



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

## ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ  
ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΤΕΛΕΙΩΝΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΝΙΚΗ ΚΥΡΙΑΖΑΚΟΥ

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2020



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ θερμά τους Λέκτορες Ε. Τελειώνη και Γ. Γεωργόπουλο, για την ανάθεση της Διπλωματικής Εργασίας, για την άριστη συνεργασία και κατανόηση κατά την διάρκεια της εκπόνησης της και για την υποστήριξη σε όλα τα επίπεδα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ηλία Βέλιο, Μηχανικό Αεροσκαφών της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας, καθώς και όλο το προσωπικό της Υπηρεσίας για τη χορήγηση της άδειας για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στο αεροσκάφος, για την πολύτιμη συνεργασία και διευκόλυνση σε όλη τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω το συμφοιτητή μου Χρίστο Αρβανίτη για την πολύ σημαντική βοήθεια του.

Τέλος θερμές ευχαριστίες οφείλονται στην οικογένεια μου, για τη μεγάλη βοήθεια και την ουσιαστική υποστήριξη σε ολόκληρη την διάρκεια των σπουδών μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συμβολή της Γεωδαισίας στο γεωμετρικό έλεγχο των κατασκευών είναι καθοριστική, τόσο κατά τη φάση της δημιουργίας (υλοποίησης) τους, όσο και κατά τη λειτουργία τους. Σήμερα, ειδικότερα σε βιομηχανικά παράγωγα (π.χ. σκάφη, αεροσκάφη, οχήματα κ.λπ.) η Γεωδαιτική Μεθοδολογία, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας, είναι σε θέση να συμβάλλει τόσο κατά το στάδιο της κατασκευής – συναρμολόγησής τους, όσο και κατά το στάδιο της λειτουργίας τους δίνοντας τεκμηριωμένες και αξιόπιστες απαντήσεις σε θέματα παραμορφώσεών τους.

Έτσι, δημιουργήθηκε ένας νέος κλάδος της Γεωδαισίας, αυτός της Βιομηχανικής Γεωδαισίας. Στη Βιομηχανική Γεωδαισία προσδιορίζεται με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια η θέση (X, Y, H) σημείων του αντικειμένου με σκοπό τον έλεγχο πιθανών παραμορφώσεων του. Ταυτόχρονα, είναι δυνατόν να ελεγχθεί η γεωμετρία του και να γίνει η σύγκριση με τα κατασκευαστικά σχέδια, για να διαπιστωθεί αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές αποκλίσεις, οι οποίες βρίσκονται εκτός των ανοχών που δίνονται από σχετικούς κανονισμούς.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως αντικείμενο το γεωμετρικό έλεγχο του υποηχητικού αεροσκάφους Beech Super King Air 200 της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας, με σκοπό την ανίχνευση και τον προσδιορισμό των πιθανών παραμορφώσεων και των αποκλίσεων των διαστάσεών του μετά από αρκετές ώρες πτήσης, μέσω της δημιουργίας του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου του.

Για το σκοπό αυτό ιδρύθηκε δίκτυο οριζόντιου ελέγχου πάνω και περιμετρικά από το αεροσκάφος. Τα στοιχεία του δικτύου, μετρήθηκαν και συνορθώθηκαν με τη Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων και εκτιμήθηκαν οι συντεταγμένες των κορυφών του.

Στη συνέχεια, από τις κορυφές του δικτύου, που ιδρύθηκαν περιμετρικά από το αεροσκάφος, πραγματοποιήθηκε η σάρωση του, με χρήση επίγειου τρισδιάστατου laser σαρωτή και δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία έγινε ο έλεγχος για τη δυνατότητα ανίχνευσης πιθανών παραμορφώσεων στην επιφάνεια της ατράκτου. Επίσης, εκτιμήθηκαν οι βασικές διαστάσεις του αεροσκάφους, οι οποίες συγκρίθηκαν με εκείνες που αναφέρονται στα κατασκευαστικά σχέδια, με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών αποκλίσεων.



## **ABSTRACT**

This diploma thesis has as subject the control of the geometric features of an aircraft using the geodetic methodology. This aircraft is a Beech Super King Air 200 model, was used by the Greek Civil Aviation Authority, and is, for the last two years, landing at the premises of the Athens International Airport "Eleftherios Venizelos".

For this purpose the 3D model of the aircraft created using 3D laser scanning technology. The scanning of the total surface of the aircraft was performed with the 3D terrestrial laser scanner Leica ScanStation2, from the points of a geodetic horizontal control network established, for this purpose, at the vicinity and on the aircraft's fuselage. The points cloud was georeferenced in the network's reference system, that was selected in such a way that georeferencing would be in the system even if the object (aircraft) had moved from its initial position.

For the estimation of the aircraft's geometric features cross sections, perpendicular to axes X or Y of the reference system were created. The following geometric feature were estimated:

- The wings' span
- The axial distance between the back rear wheels' systems
- The horizontal stabilizer's span
- The distance of the front rear wheel from the back rear wheels' systems axis, and
- The total axial length of the aircraft.

These features were compared against aircraft's dimensions given in the maintenance manual, that was provided by Civil Aviation Authority. The estimated divergences were tested for their statistical significance for confidence level 68%. Statistically significant divergences were detected concerning :

- The aircraft's total axial length (12.2cm), and
- The distance of the front rear wheel from the back rear wheels' systems axis (16mm)





## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	1
Κεφάλαιο 1 .....	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Γενικά .....	9
1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας .....	9
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας .....	9
Κεφάλαιο 2 .....	11
ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ - ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ .....	11
2.1 Γενικά .....	13
2.2 Τύποι Αεροσκαφών - Μέρη Αεροσκάφους .....	13
2.2.1 Τύποι Αεροσκαφών.....	13
2.2.2 Κύρια Μέρη Αεροσκάφους.....	14
2.3 Ελεγχόμενο Αεροσκάφος .....	16
2.3.1Κατασκευαστικά Σχέδια.....	19
Κεφάλαιο 3 .....	23
ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	23
3.1 Γενικά .....	25
3.2 Ορισμός Συστήματος Αναφοράς (Σ.Α.) .....	25
3.3 Αναγνώριση – Ίδρυση γεωδαιτικού δικτύου .....	26
3.4 Εξοπλισμός .....	29
3.5 Έλεγχοι .....	30
3.5.1 Έλεγχος σταθεράς οργάνου - καταφώτου .....	30
3.6 Βελτιστοποίηση Δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου.....	31
3.7 Μετρήσεις Στοιχείων Δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου .....	33
3.8 Συνόρθωση Παρατηρήσεων – Επίλυση Δικτύου.....	35
3.9 Στατιστικοί Έλεγχοι .....	36
3.9.1 Ολικός Έλεγχος αξιοπιστίας – Test $\chi^2$ .....	36
3.9.2 Έλεγχος Παρατηρήσεων (Σάρωση Δεδομένων κατά Baarda).....	36
3.10 Προσδιορισμός υψομέτρων κορυφών δικτύου.....	38
Κεφάλαιο 4 .....	41
ΣΑΡΩΣΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ .....	41
4.1 Γενικά .....	43

4.2 Εξοπλισμός Σάρωσης .....	43
4.3 Διαδικασία Σάρωσης.....	44
<b>Κεφάλαιο 5 .....</b>	<b>49</b>
<b>ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ.....</b>	<b>49</b>
5.1 Γενικά .....	51
5.2 Διαδικασία Μοντελοποίησης .....	51
5.3 Αξιολόγηση Μοντελοποιημένης Επιφάνειας .....	58
5.3.1 Εκτίμηση του μεγέθους της ελάχιστης ανιχνεύσιμης παραμόρφωσης.....	60
<b>Κεφάλαιο 6 .....</b>	<b>65</b>
<b>ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ – ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ .....</b>	<b>65</b>
6.1 Γενικά .....	67
6.2 Τομές για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους με επίπεδα κάθετα στον άξονα Χ ή στον άξονα Υ.....	67
6.3 Προσδιορισμός Γεωμετρικών Στοιχείων Αεροσκάφους και Σύγκριση με τα Κατασκευαστικά Σχέδια.....	70
6.3.1 Έλεγχος Ανοίγματος Πτερύγων.....	70
6.3.2 Έλεγχος Αξονικής Απόστασης Οπίσθιων Τροχών .....	72
6.3.3 Έλεγχος Ανοίγματος Οριζόντιου Σταθεροποιητή .....	72
6.3.4 Έλεγχος απόστασης εμπρόσθιου τροχού από τον άξονα του συστήματος των οπίσθιων τροχών .....	74
6.3.5 Έλεγχος Μήκους Αεροσκάφους.....	77
6.4 Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας αποκλίσεων.....	78
<b>Κεφάλαιο 7 .....</b>	<b>81</b>
<b>ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ .....</b>	<b>81</b>
7.1 Γενικά .....	83
<b>Κεφάλαιο 8 .....</b>	<b>87</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ –ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>87</b>
8.1 Γενικά .....	89
8.2 Συμπεράσματα .....	89
8.3 Προτάσεις.....	90
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>91</b>
<b>ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>91</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι .....</b>	<b>93</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ .....</b>	<b>97</b>

