Engineering**. Mir Publishers Moscow.

Horonjeff R. (1975). **Planning and Design of Airports** – Second Edition. McGraw-Hill.

ICAO (1996). **Aircraft Type Designators (Doc 8643)**

ICAO (1999). **Design Standards for Licensed Aerodromes**

ICAO (2004). **International Standards and Recommended Practices, Annex14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodrome.**

ICAO (2005). **Aerodrome Design Manual (Doc 9157) - Part 2: Taxiways, Aprons and Holding Bays** – Fourth Edition.

ICAO (2006). **Aerodrome Design Manual (Doc 9157) - Part 1: Runways** – Third Edition.

ICAO (2006). **Airport Planning Manual (Doc 9184)**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ AIRCRAFT TURN – ATR

```
c*****
c
c   ATR.FOR
c
c   Aircraft Turn
c
c*****
c-----
c   subroutine atr
c-----
c-----
c   COMMON
c-----
c-----
c   VARIABLES
c-----
c   real*8   pi           !  $\pi=3.14159265$ 
c   real*8   x,y,z       ! XYZ
c   real*8   azm         ! Azimuth
c   integer*4 napo(100)   ! No
c   real*8   xapo(100,1000),yapo(100,1000) ! Asphalt_Polygons
c   integer*4 nopo(100)   ! No
c   real*8   xopo(100,1000),yopo(100,1000) ! Obstacle_Polygons
c   real*8   xi,yi       ! XY Intersect
c   real*8   xm,ym       ! XY Middle
c-----
c   FILES
c-----
c   character*1 path(999) ! Path
c   character*999 atrdes  ! atr.des
c   character*999 atrdxf  ! atr.dxf
c   character*999 fmprm   ! fm.prm
c   character*999 fm39    ! fm39.dat
c   character*999 fm41    ! fm41.dat
c-----
c   FM.PRM - GENERAL
c-----
c   character*30 ptj      ! Project Name
c-----
c   FM39.DAT
c-----
c   integer*4 i39        ! No
c   integer*4 n39(100000) ! Nane
c   real*8   k39(100000) ! Kilometrage
c   real*8   x39(100000) ! X
c   real*8   y39(100000) ! Y
c   real*8   z39(100000) ! Z
c   real*8   g39(100000) ! Grade
c   real*8   v39(100000) ! Vertical Curvature
c   real*8   a39(100000) ! Azimuth
c   real*8   h39(100000) ! Horizontal Curvature
c-----
```

```

c  AIRCRAFT
c-----
real*8   xa(29),ya(29)      ! Aircraft Polygon
real*8   xw(2,100000) ,yw(2,100000) ! Wing Path
real*8   xt(2,100000) ,yt(2,100000) ! Tyre Path
real*8   xwe(2,100000),ywe(2,100000) ! Wing Path Extension
real*8   xte(2,100000),yte(2,100000) ! Tyre Path Extension
c-----
c  GRAPHICS
c-----
real*8   xs(100000)        ! X String
real*8   ys(100000)        ! Y String
real*8   zs(100000)        ! Z String
c-----
c  START PROGRAM
c-----
call g('Στροφή Αεροσκάφους - AT - H14',29,1)
c-----
c  KEYBOARD INPUT
c-----
101 call g('Δώσε μου Α/Φ',12,2)
write(*,(' 1 = A319'))
write(*,(' 2 = A320'))
write(*,(' 3 = A321'))
write(*,(' 4 = A380'))
write(*,(' 5 = B737-800'))
write(*,(' 6 = B757-200'))
write(*,(' 7 = B767-300'))
write(*,(' 8 = B747-800'))
call g("",0,1)
read(*,*) iat
if(iat.lt.1.or.iat.gt.8) goto 101
c-----
c  A319
c-----
if(iat.eq.1) then
xa(1)=0
ya(1)=0
xa(2)=5.070
ya(2)=0
xa(3)=0
ya(3)=1.975
xa(4)=-6.152
ya(4)=1.975
xa(5)=-14.365
ya(5)=17.891
xa(6)=-16.790
ya(6)=17.891
xa(7)=-12.151
ya(7)=1.975
xa(8)=-24.045
ya(8)=1.975
xa(9)=-26.723
ya(9)=6.225
xa(10)=-27.984
ya(10)=6.225
xa(11)=-26.560
ya(11)=0
xa(12)=-27.984
ya(12)=-6.225