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ**

<b>Εικόνα 2.1:</b> Κύρια Τμήματα Αεροσκάφους .....	15
<b>Εικόνα 2.2:</b> Αεροσκάφος Beech King Air 100 .....	17
<b>Εικόνα 2.3:</b> Αεροσκάφος Beech Super King Air 200 .....	18
<b>Εικόνα 2.4:</b> Διαφοροποίηση των δύο μοντέλων στο ουραίο πτέρωμα.....	18
<b>Εικόνα 2.5:</b> Αεροσκάφος Beech Super King Air 200 SX ECG της Υ.Π.Α.....	19
<b>Εικόνα 2.6:</b> Διαστάσεις Αεροσκάφους .....	20
<b>Εικόνα 2.7:</b> Διάγραμμα σταθμών αεροπλάνου.....	21
<b>Εικόνα 3.1:</b> Κορυφή Σ1 στο ρύγχος της ατράκτου του αεροσκάφους .....	27
<b>Εικόνα 3.2:</b> Κορυφή Σ2 στο μέσον της ουράς της ατράκτου του αεροσκάφους .....	27
<b>Εικόνα 3.3:</b> Κορυφή Σ3 στο δεξιό μέρος της ατράκτου.....	28
<b>Εικόνα 3.4:</b> Κορυφή Σ4 στο αριστερό μέρος της ατράκτου .....	28
<b>Εικόνα 3.5:</b> Ειδικό Πρίσμα .....	29
<b>Εικόνα 3.6:</b> Ειδική Βάση για τη σημειακή εφαρμογή της σταδίας .....	38
<b>Εικόνα 4.1:</b> Συνένωση επιμέρους νεφών σημείων .....	46
<b>Εικόνα 4.2:</b> Νέφος σημείων μετά την αφαίρεση του θορύβου .....	47
<b>Εικόνα 4.3:</b> Αποτέλεσμα σάρωσης με πραγματικά χρώματα .....	47
<b>Εικόνα 5.1:</b> Νέφος στο λογισμικό Geomagic Studio .....	51
<b>Εικόνα 5.2:</b> Χρωματισμός και φωτισμός νέφους σημείων στο Geomagic Studio .....	52
<b>Εικόνα 5.3:</b> Περιττά σημεία προς απαλοιφή στο Geomagic.....	52
<b>Εικόνα 5.4:</b> Μοντελοποιημένη πάνω επιφάνεια του αεροσκάφους μετά την εντολή Wrap....	54
<b>Εικόνα 5.5:</b> Μοντελοποιημένη κάτω επιφάνεια του αεροσκάφους μετά την εντολή Wrap.....	55
<b>Εικόνα 5.6:</b> Τελική μοντελοποιημένη πάνω επιφάνεια του αεροσκάφους .....	56
<b>Εικόνα 5.7:</b> Τελική μοντελοποιημένη κάτω επιφάνεια του αεροσκάφους .....	57
<b>Εικόνα 5.8:</b> Πηδάλιο ελέγχου κλίσης του αεροσκάφους .....	58
<b>Εικόνα 5.9:</b> Πηδάλιο ελέγχου κλίσης στη μοντελοποιημένη επιφάνεια .....	58
<b>Εικόνα 5.10:</b> Εξαερισμός Αεροσκάφους.....	58
<b>Εικόνα 5.11:</b> Εξαερισμός στη μοντελοποιημένη επιφάνεια .....	58
<b>Εικόνα 5.12:</b> Παραμόρφωση (εξόγκωμα) στη θέση 389.75in της ατράκτου.....	59
<b>Εικόνα 5.13:</b> Αποτέλεσμα μοντελοποιημένης επιφάνειας στη θέση 389.75in .....	60
<b>Εικόνα 5.14:</b> Τομές ατράκτου στη θέση 389.75in στο AutoCad. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η μοντελοποιημένη επιφάνεια και με κόκκινο τα σημεία του σημειοσυνόλου .....	61
<b>Εικόνα 5.15:</b> Θέσεις των τομών στην άτρακτο του αεροσκάφους .....	62
<b>Εικόνα 5.16:</b> Θέσεις τομών στη μοντελοποιημένη επιφάνεια .....	62
<b>Εικόνα 5.17:</b> Τομές αεροσκάφους στο AutoCAD.....	63
<b>Εικόνα 6.1:</b> Άξονας Χ στο λογισμικό Cyclone .....	68
<b>Εικόνα 6.2:</b> Τομή παράλληλη στο επίπεδο Χ-Z του αεροσκάφους .....	68
<b>Εικόνα 6.3:</b> Σύγκριση σημειοσυνόλου με τη μοντελοποιημένη επιφάνεια σε τροχό του αεροσκάφους.....	69
<b>Εικόνα 6.4:</b> Άνοιγμα Πτερύγων .....	70
<b>Εικόνα 6.5:</b> Διάγραμμα σταθμών, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η θέση της τομής.....	71
<b>Εικόνα 6.6:</b> Τομή στη θέση 207 στο Cyclone για προσδιορισμό ανοίγματος πτερύγων .....	71

<b>Εικόνα 6.7:</b> Τομή στη θέση 207in για τον προσδιορισμό της αξονικής απόστασης των συστημάτων των οπίσθιων τροχών .....	72
<b>Εικόνα 6.8:</b> Άνοιγμα οριζόντιου ουραίου πτερυγίου .....	73
<b>Εικόνα 6.9:</b> Τομή για τον προσδιορισμό του ανοίγματος του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου .....	73
<b>Εικόνα 6.10:</b> Αξονική απόσταση εμπρόςθιου –οπίσθιων τροχών .....	74
<b>Εικόνα 6.11:</b> Μήκος αεροσκάφους κατά το διαμήκη .....	77
<b>Εικόνα 6.12:</b> Τομή κατά μήκος του διαμήκη άξονα κατά το επίπεδο Y=1000m για τον προσδιορισμό του μήκους του αεροσκάφους .....	77

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

<b>Διάγραμμα 3.1:</b> Διάγραμμα Βελτιστοποίησης.....	33
<b>Διάγραμμα 4.1:</b> Διάγραμμα ροής έναρξης σάρωσης .....	44
<b>Διάγραμμα 4.2:</b> Διάγραμμα ροής γεωαναφοράς νέφους σημείων .....	45
<b>Διάγραμμα 5.1:</b> Διάγραμμα ροής εργασιών για τη δημιουργία της μοντελοποιημένης επιφάνειας.....	54
<b>Διάγραμμα 7.1:</b> Κατανομή εργασιών Διπλωματικής εργασίας .....	83
<b>Διάγραμμα 7.2:</b> κατανομή εργασιών υπαίθρου .....	84
<b>Διάγραμμα 7.3:</b> Κατανομή εργασιών γραφείου .....	85

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

<b>Σχήμα 3.1:</b> Δίκτυο οριζοντίου ελέγχου.....	26
<b>Σχήμα 3.2:</b> Διάταξη δικτύου βελτιστοποίησης.....	31
<b>Σχήμα 6.1:</b> Γραμμική απόκλιση οπίσθιων τροχών .....	76
<b>Σχήμα 6.2:</b> Διάταξη τροχών .....	76

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**

<b>Πίνακας 2.1:</b> Προδιαγραφές Beech Super King Air 200 .....	17
<b>Πίνακας 2.2:</b> Διαστάσεις Αεροσκάφους.....	22
<b>Πίνακας 3.1:</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικού σταθμού Topcon GPT3107N.....	29
<b>Πίνακας 3.2:</b> Στοιχεία δικτύου οριζόντιου ελέγχου .....	34
<b>Πίνακας 3.3:</b> Στοιχεία επίλυσης δικτύου .....	35
<b>Πίνακας 3.4:</b> Συντεταγμένες οριζοντίου δικτύου και οι αβεβαιότητες τους.....	35
<b>Πίνακας 3.5:</b> Σάρωση παρατηρήσεων κατά Baarda.....	37
<b>Πίνακας 3.6:</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά ψηφιακού χωροβάτη Leica Sprinter 150M .....	38
<b>Πίνακας 3.7:</b> Υψόμετρα κορυφών του Δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου με τις αβεβαιότητες τους .....	39
<b>Πίνακας 4.1:</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά σαρωτή Leica ScanStation 2 .....	43
<b>Πίνακας 4.2:</b> Αποτελέσματα Γεωαναφοράς.....	46

<b>Πίνακας 6.1:</b> Θέσεις και επίπεδα τομών για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους .....	69
<b>Πίνακας 6.2:</b> Συντεταγμένες των κέντρων των προσαρμοσμένων κύκλων .....	75
<b>Πίνακας 6.3:</b> Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας της διαφοράς $\delta D$ .....	79



# **Κεφάλαιο 1**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**





## 1.1 Γενικά

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθεται ο σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και γίνεται αναφορά στη δομή της, δηλαδή στα κεφάλαια και τα παραρτήματα που την απαρτίζουν.

## 1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, είναι η γεωμετρική τεκμηρίωση του αεροσκάφους τύπου Beech Super King Air 200, το οποίο ανήκει στη Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (Υ.Π.Α.), με εφαρμογή της γεωδαιτικής μεθοδολογίας. Με βάση αυτή διερευνήθηκε η δυνατότητα εντοπισμού στατιστικά σημαντικών παραμορφώσεων στην επιφάνεια της ατράκτου του αεροσκάφους. Επίσης, έγινε ο έλεγχος του αεροσκάφους ως προς τα γεωμετρικά στοιχεία του, με βάση τα κατασκευαστικά σχέδιά του, τα οποία παραδόθηκαν από την Υ.Π.Α.

Έτσι, πιο συγκεκριμένα, οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας εντοπίζονται στον:

- Έλεγχο της δυνατότητας ανίχνευσης στατιστικά σημαντικών παραμορφώσεων στην επιφάνεια της ατράκτου του αεροσκάφους.
- Προσδιορισμό των βασικών γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους και η σύγκριση τους με τα αντίστοιχα των κατασκευαστικών σχεδίων.

## 1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια και 2 παραρτήματα. Πιο συγκεκριμένα:

- Στο **πρώτο κεφάλαιο** περιλαμβάνεται ο σκοπός και η δομή της διπλωματικής εργασίας.
- Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στα είδη και τα κύρια τμήματα των αεροσκαφών και παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια του τύπου του αεροσκάφους που μελετάται.
- Το **τρίτο κεφάλαιο** αναφέρεται στο γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου, το οποίο ιδρύθηκε περιμετρικά και πάνω στο αεροσκάφος με σκοπό τη σάρωση του αντικειμένου από τις κορυφές του.
- Στο **τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφεται η σάρωση του αεροσκάφους με χρήση επίγειου Laser σαρωτή.
- Στο **πέμπτο κεφάλαιο** περιγράφεται η επεξεργασία του νέφους των σημείων και η δημιουργία της μοντελοποιημένης επιφάνειας του αεροσκάφους. Επίσης, γίνεται προσδιορισμός της ελάχιστης ανιχνεύσιμης παραμόρφωσης της επιφάνειας της ατράκτου.

- Στο **έκτο κεφάλαιο** γίνεται η εκτίμηση των βασικών γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους και η σύγκριση τους με τα αντίστοιχα των κατασκευαστικών σχεδίων του καθώς και η στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η χρονική κατανομή των εργασιών που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Στο **όγδοο κεφάλαιο** παρατίθενται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1** παρατίθενται οι έλεγχοι που έγιναν στο γεωδαιτικό εξοπλισμό πριν την πραγματοποίηση των εργασιών υπαίθρου.
- Στο **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2** παρατίθεται η επεξεργασία των γεωδαιτικών μετρήσεων και ο a posteriori πίνακας μεταβλητότητας - συμμεταβλητότητας του δικτύου οριζοντίου ελέγχου.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την αντίστοιχη βιβλιογραφία και ιστογραφία που μελετήθηκε κατά την εκπόνηση της.

## **Κεφάλαιο 2**

### **ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ - ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ**



## 2.1 Γενικά

Τα αεροσκάφη κατατάσσονται σε διάφορους τύπους ανάλογα με τον τρόπο ωθήσεως, την ταχύτητα που αναπτύσσουν και τη χρήση τους. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους των αεροσκαφών καθώς και των βασικών μερών τους. Τέλος παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια του αεροσκάφους Beech Super King Air 200, της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας, που είναι το ελεγχόμενο αεροσκάφος στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

## 2.2 Τύποι Αεροσκαφών - Μέρη Αεροσκάφους

Τα στοιχεία του σκελετού ενός αεροσκάφους κατασκευάζονται από μέταλλο και συνδέονται μεταξύ τους με κοιλίες, ήλους (καρφιά) και συγκολλήσεις. Τα δομικά στοιχεία (π.χ. ράβδοι διαμήκεις, νευρώσεις, διαφράγματα κ.τ.λ.) του αεροσκάφους παραλαμβάνουν τις τάσεις (εφελκυσμό, θλίψη, διάτμηση, κάμψη, στρέψη), που προέρχονται από τα επιβαλλόμενα σε αυτά φορτία, τόσο κατά τη διάρκεια της πτήσης, όσο και όταν αυτό είναι σταθμευμένο.

### 2.2.1 Τύποι Αεροσκαφών

Τα αεροσκάφη ανάλογα με τις μορφές του προωθητικού συστήματος τους διακρίνονται σε :

- **Ελικοφόρα**
- **Αεριοθούμενα**

Τα **ελικοφόρα** αεροσκάφη, χρησιμοποιούν έλικα με πτέρυγες ειδικής αεροτομής για την επίτευξη της άνωσης. Σε αυτόν τον τύπο αεροσκαφών ανήκουν τα ελικόπτερα, τα γυροπλάνα, τα υδροπλάνα και διάφορα υβριδικά είδη.

Τα **αεριοθούμενα** αεροσκάφη χρησιμοποιούν κινητήρες αερίωθησης με αεραγωγούς. Στους αεραγωγούς εισέρχεται ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος αφού αναμειχθεί με καύσιμη ύλη αναφλέγεται, επιτυγχάνοντας, με την εκτόνωση καυσαερίων, τη δημιουργία ώσης (ώθησης).

Ανάλογα με την ταχύτητα που αναπτύσσουν διακρίνονται σε :

- **Υποηχητικά**
- **Διηχητικά**
- **Υπερηχητικά**

Η ταχύτητα των αεροσκαφών προσδιορίζεται από τον αδιάστατο αριθμό Mach. Ο αριθμός Mach, με διεθνή συμβολισμό (Ma), ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας ενός σώματος προς την τοπική ταχύτητα διάδοσης του ήχου εντός του μέσου στο οποίο κινείται το συγκεκριμένο σώμα (π.χ. ατμοσφαιρικός αέρας). Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου σε οποιοδήποτε μέσο δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την πυκνότητα: ειδικότερα στον ατμοσφαιρικό αέρα εξαρτάται από το ύψος, τη θερμοκρασία και την πίεση που επικρατούν κατά τη διάδοση. Επομένως, κάνοντας λόγο για τοπική ταχύτητα, εννοούνται οι συνθήκες που επικρατούν στο ύψος που κινείται το σώμα. Ανάλογα με τον αριθμό Mach η διάκριση των αεροσκαφών είναι η εξής:

**Υποηχητικό** ορίζεται το αεροσκάφος που η ταχύτητα του είναι πιο μικρή από την ταχύτητα διάδοσης του ήχου ( $Ma < 1$ ).

**Διηχητικό** ορίζεται το αεροσκάφος που η ταχύτητα του είναι περίπου ίση με την ταχύτητα διάδοσης του ήχου ( $Ma \approx 1$ ).

**Υπερηχητικό** ορίζεται το αεροσκάφος που η ταχύτητα του είναι μεγαλύτερη της ταχύτητας διάδοσης του ήχου ( $Ma > 1$ ).

Τα αεροσκάφη ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε :

- Γενικής χρήσης
- Πολιτικής Αεροπορίας
- Πολεμικής Αεροπορίας

### **Αεροσκάφη Γενικής Χρήσης**

Τα αεροσκάφη γενικής χρήσης είναι μικρά, ελαφρά αεροσκάφη, που χρησιμοποιούνται για ψυχαγωγία, μικρές μεταφορές, μετακινήσεις ατόμων ή ειδικές χρήσεις όπως αεροψεκασμός, πυρόσβεση, νοσοκομειακά (με ειδικά διαρρυθμισμένο χώρο). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα υδροπλάνα, καθώς και ορισμένα μεγαλύτερα, πιο σύγχρονα αεροσκάφη, με όλα τα συστήματα ελέγχου και πλοήγησης, τα οποία ανήκουν σε μεγάλες εταιρίες, κρατικούς οργανισμούς και υπηρεσίες και σε ιδιώτες. Αυτά χρησιμεύουν κυρίως για μεταφορές προσωπικού και σπανιότερα για μεταφορά εμπορευμάτων.

### **Αεροσκάφη Πολιτικής Αεροπορίας**

Η πολιτική αεροπορία έχει τεράστια οικονομική σημασία καθώς τα αεροσκάφη της αποτελούν το βασικότερο μεταφορικό μέσο για άτομα και εμπορεύματα. Τα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας είναι επιβατικά, μεγάλου μεγέθους, διαθέτουν κλιματισμό, σταθερή πίεση στη καμπίνα των επιβατών και του πληρώματος, ανεξάρτητα από το ύψος πτήσης και έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν μαζί με τους επιβάτες και αποσκευές. Για μικρές αποστάσεις, υπάρχουν αεροσκάφη σχετικά μικρού ή μεσαίου μεγέθους, τα οποία μεταφέρουν μερικές δεκάδες επιβάτες ενώ για μεγαλύτερες διαδρομές, τα αεροσκάφη είναι μεγαλύτερης χωρητικότητας (π.χ. 150 - 300 επιβάτες).

### **Αεροσκάφη Πολεμικής Αεροπορίας**

Πολεμικά αεροσκάφη υπάρχουν για διάφορα είδη αποστολών και χρήσεων. Μερικά από αυτά, με αλλαγή οργάνων και εξοπλισμού, μπορούν να εκτελούν περισσότερες από μία αποστολές διαφορετικής φύσης. Τα πολεμικά αεροσκάφη διαχωρίζονται σε μαχητικά, αναγνωριστικά, εκπαιδευτικά, βομβαρδιστικά, μεταγωγικά και πετρελαιοφόρα εναέριου ανεφοδιασμού.

## **2.2.2 Κύρια Μέρη Αεροσκάφους**

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα αεροσκάφος, μερικά από τα οποία φαίνονται στην εικόνα 2.1, είναι :

- Η Άτρακτος
- Οι Πτέρυγες
- Το Ουραίο Πτέρωμα
- Οι Επιφάνειες Ελέγχου

- Το Σύστημα Προσγείωσης
- Η Μηχανή - Κινητήρας



Εικόνα 2.1: Κύρια Τμήματα Αεροσκάφους  
Figure 2.1: Airplane's main parts

### Άτρακτος αεροσκάφους

Αποτελεί το κυρίως σώμα του αεροσκάφους, στο οποίο βρίσκεται το πλήρωμα και τα όργανα που απαιτούνται για τη λειτουργία και τον έλεγχο του αεροσκάφους (εικόνα 2.1). Στην άτρακτο περιλαμβάνεται η καμπίνα των επιβατών, ο χώρος αποθήκευσης των αποσκευών και ο χώρος για εξοπλισμό διάφορων ειδών. Επιπλέον, είναι δυνατόν ο κινητήρας να είναι εγκατεστημένος στο εσωτερικό της. Η άτρακτος είναι το βασικό μέρος του αεροσκάφους, καθώς όλα τα συστήματα πλοήγησης και προσεδάφισης προσαρμόζονται σε αυτήν. Το σχήμα της είναι λεπτό και επίμηκες, με κωνικές στρογγυλεμένες άκρες, ώστε να είναι αεροδυναμικό.

### Πτέρυγες αεροσκάφους

Είναι οριζόντιες με σχήμα αεροτομής, ωθούν τον αέρα προς τα κάτω καθώς το αεροσκάφος προωθείται (εικόνα. 2.1). Παρέχουν την κύρια δύναμη άντωσης του αεροσκάφους. Επιπλέον, εξασφαλίζουν σταθερότητα ώστε να αποφευχθεί η κλίση του αεροπλάνου αριστερά ή δεξιά.

### Ουραίο πτέρωμα

Το ουραίο πτέρωμα αποτελείται από τον κατακόρυφο και τον οριζόντιο σταθεροποιητή (εικόνα 2.1). Ο **κατακόρυφος σταθεροποιητής** είναι τοποθετημένος στο οπίσθιο μέρος της ατράκτου και αποτρέπει την αριστερή ή δεξιά εκτροπή του αεροπλάνου, ενώ ελέγχεται από το πηδάλιο διεύθυνσης. Ο **οριζόντιος σταθεροποιητής** είναι συνήθως τοποθετημένος στην ουρά της ατράκτου κοντά στον κατακόρυφο σταθεροποιητή. Χρησιμεύει για τη σταθεροποίηση του ύψους του αεροσκάφους και ελέγχεται από τους ελκυστήρες.

### Επιφάνειες ελέγχου

Στις επιφάνειες ελέγχου περιλαμβάνονται όλες οι κινούμενες επιφάνειες ενός αεροσκάφους που χρησιμοποιούνται για την άντωση (δυναμική άνωση), την οπισθέλκουσα δύναμη (δύναμη που προκύπτει από τη ροή του αέρα γύρω από το αεροσκάφος), τη διεύθυνση και

την κατεύθυνση. Αυτές είναι: **(α) Το πηδάλιο ελέγχου διεύθυνσης** (yaw control) : ο έλεγχος της κίνησης γίνεται από τον κατακόρυφο σταθεροποιητή, **(β) Το πηδάλιο ελέγχου ανόδου - καθόδου** (pitch control) : ο έλεγχος της κίνησης πραγματοποιείται από τον οριζόντιο σταθεροποιητή και **(γ) Το πηδάλιο ελέγχου κλίσης** (roll control) : ο έλεγχος της κλίσης γίνεται από τα πηδάλια κλίσης (ailerons), που βρίσκονται συνήθως κοντά στο εξωτερικό άκρο της πτέρυγας.

### **Σύστημα Προσγείωσης**

Το σύστημα προσγείωσης υποστηρίζει το αεροσκάφος, όταν αυτό είναι σταθμευμένο στο έδαφος, καθώς και κατά την απογείωση και την προσγείωση του. Το σύστημα προσγείωσης μπορεί να είναι σταθερό ή ανασυρόμενο.

### **Μηχανές - Κινητήρες**

Το αεροσκάφος διαθέτει ένα σύστημα παραγωγής ώσης ή μονάδα παραγωγής ενέργειας, για να είναι δυνατόν να ίπταται. Η μηχανή αποτελείται από τον κινητήρα και την έλικα (αν υπάρχει). Σήμερα, οι τύποι κινητήρων που χρησιμοποιούνται είναι εσωτερικής καύσης, κινητήρες αντίδρασης, στροβιλοκινητήρες (turbo-prop) και κινητήρες πυραύλων.

## **2.3 Ελεγχόμενο Αεροσκάφος**

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται ο γεωμετρικός έλεγχος **υποηχητικού αεροσκάφους τύπου BEECH SUPER KING AIR 200**. Το αεροσκάφος ανήκει στην Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (Υ.Π.Α.) του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών «Ελ. Βενιζέλος» και χρησιμοποιούνταν για τον έλεγχο των ραδιοβοηθημάτων σε πανελλαδικό επίπεδο.

Το μοντέλο Super King Air της εταιρίας Beechcraft, είναι τύπος μίας σειράς αεροσκαφών με δύο στροβιλοκινητήρες που διακρίνονται σε δύο σειρές μοντέλων :

**(α)** Οι σειρές των μοντέλων 90 και 100, που αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1960 και είναι γνωστές ως King Airs, και

**(β)** οι μεταγενέστερες σειρές T-tail Model 200 & 300, που αρχικά κυκλοφόρησαν ως Super King Airs, με την αναφορά Super να χρησιμοποιείται από την Beechcraft το 1996, για τη διαφοροποίηση των μοντέλων 200 & 300 από τα παλαιότερα μοντέλα.