```

```
xa(13)=-26.723
ya(13)=-6.225
xa(14)=-24.045
ya(14)=-1.975
xa(15)=-12.151
ya(15)=-1.975
xa(16)=-16.790
ya(16)=-17.891
xa(17)=-14.365
ya(17)=-17.891
xa(18)=-6.152
ya(18)=-1.975
xa(19)=0
ya(19)=-1.975
xa(20)=5.070
ya(20)=0
xa(21)=-11.039
ya(21)=0
xa(22)=-11.039
ya(22)=4.474
xa(23)=-11.039
ya(23)=-4.474
xa(24)=-11.039
ya(24)=7.474
xa(25)=-11.039
ya(25)=-7.474
xa(26)=-16.790
ya(26)=22.391
xa(27)=-16.790
ya(27)=-22.391
xa(28)=-14.365
ya(28)=22.391
xa(29)=-14.365
ya(29)=-22.391
end if
```

c-----

c A380

c-----

```
if(iat.eq.4) then
xa(1)=0
ya(1)=0
xa(2)=4.972
ya(2)=0
xa(3)=0
ya(3)=3.571
xa(4)=-13.666
ya(4)=3.571
xa(5)=-42.153
ya(5)=39.875
xa(6)=-47.019
ya(6)=39.875
xa(7)=-31.999
ya(7)=3.913
xa(8)=-55.312
ya(8)=3.913
xa(9)=-63.528
ya(9)=15.186
xa(10)=-67.599
ya(10)=15.186
xa(11)=-62.241
```

```
ya(11)=0
xa(12)=-67.599
ya(12)=-15.186
xa(13)=-63.528
ya(13)=-15.186
xa(14)=-55.312
ya(14)=-3.913
xa(15)=-31.999
ya(15)=-3.913
xa(16)=-47.019
ya(16)=-39.875
xa(17)=-42.153
ya(17)=-39.875
xa(18)=-13.666
ya(18)=-3.571
xa(19)=0
ya(19)=-3.571
xa(20)=4.972
ya(20)=0
xa(21)=-30.244
ya(21)=0
xa(22)=-30.244
ya(22)=7.168
xa(23)=-30.244
ya(23)=-7.168
xa(24)=-30.244
ya(24)=11.668
xa(25)=-30.244
ya(25)=-11.668
xa(26)=-47.019
ya(26)=47.375
xa(27)=-47.019
ya(27)=-47.375
xa(28)=-42.153
ya(28)=47.375
xa(29)=-42.153
ya(29)=-47.375
end if
```