Το μοντέλο King Air 200 αποτελεί εξέλιξη του μοντέλου King Air 100. Έχει ουσιαστικά την ίδια άτρακτο με το μοντέλο 100, με αλλαγές στο πίσω μέρος της για να τοποθετηθεί η νέα T-tail στη θέση της συμβατικής μορφής του ουραίου πτερυγίου του μοντέλου 100, με οριζόντιο σταθεροποιητή τριπλής κίνησης, αλλαγές που επιτρέπουν υψηλότερη μέγιστη πίεση. Οι άλλες αλλαγές, στο συγκεκριμένο τύπο αεροσκάφους, περιλαμβάνουν τον ισχυρότερο κινητήρα Pratt - Whitney Canada PT6 A-41, μεγαλύτερο μήκος και εμβαδόν πτέρυγας, αυξημένη πίεση θαλάμου, μεγαλύτερη χωρητικότητα των αποθηκών καυσίμου και υψηλότερα φορτία λειτουργίας σε σχέση με το King Air 100.

Το πρώτο αεροσκάφος Beech Super King 200, μετά από εκτεταμένες δοκιμές και ειδικότερα της T-tail που δοκιμάστηκε για 375 ώρες, πραγματοποίησε πτήση για πρώτη φορά στις 27 Οκτωβρίου 1972. Το 1972 κατασκευάστηκαν τρία αεροσκάφη και παραδόθηκαν στον αμερικανικό στρατό, τότε του δόθηκε η στρατιωτική κωδική ονομασία RM-215. Στη συνέχεια, το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε από την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ, τη Royal



Flying Doctor υπηρεσία της Αυστραλίας και τη Βασιλική Αυστραλιανή Πολεμική Αεροπορία. Στον παρακάτω πίνακα 2.1 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του αεροσκάφους.

<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ BEECH SUPER KING AIR 200</b>	
<b>Πλήρωμα</b>	1-2 άτομα
<b>Χωρητικότητα</b>	13 άτομα
<b>Μήκος</b>	43' (ft.) 10" (in.) 13,36m
<b>Ύψος</b>	14' (ft.) 10" (in.) 4,52 m
<b>Καμπίνα L x W x H</b>	10'8" x 4'6" x 4'9" 3,25m x 1,37m x 1,45m
<b>Μέγιστη Ταχύτητα</b>	536 Km/h
<b>Βάρος</b>	3683 kg (8120 lb)
<b>Πτέρυγα Περιστροφής</b>	16,61m
<b>Περιοχή Πτέρυγας</b>	28,2m
<b>ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ</b>	
<b>Τύπος Κινητήρα</b>	Pratt & Whitney Canada PT6 A-42
<b>Ισχύς - Ώση</b>	850 hp / 630 KW

**Πίνακας 2.1:** Προδιαγραφές Beech Super King Air 200  
**Table 2.1:** Aircraft Beech Super King 200 specifications

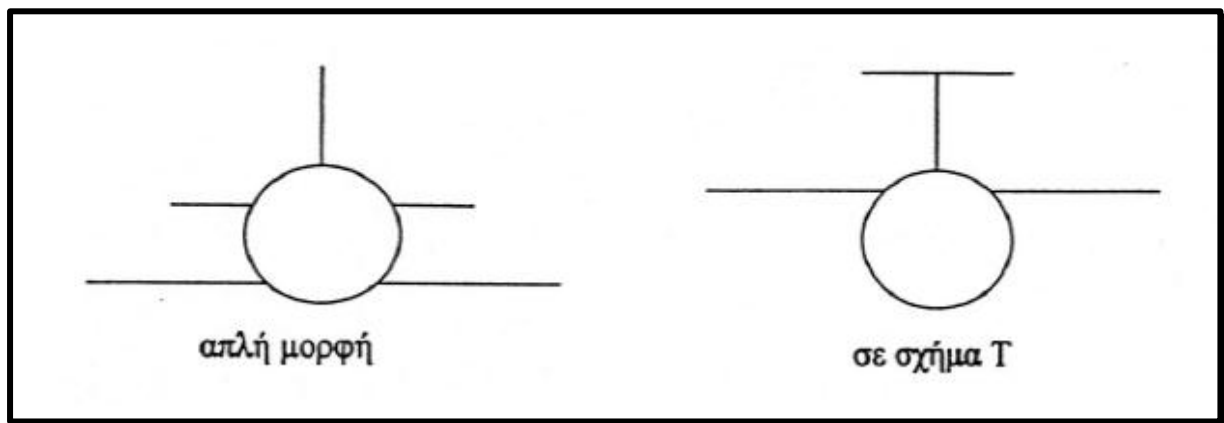
Στην εικόνα 2.2 φαίνεται το αεροσκάφος Beech King Air 100 και, αντίστοιχα, στην εικόνα 2.3 το αεροσκάφος μεταγενέστερης γενιάς Beech Super King Air 200 με τη μορφή T-Tail στο ουραίο πτέρωμα. Στην εικόνα 2.4 φαίνεται σχηματικά, σε όψη, η διαφοροποίηση των δύο μοντέλων στο ουραίο πτέρωμα.



**Εικόνα 2.2:** Αεροσκάφος Beech King Air 100  
**Figure 2.2:** Aircraft Beech King Air 100



**Εικόνα 2.3:** Αεροσκάφος Beech Super King Air 200  
**Figure 2.3:** Aircraft Beech Super King Air 200



**Εικόνα 2.4:** Διαφοροποίηση των δύο μοντέλων στο ουραίο πτέρωμα  
**Figure 2.4:** Difference between the two aircraft models concerning the tail fin

Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζεται το αεροσκάφος Beech Super King Air 200 SX ECG που διαθέτει η Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας. Το αεροσκάφος, τα τελευταία 2 χρόνια, βρίσκεται στο έδαφος στο Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών, καθώς κρίνεται ασύμφορη η επισκευή του, λόγω κόστους και παλαιότητας (άνω των 42 ετών). Αποτελεί πλέον Μουσειακό Έκθεμα και πρόκειται να μεταφερθεί στο Μουσείο Πολεμικής Αεροπορίας στο Τατόι.

Το αεροσκάφος χρησιμοποιούνταν από την Υ.Π.Α. για να εκτελεί εναέριους ελέγχους των αεροναυτιλιακών και οπτικών βοηθημάτων όλων των Πολιτικών Αεροδρομίων καθώς και των Αεροδρομίων των Ενόπλων Δυνάμεων στην Ελληνική και Κυπριακή Επικράτεια.



**Εικόνα 2.5:** Αεροσκάφος Beech Super King Air 200 SX ECG της Υ.Π.Α.  
**Figure 2.5:** Aircraft Beech Super King Air 200 SX ECG of the C.A.A.

### **2.3.1 Κατασκευαστικά Σχέδια**

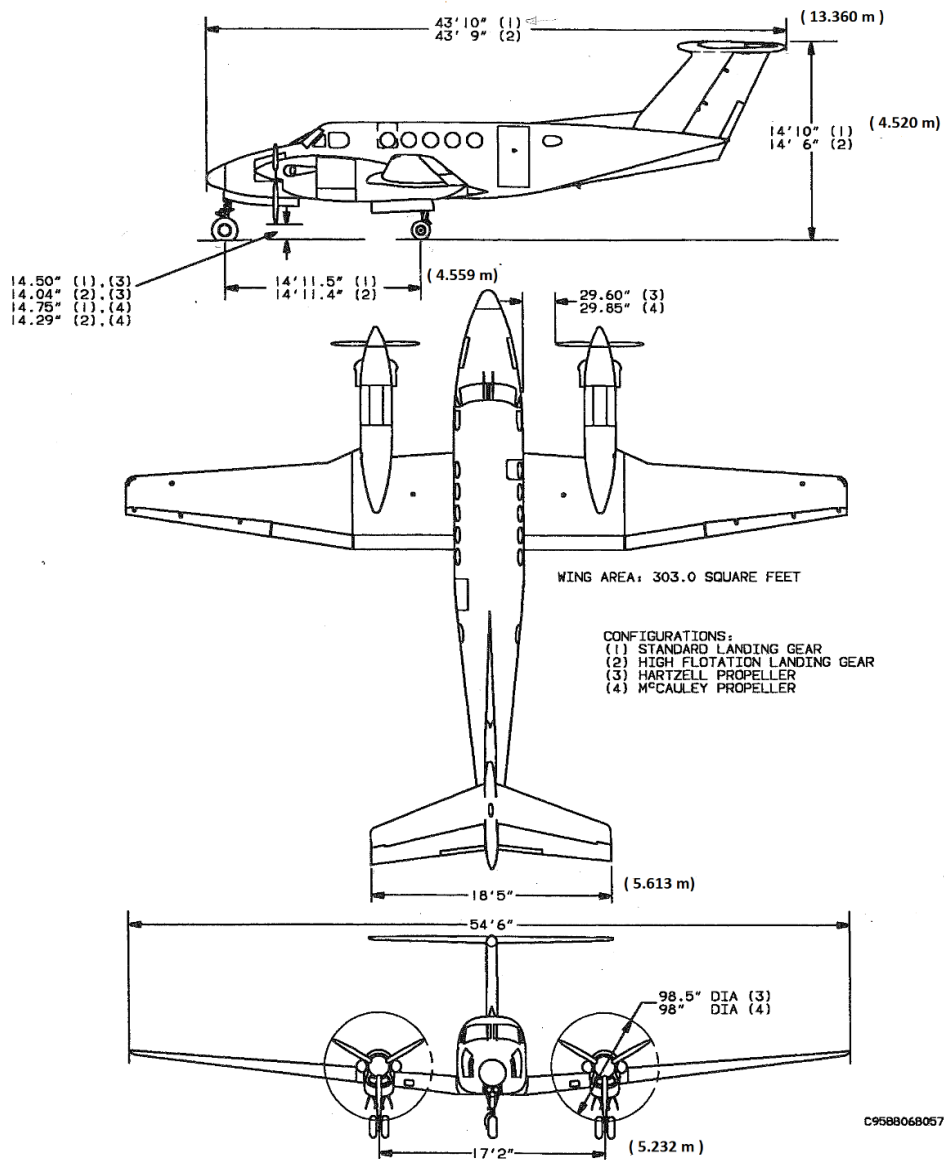
Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρατίθενται τα σχέδια του αεροσκάφους BEECH SUPER KING AIR 200, όπως παρουσιάζονται στα τεχνικά δελτία, που παραχωρήθηκαν από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας.

Στην εικόνα 2.6 δίνονται οι διαστάσεις του αεροσκάφους (Airplane Dimensions) σε πόδια (σε παρένθεση δίνονται οι διαστάσεις σε μέτρα). Στην ίδια εικόνα παρουσιάζονται και οι διαφοροποιήσεις στις διαστάσεις, ανάλογα με προσθήκες που γίνονται στο αεροσκάφος. Το ελεγχόμενο αεροσκάφος αντιστοιχεί στις διαστάσεις με κωδικό 1. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η άτρακτος, όπως και οι πτέρυγες, κατασκευάζονται κατά τμήματα. Για την εύκολη εύρεση της θέσης των διάφορων στοιχείων, όπως π.χ. διαφράγματα επιφάνειας, δοκούς και άλλα στοιχεία, υπάρχει σύστημα αρίθμησης στην άτρακτο και αντίστοιχα στις πτέρυγες. Οι περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν σύστημα αρίθμησης σταθμών. Ορίζοντας το ρύγχος του αεροσκάφους ως την αρχή του συστήματος αρίθμησης, είναι εύκολο να εντοπιστεί στο σχέδιο οποιοδήποτε σημείο της ατράκτου, βρίσκοντας την απόσταση του από το ρύγχος.

Στην εικόνα 2.7 παρατίθεται το διάγραμμα σταθμών (Station and Buttock Line Diagram). Ως αρχή θεωρείται το ρύγχος της ατράκτου το οποίο έχει την τιμή 14. Οι αποστάσεις από το ρύγχος δίνονται σε ίντσες. Στον πίνακα 2.2 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι διαστάσεις των βασικών στοιχείων του αεροσκάφους.

# Raytheon Aircraft

## BEECH SUPER KING AIR 200 SERIES MAINTENANCE MANUAL



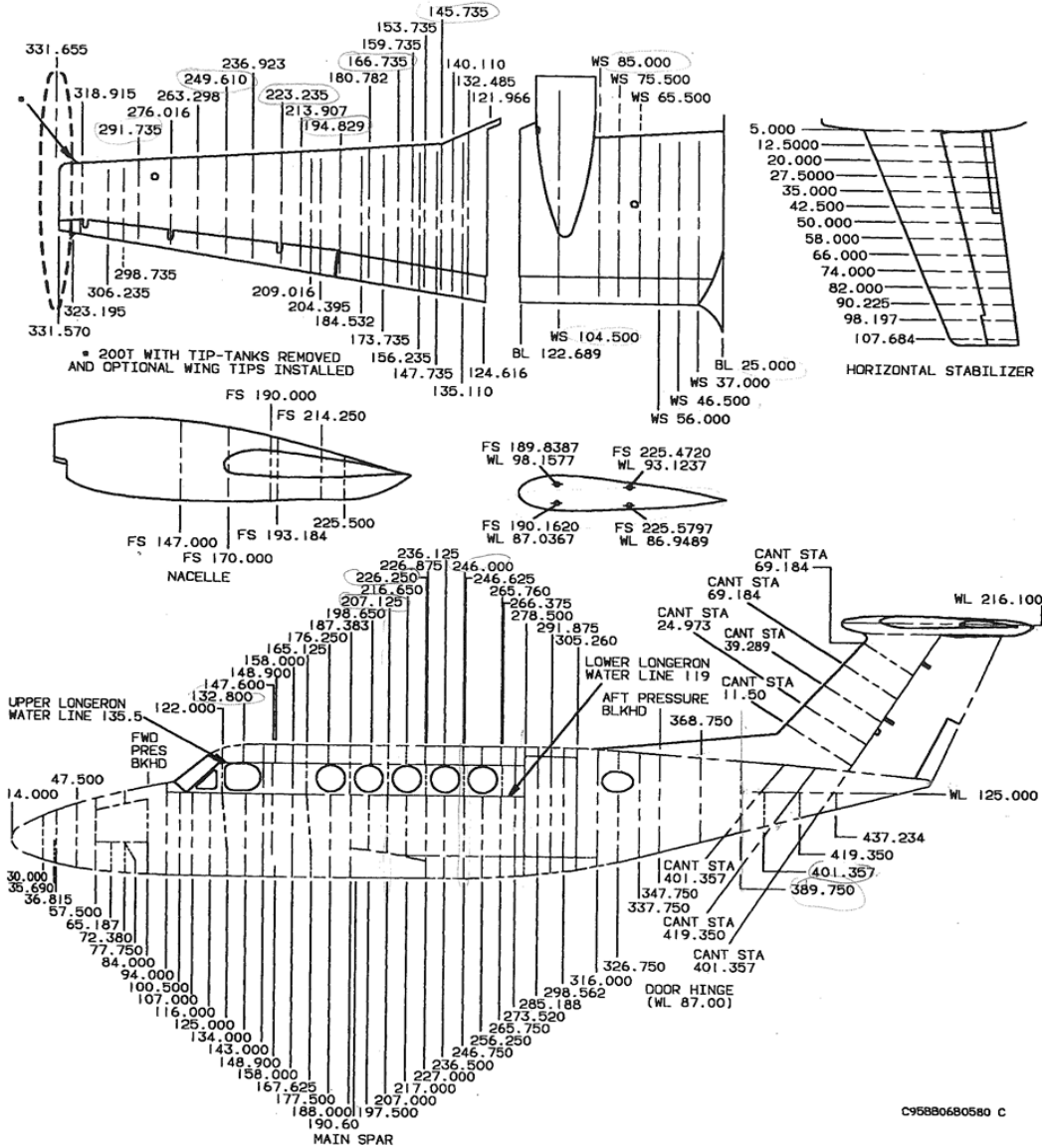
**Airplane Dimensions**  
 (BB-2 thru BB-1438, BB-1440 thru BB-1443; B200 Special Edition BB-1514 and After)  
 Figure 2

**6-00-00** PAGE 3  
 FEB 27/98

Εικόνα 2.6: Διαστάσεις Αεροσκάφους  
 Figure 2.6: Airplane Dimensions

# Raytheon Aircraft

## BEECH SUPER KING AIR 200 SERIES MAINTENANCE MANUAL



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα σταθμών αεροπλάνου  
Figure 2.7: Station and Buttock Line diagram

<b>Διαστάσεις Αεροσκάφους</b>		
<b>Άνοιγμα Πτερύγων</b>	54 (ft) 6 (in)	16.611m
<b>Άνοιγμα οριζόντιου σταθεροποιητή</b>	18 (ft) 5 (in)	5.613m
<b>Μήκος Αεροσκάφους</b>	43 (ft) 10 (in)	13.360m
<b>Απόσταση Οπίσθιων τροχών</b>	17 (ft) 2 (in)	5.232m
<b>Απόσταση εμπρόσθιου τροχού από τον άξονα των οπίσθιων τροχών</b>	14 (ft) 11.5 (in)	4.559m

**Πίνακας 2.2:** Διαστάσεις Αεροσκάφους  
**Table 2.2:** Aircraft dimensions

**Κεφάλαιο 3**  
**ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**





### 3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται το γεωδαιτικό δίκτυο οριζόντιου ελέγχου που ιδρύθηκε περιμετρικά και πάνω στο σώμα του αεροσκάφους που μελετάται. Από τις κορυφές του δικτύου, που βρίσκονται περιμετρικά, πραγματοποιήθηκαν οι σαρώσεις, με σκοπό τη δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου του αεροσκάφους. Παρουσιάζεται ο γεωδαιτικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, αναφέρονται οι έλεγχοι των οργάνων, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του δικτύου και δίνονται οι μετρήσεις των στοιχείων του δικτύου, η συνόρθωση των παρατηρήσεων και η επίλυση του δικτύου. Τέλος, παρουσιάζεται ο προσδιορισμός των υψομέτρων των κορυφών του γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου.

### 3.2 Ορισμός Συστήματος Αναφοράς (Σ.Α.)

Το γεωδαιτικό δίκτυο οριζοντίου ελέγχου, που ιδρύθηκε για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του αεροσκάφους και τον προσδιορισμό των πιθανών αποκλίσεων και παραμορφώσεων του περιλαμβάνει επίγειες κορυφές, περιμετρικά του αεροσκάφους και κορυφές πάνω σε αυτό.

Για τον ορισμό του (Σ.Α.) λήφθηκε υπόψη ότι το αντικείμενο μελέτης είναι κινητό, δεδομένου ότι το αεροσκάφος μπορεί να μην προσγειώνεται στην ίδια θέση μετά από κάθε πτήση. Συνεπώς, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι οι σαρώσεις από τις επίγειες κορυφές του δικτύου οριζοντίου ελέγχου θα μπορούν να συνενωθούν σε ένα ενιαίο νέφος σημείων στο ίδιο (Σ.Α.), ακόμη και αν το αντικείμενο (αεροσκάφος) μετακινηθεί. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να ορισθεί ένα (Σ.Α.) σταθερά συνδεδεμένο με το αεροσκάφος (σωματόδετο), και όχι με τη θέση στην οποία αυτό βρίσκεται. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκαν ως σταθερές: μια κορυφή και μια διεύθυνση απόλυτα συνδεδεμένες με το αεροσκάφος. Συγκεκριμένα, η σταθερή κορυφή ιδρύθηκε στο ρύγχος του αεροσκάφους και η σταθερή διεύθυνση υλοποιήθηκε από αυτή και μια κορυφή στο πίσω μέρος της ατράκτου, η οποία θεωρείται ως ημισταθερή. Οι θέσεις των συγκεκριμένων κορυφών επιλέχθηκαν, καθώς, η σταθερή διεύθυνση της πλευράς που ορίζουν, ταυτίζεται με τη διεύθυνση του διαμήκη άξονα του αεροσκάφους, με σκοπό να είναι πιο εύκολη η μετέπειτα επεξεργασία για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους.

Με βάση τα παραπάνω, το (Σ.Α.) που υλοποιείται από το συγκεκριμένο γεωδαιτικό δίκτυο οριζοντίου ελέγχου είναι ένα τρισσορθογώνιο, αυθαίρετο, τοπικό σύστημα αναφοράς, του οποίου ο άξονας (X), ταυτίζεται με την προβολή του διαμήκη άξονα του αεροσκάφους στο οριζόντιο επίπεδο, που περνά από τη σταθερή κορυφή, ο άξονας (Z), είναι κάθετος στον άξονα (X), στη θέση της σταθερής κορυφής και ο άξονας (Y) συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα των αξόνων.

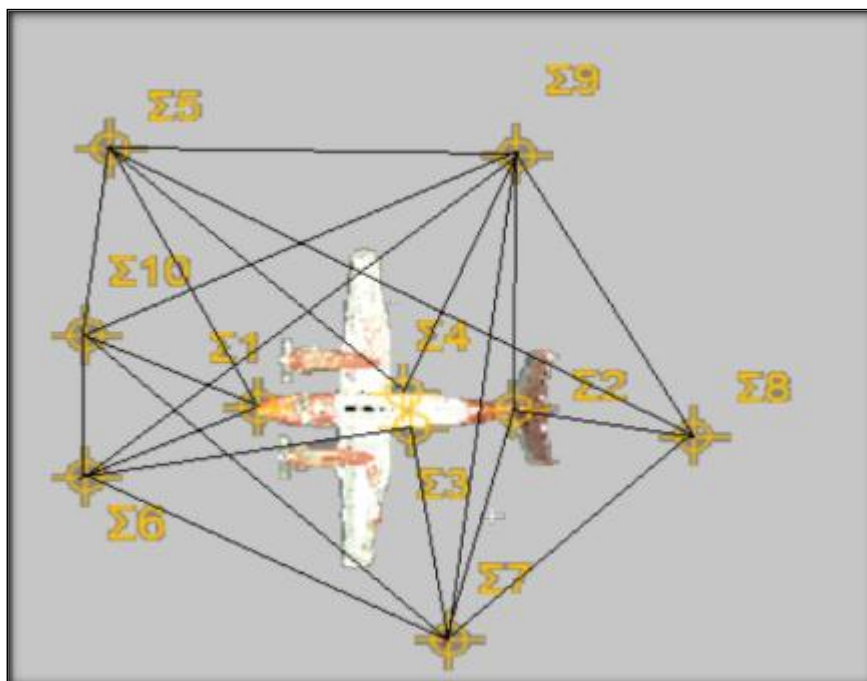
Είναι φανερό ότι το συγκεκριμένο (ΣΑ) είναι σταθερό, δεδομένου ότι οι παράμετροι ορισμού του (μια κορυφή και μια διεύθυνση) παραμένουν σταθερές, ακόμα κι αν το αεροσκάφος μετακινηθεί, ενώ οι συντεταγμένες των κορυφών επί του εδάφους μεταβάλλονται. Στην περίπτωση που το αεροσκάφος μετακινηθεί από την αρχική του θέση, πριν την ολοκλήρωση των σαρώσεων, οι συντεταγμένες των επίγειων κορυφών, πρέπει να επαναπροσδιοριστούν με νέες μετρήσεις των στοιχείων του νέου γεωδαιτικού δικτύου οριζοντίου ελέγχου. Στη συνέχεια, οι σαρώσεις θα συνεχισθούν μόνο από εκείνες τις κορυφές που είναι απαραίτητες, για να ολοκληρωθεί το τρισδιάστατο μοντέλο του αεροσκάφους.