c-----
c B737-800
c-----

```
if(iat.eq.5) then
xa(1)=0
ya(1)=0
xa(2)=4.090
ya(2)=0
xa(3)=0
ya(3)=1.880
xa(4)=-10.820
ya(4)=1.880
xa(5)=-19.396
ya(5)=17.160
xa(6)=-20.900
ya(6)=17.160
xa(7)=-17.317
ya(7)=1.880
xa(8)=-30.159
ya(8)=1.880
xa(9)=-33.775
ya(9)=7.180
```

```
xa(10)=-35.380
ya(10)=7.180
xa(11)=-30.156
ya(11)=0
xa(12)=-35.380
ya(12)=-7.180
xa(13)=-33.775
ya(13)=-7.180
xa(14)=-30.159
ya(14)=-1.880
xa(15)=-17.317
ya(15)=-1.880
xa(16)=-20.900
ya(16)=-17.160
xa(17)=-19.396
ya(17)=-17.160
xa(18)=10.820
ya(18)=-1.880
xa(19)=0
ya(19)=-1.880
xa(20)=4.090
ya(20)=0
xa(21)=-15.600
ya(21)=0
xa(22)=-15.600
ya(22)=3.500
xa(23)=-15.600
ya(23)=-3.500
xa(24)=-15.600
ya(24)=6.500
xa(25)=-15.600
ya(25)=-6.500
xa(26)=-20.900
ya(26)=21.660
xa(27)=-20.900
ya(27)=21.660
xa(28)=-19.396
ya(28)=-21.660
xa(29)=-19.396
ya(29)=-21.660
end if
```

```
c-----
c  B747-800
c-----
```

```
if(iat.eq.8) then
xa(1)=0
ya(1)=0
xa(2)=7.75
ya(2)=0
xa(3)=0
ya(3)=2.729
xa(4)=-16.821
ya(4)=3.250
xa(5)=-45.347
ya(5)=34.200
xa(6)=-47.499
ya(6)=34.200
xa(7)=-31.388
ya(7)=3.250
xa(8)=-57.780
```

```
ya(8)=3.250
xa(9)=-65.045
ya(9)=11
xa(10)=-67.500
ya(10)=11
xa(11)=-65.589
ya(11)=0
xa(12)=-67.500
ya(12)=-11
xa(13)=-65.045
ya(13)=-11
xa(14)=-57.780
ya(14)=-3.250
xa(15)=-31.388
ya(15)=-3.250
xa(16)=-47.499
ya(16)=-34.200
xa(17)=-45.347
ya(17)=-34.200
xa(18)=-16.821
ya(18)=-3.250
xa(19)=0
ya(19)=-2.729
xa(20)=7.75
ya(20)=0
xa(21)=-29.670
ya(21)=0
xa(22)=-29.670
ya(22)=6.336
xa(23)=-29.670
ya(23)=-6.336
xa(24)=-29.670
ya(24)=10.836
xa(25)=-29.670
ya(25)=-10.836
xa(26)=-47.499
ya(26)=41.700
xa(27)=-47.499
ya(27)=-41.700
xa(28)=-45.347
ya(28)=41.700
xa(29)=-45.347
ya(29)=-41.700
end if
```

c-----

c FILES

c-----

```
call g('Αρχεία',6,1)
call pathfile(path)
call flnm(path,'atr.des ',atrdes)
call flnm(path,'atr.dxf ',atrdxf)

call flnm(path,'fm.prm ',fmprm)
call flnm(path,'fm39.dat ',fm39)
call flnm(path,'fm41.dat ',fm41)
```

c-----

c READ FM.PRM

c-----

```
call prn(fmprm)
```

c-----


```

c CHECK IF ATR.DXF IS OPEN IN AUTOCAD / MICROSTATION
c-----
call g('Είναι ελεύθερο το atr.dxf;',27,1)
open(0,file=atrdes,status='unknown')
write(0,('Message'))
write(0,('ATR'))
close (0)
call dxf(3,atrdes,atrdxf)
c-----
c INITIAL VALUES
c-----
call g('Αρχικές Τιμές ',14,1)
pi=3.14159265
c-----
c START DESIGN FILE
c-----
call g('Ανοίγω το atr.des',17,1)
open(0,file=atrdes,status='unknown')
write(0,('Message'))
write(0,('ATR'))
c-----
c FM39.DAT
c-----
call r39(fm39,i39,n39,k39,x39,y39,z39,g39,v39,a39,h39)
do i=1,i39
end do
if(i39.eq.0) then
call pzs
end if
call string(2,3,4,0,0,i39,x39,y39,z39)
c-----
c AIRCRAFT
c-----
do i=1,i39
c call point(2,3,4,x39(i),y39(i),z39(i))
if(i.ne.1) then
call azimuth(xm,ym,x39(i),y39(i),azm)
end if
c if(i.ne.1) call azimuth(x39(i-1),y39(i-1),x39(i),y39(i),azm)
if(i.eq.1) call azimuth(x39(1),y39(1),x39(2),y39(2),azm)
azm=100-azm
do j=2,29
xs(j)=xa(j)*cos(azm*pi/200)-ya(j)*sin(azm*pi/200)+x39(i)
ys(j)=xa(j)*sin(azm*pi/200)+ya(j)*cos(azm*pi/200)+y39(i)
zs(j)=z
end do
xs(1)=xs(2)
ys(1)=ys(2)
zs(1)=zs(2)
xm=xs(21)
ym=ys(21)

c if(dfloat(i)/100.-i/100.lt.0.001) then
call string(3,0,0,0,0,20,xs,ys,zs)
c end if
if(i.eq.1) call string(3,0,0,0,0,20,xs,ys,zs)
if(i.eq.i39) call string(3,0,0,0,0,20,xs,ys,zs)
c call point(3,2,4,xs(6),ys(6),zs(6))
c call point(4,7,4,xs(16),ys(16),zs(16))
c call point(5,2,4,xs(22),ys(22),zs(22))