Με τη παραπάνω μεθοδολογία εξασφαλίζεται ότι οι σαρώσεις και η συνένωση των νεφών από τις επίγειες κορυφές του δικτύου οριζοντίου ελέγχου θα γίνονται πάντοτε στο ίδιο (Σ.Α.), ακόμα και αν το αεροσκάφος αλλάξει θέση πριν την ολοκλήρωση των σαρώσεων.

### 3.3 Αναγνώριση – Ίδρυση γεωδαιτικού δικτύου

Σε πρώτη φάση έγινε η αναγνώριση της περιοχής στην οποία βρίσκεται το αεροσκάφος (τεχνική βάση του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών), ώστε να επιλεγούν οι θέσεις των κορυφών του δικτύου. Κατά την επιλογή των θέσεων των κορυφών λήφθηκε υπόψη η αμοιβαία ορατότητα μεταξύ όσο το δυνατόν περισσότερων κορυφών, η αναγκαιότητα από τις θέσεις τους να εξασφαλίζεται η πλήρης σάρωση του αεροσκάφους, με ικανοποιητική επικάλυψη, καθώς επίσης και η επίτευξη καλής γεωμετρίας του δικτύου ελέγχου.

Το Δίκτυο Οριζοντίου Ελέγχου, που ιδρύθηκε αποτελείται από δέκα κορυφές (Σ1, ..., Σ10). Από αυτές έξι (Σ5, Σ6, Σ7, Σ8, Σ9, Σ10) υλοποιήθηκαν στο έδαφος, περιμετρικά του αεροσκάφους ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις κορυφές (Σ1, Σ2, Σ3, Σ4) πάνω στο σώμα του αεροσκάφους. Η κορυφή Σ1 (σταθερή κορυφή) ιδρύθηκε στο ρύγχος της ατράκτου του αεροσκάφους, ενώ η Σ2 (ημισταθερή κορυφή) στο μέσο της ουράς της ατράκτου. Η διεύθυνση της πλευράς (Σ1 – Σ2) ( $a_{\Sigma 1 \Sigma 2}$  : σταθερή διεύθυνση), ταυτίζεται με τη διεύθυνση του διαμήκη άξονα του αεροσκάφους. Οι κορυφές Σ3 και Σ4 υλοποιήθηκαν στην δεξιά και την αριστερή πλευρά της ατράκτου αντίστοιχα. Οι κορυφές, περιμετρικά του αεροσκάφους, υλοποιήθηκαν με ατσαλόκαρφα, ενώ οι κορυφές πάνω στο αεροσκάφος υλοποιήθηκαν με ανεξίτηλο μαρκαδόρο. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η μορφή του δικτύου οριζοντίου ελέγχου και στις εικόνες 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 παρουσιάζεται η σήμανση των κορυφών Σ1, Σ2, Σ3, Σ4



**Σχήμα 3.1:** Δίκτυο οριζοντίου ελέγχου  
**Figure 3.1:** The horizontal control network



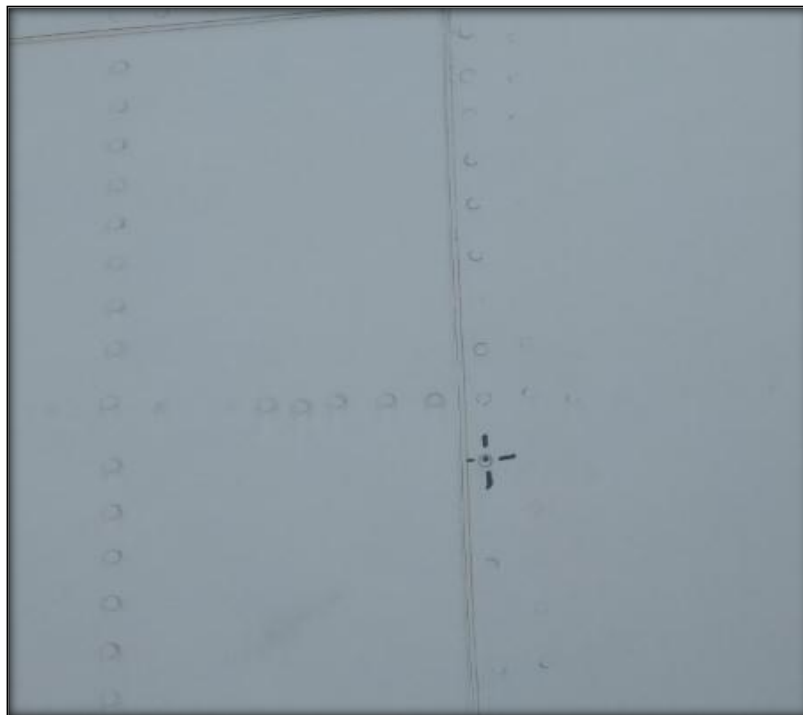
**Εικόνα 3.1:** Κορυφή Σ1 στο ρύγχος της ατράκτου του αεροσκάφους  
**Figure 3.1:** Point Σ1 at the nose of the aircraft's fuselage



**Εικόνα 3.2:** Κορυφή Σ2 στο μέσον της ουράς της ατράκτου του αεροσκάφους  
**Figure 3.2:** Point Σ2 at the tail of the aircraft's fuselage



**Εικόνα 3.3:** Κορυφή Σ3 στο δεξιό μέρος της ατράκτου  
**Figure 3.3:** Point Σ3 at the right side of the aircraft's fuselage



**Εικόνα 3.4:** Κορυφή Σ4 στο αριστερό μέρος της ατράκτου  
**Figure 3.4:** Point Σ4 at the left side of the aircraft's fuselage

### 3.4 Εξοπλισμός

Για τις μετρήσεις (οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες, κεκλιμένα μήκη) χρησιμοποιήθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός Topcon GPT3107N με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά (πίνακας 3.1).

Τεχνικά Χαρακτηριστικά TOPCON GPT3107N	
Γωνιομετρική Ακρίβεια	$\pm 7''(20^{\circ}\text{C})$
Εμβέλεια Μέτρησης Απόστασης με ένα πρίσμα	3.000 m
Εμβέλεια Μέτρησης Απόστασης χωρίς πρίσμα	350 m
Ακρίβεια μέτρησης μήκους με πρίσμα	$\pm(2\text{mm} + 2\text{ppm})$
Ακρίβεια μέτρησης μήκους χωρίς πρίσμα	$\pm(3\text{mm} + 2\text{ppm})$

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωδαιτικού σταθμού Topcon GPT3107N  
Table 3.1: Technical features of total station Topcon GPT3107N

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα παρελκόμενα :

- 2 τρικόγλια με οπτική κέντρωση
- 2 ανακλαστήρες
- 3 τρίποδες αλουμινίου
- μετροταινία
- ειδικό πρίσμα (εικόνα 3.5)



Εικόνα 3.5: Ειδικό Πρίσμα  
Figure 3.5: Special Prism

### 3.5 Έλεγχοι

Πριν από την πραγματοποίηση των μετρήσεων των στοιχείων του δικτύου ελέγχου κρίθηκε απαραίτητο να ελεγχθεί το όργανο και τα παρελκόμενα που θα χρησιμοποιηθούν, ώστε να εντοπιστούν πιθανά συστηματικά σφάλματα που θα επηρέαζαν τις μετρήσεις.

Έγιναν οι εξής έλεγχοι :

- α) Έλεγχος της οπτικής κέντρωσης των τριχοχλίων
- β) Έλεγχος σταθεράς οργάνου - καταφώτων

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι αναφέρεται η μεθοδολογία των ελέγχων και η επεξεργασία των πρωτογενών μετρήσεων τους.

#### 3.5.1 Έλεγχος σταθεράς οργάνου - καταφώτου

Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε στην υπόγεια σήραγγα ελέγχου της Σ.Α.Τ.Μ., όπου οι αποστάσεις μεταξύ των βάθρων είναι προσδιορισμένες με ακρίβεια  $\pm 0.01$  mm. Ο γεωδαιτικός σταθμός και ο ανακλαστήρας τοποθετήθηκαν πάνω σε ειδικές βάσεις εξαναγκασμένης κέντρωσης (KERN), οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα κέντρωσης με ακρίβεια  $\pm 0.1$  mm. Για κάθε ένα από τα δύο κατάφωτα μετρήθηκαν κεκλιμένα μήκη και κατακόρυφες γωνίες σε μια πλήρη περίοδο. Οι μετρήσεις παρατίθενται στο Παράρτημα Ι.

Στη συνέχεια ελέγχθηκε, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, αν, για κάθε ένα από τα δύο πρίσματα, οι αποκλίσεις ( $\delta D$ ) μεταξύ της γνωστής και της μετρημένης απόστασης είναι στατιστικά σημαντικές. Για το συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης, το εκατοστιαίο σημείο της τυποποιημένης κανονικής κατανομής είναι  $z_{95}=1.96$ .

Η αβεβαιότητα της απόκλισης προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma_{\delta D} = \pm \sqrt{\sigma_{\text{γνωστό}}^2 + \sigma_{\text{μετρημένο}}^2} \quad (3.1)$$

Όπου:  $\sigma_{\text{γνωστό}} = \pm 0.1$  mm και  $\sigma_{\text{μετρημένο}} = \pm 2$  mm. Επομένως  $\sigma_{\delta D} = \pm 2$  mm.

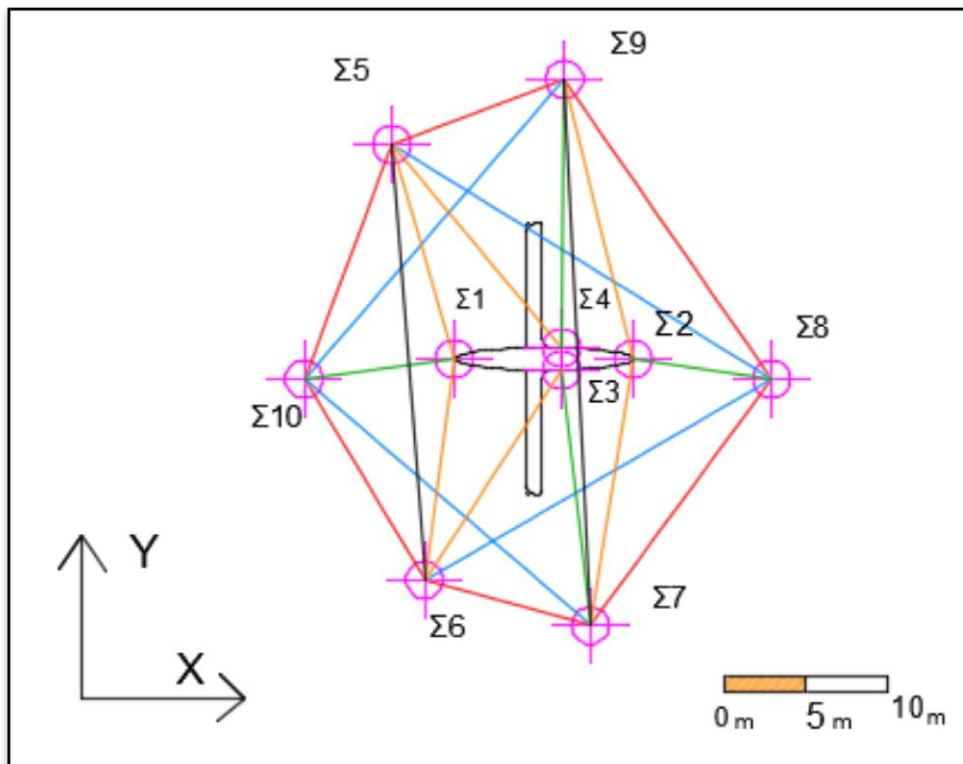
Για να θεωρηθεί ότι οι αποκλίσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές θα πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση  $|\delta D| \leq Z_{95} \times \sigma_{\delta D}$ . Δηλαδή,  $\delta D \leq \pm 3.9$  mm.

Από τον έλεγχο διαπιστώθηκε ότι, και για τα δύο πρίσματα, οι αποκλίσεις  $\delta D$  δεν είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (πίνακες 1 και 2, παράρτημα Ι).

### 3.6 Βελτιστοποίηση Δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου

Πριν από τις εργασίες υπαίθρου κρίθηκε απαραίτητο να γίνει βελτιστοποίηση του δικτύου οριζόντιου ελέγχου με σκοπό τον σχεδιασμό του, έτσι ώστε το δίκτυο ελέγχου να έχει τη βέλτιστη ποιότητα, για να είναι δυνατός ο έλεγχος του αεροσκάφους με αξιοπιστία. Γι' αυτό το λόγο συντάχθηκε σχετικό διάγραμμα βελτιστοποίησης (διάγραμμα 3.1).

Αρχικά, έγινε μια πρώτη επιλογή της θέσης των κορυφών του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη τις αμοιβαίες ορατότητες με βάση το άνοιγμα των πτερύγων και το μήκος του αεροσκάφους σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια του αεροσκάφους. Η επιλογή πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον AutoCAD, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, από όπου εκτιμήθηκαν οι (προσωρινές) συντεταγμένες των κορυφών.



Σχήμα 3.2: Διάταξη δικτύου βελτιστοποίησης  
Figure 3.2: Network's shape for optimization

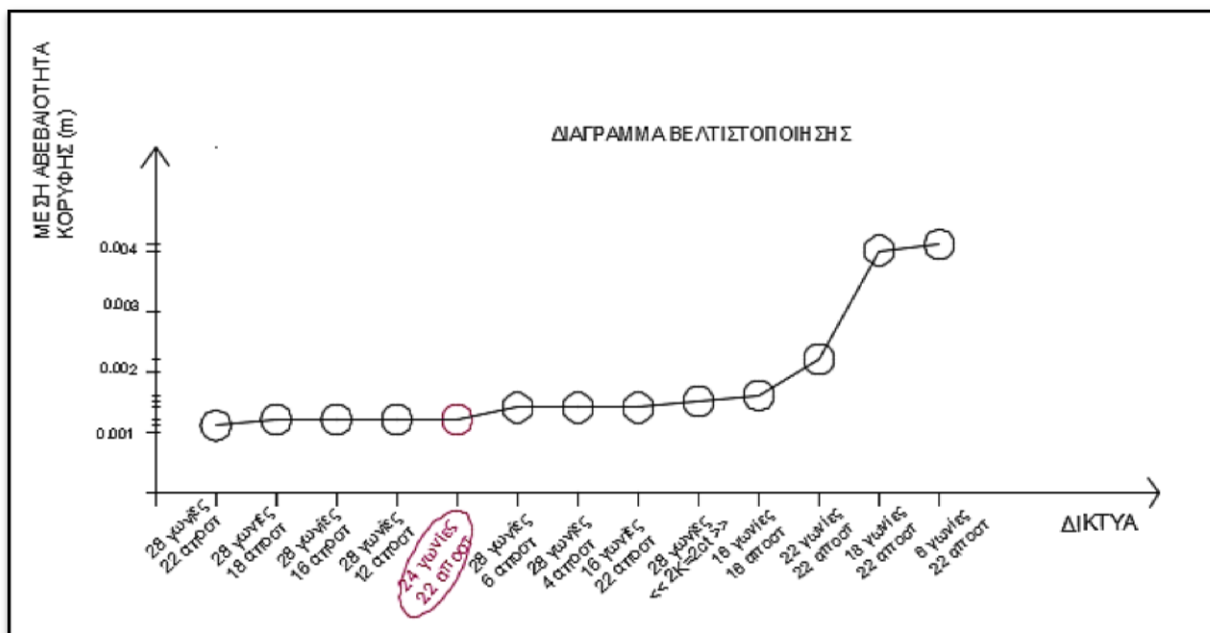
Για να είναι πιο κατανοητή η περιγραφή των διάφορων προγραμμάτων μέτρησης των στοιχείων του δικτύου, οι πλευρές διακρίνονται σε : «περιμετρικές πλευρές» (ΠΠ), «διαγώνιες πλευρές» (ΠΔ), «πλευρές προς κορυφές στο αεροσκάφος» (ΠΑ) και οι γωνίες σε : «γωνίες μεταξύ επίγειων κορυφών» (ΓΕΕ), «γωνίες μεταξύ επίγειων κορυφών και κορυφής αεροπλάνου» (ΓΕΑ). Τα διάφορα προγράμματα μετρήσεων, στο πλαίσιο του σχεδιασμού, είναι τα εξής :

1. Μέτρηση όλων των γωνιών (28) και όλων των αποστάσεων (22) . Οι βαθμοί ελευθερίας είναι  $r = n - m = 50 - 17 = 33$  και η μέση αβεβαιότητα κορυφής εκτιμήθηκε  $\pm 1,1$  mm.
2. Μέτρηση 28 γωνιών (όλων) και 18 αποστάσεων, δηλαδή έχουν μετρηθεί 10 (ΠΑ), 6 (ΠΠ) και 2 (ΠΔ). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 29 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,2$  mm.

3. Μέτρηση 28 γωνιών (όλων) και 16 αποστάσεων, δηλαδή έχουν μετρηθεί 6 (ΠΠ), 6 (ΠΔ) και 4 (ΠΑ), δεν έχουν μετρηθεί οι πλευρές προς τις κορυφές που έχουν υλοποιηθεί πάνω στο αεροσκάφος και οι σκοπεύσεις είναι πλάγιες. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 27 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,2$  mm.
4. Μέτρηση 28 γωνιών (όλων) και 12 αποστάσεων, δηλαδή έχουν μετρηθεί 6 (ΠΠ) και 6 (ΠΔ). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 23 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,2$  mm.
5. **Μέτρηση 24 γωνιών δηλαδή 10 (ΓΕΑ) και 14 (ΓΕΕ) και 22 αποστάσεων (όλων). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 29 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,2$  mm.**
6. Μέτρηση 28 γωνιών (όλων) και 6 αποστάσεων, δηλαδή μέτρηση μόνο των περιμετρικών πλευρών 6 (ΠΠ). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 17 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,4$  mm.
7. Μέτρηση 28 γωνιών (όλων) και 4 αποστάσεων, δηλαδή μέτρηση μόνο των μεγάλων αποστάσεων 4 (ΠΔ). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 15 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,4$  mm.
8. Μέτρηση 16 γωνιών, 10 (ΓΕΑ) και 6 (ΓΕΕ), δηλαδή μόνο οι περιμετρικές γωνιομετρήσεις και 22 αποστάσεων (όλων). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 21 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,4$  mm.
9. Μέτρηση 28 γωνιών (όλων), θεωρώντας, για την επίλυση του δικτύου, δύο κορυφές σταθερές. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 11 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,5$  mm.
10. Μέτρηση 16 γωνιών (10 (ΓΕΑ) και 6 (ΓΕΕ)), δηλαδή χωρίς καμία διαγώνια σκόπευση και 16 αποστάσεων, δηλαδή 10 (ΠΑ) και 6 (ΠΠ). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 15 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής  $\pm 1,6$  mm.
11. Μέτρηση 22 γωνιών, 18 (ΓΕΕ) και 4 (ΓΕΑ), δηλαδή χωρίς τις πλάγιες σκοπεύσεις στο αεροσκάφος και 22 αποστάσεων (όλων). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 27 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής είναι  $\pm 2,4$  mm.
12. Μέτρηση 18 γωνιών, δηλαδή χωρίς καμία γωνιομέτρηση προς τις κορυφές πάνω στο αεροσκάφος 18 (ΓΕΕ) και 22 αποστάσεων (όλων). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 20 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής είναι  $\pm 4$  mm.
13. Μέτρηση 6 περιμετρικών γωνιών (6 ΓΕΕ) και 22 αποστάσεων (όλων). Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 11 και η μέση αβεβαιότητα κορυφής είναι  $\pm 4,1$  mm.

Στο διάγραμμα 3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα βελτιστοποίησης που προέκυψε από τα παραπάνω προγράμματα μετρήσεων.





**Διάγραμμα 3.1:** Διάγραμμα Βελτιστοποίησης  
**Diagram 3.1:** Optimization Diagram

Παρατηρώντας το διάγραμμα βελτιστοποίησης διαπιστώνεται ότι, οι πιο σημαντικές μεταβολές στη μέση αβεβαιότητα κορυφής, παρουσιάζονται όταν μειώνονται οι γωνιομετρήσεις. Επίσης διαπιστώνεται ότι, στα προγράμματα μετρήσεων στα οποία δεν συμμετέχουν οι γωνιομετρήσεις προς τις κορυφές του δικτύου που βρίσκονται πάνω στο αεροσκάφος, οι μέσες αβεβαιότητες κορυφής είναι της τάξης των  $\pm 4\text{mm}$ , που είναι σχετικά μεγάλες. Έτσι εξηγείται γιατί τα προγράμματα μετρήσεων (8, 10), στα οποία έχουν μετρηθεί λιγότερες γωνίες σε σχέση με τα προγράμματα μετρήσεων (11) και (12) η μέση αβεβαιότητα κορυφής είναι, παρόλα αυτά, μικρότερη σε μέγεθος της τάξης του  $\pm 1,5\text{mm}$ . Αντίθετα, στα προγράμματα μετρήσεων στα οποία μεταβάλλεται το πλήθος των πλευρομετρήσεων, η μέση αβεβαιότητα κορυφής μεταβάλλεται ομαλά. Στο διάγραμμα βελτιστοποίησης με μοβ χρώμα επισημαίνεται το πρόγραμμα μετρήσεων (5) που, τελικά, επιλέχθηκε να εφαρμοστεί. Σύμφωνα με αυτό μετρήθηκαν 24 οριζόντιες γωνίες και 22 αποστάσεις.