```

```

c  call point(6,7,4,xs(23),ys(23),zs(23))
   xw(1,i)=xs(6)
   yw(1,i)=ys(6)
   xw(2,i)=xs(16)
   yw(2,i)=ys(16)
   xt(1,i)=xs(22)
   yt(1,i)=ys(22)
   xt(2,i)=xs(23)
   yt(2,i)=ys(23)
   xwe(1,i)=xs(26)
   ywe(1,i)=ys(26)
   xwe(2,i)=xs(27)
   ywe(2,i)=ys(27)
   xte(1,i)=xs(24)
   yte(1,i)=ys(24)
   xte(2,i)=xs(25)
   yte(2,i)=ys(25)
   end do
   do i=1,i39
   xs(i)=xw(1,i)
   ys(i)=yw(1,i)
   end do
   call string(7,2,2,0,0,i39,xs,ys,zs)
   do i=1,i39
   xs(i)=xw(2,i)
   ys(i)=yw(2,i)
   end do
   call string(8,7,2,0,0,i39,xs,ys,zs)
   do i=1,i39
   xs(i)=xt(1,i)
   ys(i)=yt(1,i)
   end do
   call string(9,2,0,0,0,i39,xs,ys,zs)
   do i=1,i39
   xs(i)=xt(2,i)
   ys(i)=yt(2,i)
   end do
   call string(10,7,0,0,0,i39,xs,ys,zs)
   do i=1,i39
   xs(i)=xwe(1,i)
   ys(i)=ywe(1,i)
   end do
   call string(7,2,2,0,0,i39,xs,ys,zs)
   do i=1,i39
   xs(i)=xwe(2,i)
   ys(i)=ywe(2,i)
   end do
   call string(8,7,2,0,0,i39,xs,ys,zs)
   do i=1,i39
   xs(i)=xte(1,i)
   ys(i)=yte(1,i)
   end do
   call string(9,2,0,0,0,i39,xs,ys,zs)
   do i=1,i39
   xs(i)=xte(2,i)
   ys(i)=yte(2,i)
   end do
   call string(10,7,0,0,0,i39,xs,ys,zs)

```

c-----
c ASPHALT POLYGONS - FM.APO

```

c-----
call g('Πολύγωνα Ασφάλτου',17,2)
open(1,file='fm.apo',status='unknown')
i=1
j=0
do while(.not.eof(1))
read(1,*) x,y
if(int(x*1000)+int(y*1000).eq.0) then
i=i+1
j=0
end if
if(int(x*1000)+int(y*1000).ne.0) then
j=j+1
xapo(i,j)=x
yapo(i,j)=y
napo(i)=j
end if
write(*,'(2i5,2f12.3)') i,j,x,y
end do
iapo=i-1
close (1)
do i=1,iapo
is=1
do j=1,napo(i)
xs(j)=xapo(i,j)
ys(j)=yapo(i,j)
end do
call string(11,0,0,0,0,napo(i),xs,ys,zs)
end do

```

```

c-----
c CHECK WHEELS FOR ASPHALT POLYGON
c-----

```

```

do i=1,2
do j=1,i39
c call point(12,0,2,xt(i,j),yt(i,j),z)
iw=0
iwe=0
do k=1,iapo
do l=1,napo(k)
if(l.eq.1) is=0
is=is+1
xs(l)=xapo(k,l)
ys(l)=yapo(k,l)
end do
call inside(xt(i,j),yt(i,j),is,xs,ys,js)
if(js.eq.0) iw=1
call inside(xte(i,j),yte(i,j),is,xs,ys,js)
if(js.eq.0) iwe=1
end do
if(iw.eq.1) call point(12,1,4,xt(i,j),yt(i,j),z)
if(iw.eq.0) then
xi=xt(i,j)
yi=yt(i,j)
call point(12,3,4,xi,yi,z)
call line(12,3,0,0,xi+5,yi+5,z,xi-5,yi-5,z)
call line(12,3,0,0,xi+5,yi-5,z,xi-5,yi+5,z)
end if
if(iwe.eq.1) call point(12,1,4,xte(i,j),yte(i,j),z)
if(iwe.eq.0) then
xi=xte(i,j)

```

```

yi=yte(i,j)
call point(12,3,4,xi,yi,z)
call line(12,3,0,0,xi+5,yi+5,z,xi-5,yi-5,z)
call line(12,3,0,0,xi+5,yi-5,z,xi-5,yi+5,z)
end if
end do
end do

```

```

c-----
c  OBSTACLE POLYGONS - FM.OPO
c-----

```

```

call g('Πολύγωνα Εμποδίων',17,2)
open(1,file='fm.opo',status='unknown')
i=1
j=0
do while(.not.eof(1))
read(1,*) x,y
if(int(x*1000)+int(y*1000).eq.0) then
i=i+1
j=0
end if
if(int(x*1000)+int(y*1000).ne.0) then
j=j+1
xopo(i,j)=x
yopo(i,j)=y
nopo(i)=j
end if
write(*,'(2i5,2f12.3)') i,j,x,y
end do
iopo=i-1
close (1)
do i=1,iopo
is=1
do j=1,nopo(i)
xs(j)=xopo(i,j)
ys(j)=yopo(i,j)
end do
call string(13,7,0,0,0,nopo(i),xs,ys,zs)
end do

```

```

c-----
c  CHECK WINGS FOR OBSTACLE POLYGONS
c-----

```

```

do i=1,i39
c  call line(14,0,0,0,xwe(1,i),ywe(1,i),z,xwe(2,i),ywe(2,i),z)
do j=1,iopo
do k=2,nopo(j)
call t2l(xwe(1,i),ywe(1,i),xwe(2,i),ywe(2,i)
1,xopo(j,k-1),yopo(j,k-1),xopo(j,k),yopo(j,k),xi,yi,itm)
if(itm.eq.0) stop
if(itm.eq.1) then
if((xi-xwe(1,i))*(xi-xwe(2,i)).lt.0) then
if((xi-xopo(j,k-1))*(xi-xopo(j,k)).lt.0) then
call point(14,3,4,xi,yi,z)
call line(14,3,0,0,xi+5,yi+5,z,xi-5,yi-5,z)
call line(14,3,0,0,xi+5,yi-5,z,xi-5,yi+5,z)
end if
end if
end if
end do
end do
end do

```

```
c-----  
c  FINISH DESIGN FILE  
c-----  
  call g('Κλείνω το atr.des',17,1)  
  close (0)  
c-----  
c  DXF FILE  
c-----  
  call dxf(46,atrdes,atrdxf)  
c-----  
c  FINISH PROGRAM  
c-----  
  call gc30('Έργο : ',7,prj,1)  
  call g('Στροφή Αεροσκάφους - ATR - H14',30,1)  
  call g('Άντε Γεια',9,1)  
  call interval  
c-----  
  end  
c-----
```