### 3.7 Μετρήσεις Στοιχείων Δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν είναι οι οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες και τα κεκλιμένα μήκη, εφαρμόζοντας το πρόγραμμα μετρήσεων (5), που επιλέχθηκε από το διάγραμμα βελτιστοποίησης. Οι μετρήσεις έγιναν σε δύο πλήρεις περιόδους. Για τις μετρήσεις των αποστάσεων προς τις κορυφές Σ1, Σ2, Σ3, Σ4, οι οποίες έχουν υλοποιηθεί πάνω στο αεροσκάφος, χρησιμοποιήθηκε το ειδικό πρίσμα (εικόνα 3.5). Η επεξεργασία των στοιχείων έγινε σε περιβάλλον Microsoft Excel. Οι πρωτογενείς μετρήσεις και η επεξεργασία τους περιλαμβάνονται στο παράρτημα II. Τα τελικά στοιχεία του δικτύου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.2.

ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΓΩΝΙΕΣ (g)		ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ (m)	
$\Sigma_9-\Sigma_5-\Sigma_{10}$	106.7985	$\Sigma_5\Sigma_9$	18.337
$\Sigma_9-\Sigma_5-\Sigma_4$	49.2430	$\Sigma_5\Sigma_{10}$	10.248
$\Sigma_9-\Sigma_5-\Sigma_1$	70.6735	$\Sigma_5\Sigma_4$	19.246
$\Sigma_9-\Sigma_5-\Sigma_6$	103.2445	$\Sigma_5\Sigma_1$	15.858
$\Sigma_9-\Sigma_5-\Sigma_8$	33.0360	$\Sigma_5\Sigma_6$	17.881
$\Sigma_5-\Sigma_{10}-\Sigma_9$	62.4570	$\Sigma_5\Sigma_8$	30.648
$\Sigma_5-\Sigma_{10}-\Sigma_1$	122.3435	$\Sigma_{10}\Sigma_9$	21.943
$\Sigma_5-\Sigma_{10}-\Sigma_6$	191.7120	$\Sigma_{10}\Sigma_1$	9.079
$\Sigma_5-\Sigma_{10}-\Sigma_7$	142.4190	$\Sigma_{10}\Sigma_6$	7.672
$\Sigma_{10}-\Sigma_6-\Sigma_1$	74.0540	$\Sigma_{10}\Sigma_7$	23.456
$\Sigma_{10}-\Sigma_6-\Sigma_3$	89.2895	$\Sigma_6\Sigma_1$	8.767
$\Sigma_{10}-\Sigma_6-\Sigma_7$	132.2500	$\Sigma_6\Sigma_3$	14.913
$\Sigma_{10}-\Sigma_6-\Sigma_9$	53.8760	$\Sigma_6\Sigma_7$	18.757
$\Sigma_6-\Sigma_7-\Sigma_3$	58.4840	$\Sigma_6\Sigma_9$	26.259
$\Sigma_6-\Sigma_7-\Sigma_2$	78.1505	$\Sigma_7\Sigma_3$	11.725
$\Sigma_6-\Sigma_7-\Sigma_8$	117.9470	$\Sigma_7\Sigma_2$	12.457
$\Sigma_6-\Sigma_7-\Sigma_9$	75.5450	$\Sigma_7\Sigma_8$	15.763
$\Sigma_7-\Sigma_8-\Sigma_2$	57.9210	$\Sigma_7\Sigma_9$	26.702
$\Sigma_7-\Sigma_8-\Sigma_9$	119.5425	$\Sigma_8\Sigma_2$	9.238
$\Sigma_7-\Sigma_8-\Sigma_5$	84.3315	$\Sigma_9\Sigma_2$	14.277
$\Sigma_7-\Sigma_9-\Sigma_2$	397.7290	$\Sigma_9\Sigma_4$	14.206
$\Sigma_7-\Sigma_9-\Sigma_4$	14.5615	$\Sigma_9\Sigma_8$	17.310
$\Sigma_7-\Sigma_9-\Sigma_8$	361.9510		
$\Sigma_7-\Sigma_9-\Sigma_5$	93.6890		

**Πίνακας 3.2:** Στοιχεία δικτύου οριζόντιου ελέγχου  
**Table 3.2:** Observations of the horizontal control network

### 3.8 Συνόρθωση Παρατηρήσεων – Επίλυση Δικτύου

Η συνόρθωση των παρατηρήσεων και η επίλυση του δικτύου έγινε με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων, με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις, στο αυθαίρετο, τοπικό σύστημα αναφοράς, που έχει ορισθεί στη παράγραφο 3.2.

Ως σταθερή κορυφή επιλέχθηκε η Σ1 και ως ημισταθερή κορυφή η Σ2. Η γωνία διεύθυνσης  $\alpha_{\Sigma_1\Sigma_2}$  ορίστηκε  $\alpha_{\Sigma_1\Sigma_2} = 100 \text{ grad}$ .

Τα στοιχεία του δικτύου δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.3

Συντεταγμένες σταθερής κορυφής	$X_{\Sigma_1}, Y_{\Sigma_1}$	1000 m, 1000 m
Γωνία διεύθυνσης σταθερής-ημισταθερής κορυφής	$\alpha_{\Sigma_1\Sigma_2}$	100 grad
Πλήθος κορυφών δικτύου	$v$	10
Πλήθος παρατηρήσεων	$n$	46
Πλήθος άγνωστων καθοριστικών παραμέτρων	$m$	17
Βαθμοί ελευθερίας	$r = n - m$	29
a priori τυπικό σφάλμα μονάδας βάρους	$\sigma_0$	$\pm 1$
a posteriori τυπικό σφάλμα μονάδας βάρους	$\hat{\sigma}_0$	$\pm 0.99$
Αβεβαιότητα μέτρησης γωνιών	$\sigma_{\gamma\omega\nu\nu\acute{\iota}\omega\nu}$	$\pm 30\text{cc}$
Αβεβαιότητα μέτρησης αποστάσεων	$\sigma_{\alpha\pi\acute{\omicron}\sigma\tau\alpha\sigma\eta\varsigma}$	$\pm 4\text{mm}$

Πίνακας 3.3: Στοιχεία επίλυσης δικτύου

Table 3.3: Elements of the horizontal control network adjustment

Στον πίνακα 3.4 παρατίθενται οι προσωρινές (X, Y) και οι τελικές συντεταγμένες των κορυφών του δικτύου οριζοντίου ελέγχου ( $\hat{X}, \hat{Y}$ ), μετά τη συνόρθωση, με τις αβεβαιότητες τους.

ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΚΟΡΥΦΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ						
ΚΟΡΥΦΕΣ	X (m)	$\hat{X}$ (m)	$\sigma_{\hat{X}}$ (mm)	Y (m)	$\hat{Y}$ (m)	$\sigma_{\hat{Y}}$ (mm)
Σ1	1000.000	1000.000	0	1000.000	1000.000	0
Σ2	1010.371	1010.388	$\pm 1,2$	1000.000	1000.000	$\pm 1,2$
Σ3	1006.675	1006.683	$\pm 1,3$	999.217	999.209	$\pm 1,0$
Σ4	1006.707	1006.716	$\pm 1,1$	1000.782	1000.783	$\pm 1,3$
Σ5	992.882	992.894	$\pm 1,5$	1014.171	1014.170	$\pm 1,5$
Σ6	992.048	992.055	$\pm 0,9$	996.309	996.307	$\pm 1,0$
Σ7	1008.696	1008.702	$\pm 1,9$	987.668	987.661	$\pm 0,9$
Σ8	1019.564	1019.575	$\pm 1,4$	999.087	999.079	$\pm 1,1$
Σ9	1011.218	1011.233	$\pm 1,7$	1014.251	1014.247	$\pm 1,0$
Σ10	991.835	991.844	$\pm 0,9$	1003.977	1003.976	$\pm 1,1$

Πίνακας 3.4: Συντεταγμένες οριζοντίου δικτύου και οι αβεβαιότητες τους

Table 3.4: Coordinates of the horizontal control network points together with their standard deviations

### 3.9 Στατιστικοί Έλεγχοι

#### 3.9.1 Ολικός Έλεγχος αξιοπιστίας – Test $\chi^2$

Με τον ολικό έλεγχο ελέγχεται αν η μηδενική υπόθεση ( $H_0$ ) είναι σωστή. Η ( $H_0$ ) περιλαμβάνει τις παραδοχές: τα σφάλματα των παρατηρήσεων είναι τυχαία και ακολουθούν την κανονική κατανομή, και το στοχαστικό και μαθηματικό μοντέλο είναι ορθά.

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και βαθμούς ελευθερίας  $r = 29$  προσδιορίζεται το εκατοστιαίο σημείο της κατανομής  $\chi^2$ ,  $\chi^2_{0.95,29} = 42.56$

Για να ισχύει η αρχική υπόθεση πρέπει να ικανοποιείται η ανισότητα:

$$\widehat{\sigma}_0^2 \leq \frac{\sigma_0^2 \chi^2}{r} \quad (3.2)$$
$$(0.99)^2 \leq \frac{1^2 42.56}{29} \Rightarrow (0.99)^2 \leq 1.47 \Rightarrow |0.99| \leq |1.21|$$

Διαπιστώνεται ότι η μηδενική υπόθεση ισχύει, δηλαδή τα σφάλματα των μετρήσεων είναι τυχαία και το στοχαστικό μοντέλο έχει ορθά επιλεγθεί.

#### 3.9.2 Έλεγχος Παρατηρήσεων (Σάρωση Δεδομένων κατά Baarda)

Μετά την αποδοχή της παραπάνω μηδενικής υπόθεσης του ολικού ελέγχου, γίνεται έλεγχος των μεμονωμένων παρατηρήσεων για τον εντοπισμό χονδροειδών ή συστηματικών σφαλμάτων. Ελέγχεται αν ισχύει η μηδενική υπόθεση ( $H_0$ ), ότι δεν υπάρχει χονδροειδής ή συστηματικό σφάλμα στην παρατήρηση που ελέγχεται, με την παραδοχή πως είναι η μοναδική με χονδροειδής ή συστηματικό σφάλμα.

Για κάθε παρατήρηση θεωρείται πως ισχύει η ( $H_0$ ) αν ικανοποιείται η ανισότητα :

$$W_i = \left| \frac{u_i}{\sigma_{ui}} \right| \leq \sqrt{F_{1,\infty,(1-\alpha_0)}} \quad (3.3)$$

όπου  $\alpha_0$  : το επίπεδο σημαντικότητας του μονοδιάστατου ελέγχου,  $\alpha_0 = 0.001$

$u_i$  : υπόλοιπα

$\sigma_{ui}$  : τυπικά σφάλματα υπολοίπων

$$\sqrt{F_{1,\infty,(1-\alpha_0)}} = 3.29$$

Δηλαδή ελέγχεται αν ισχύει η ανισότητα :  $|W_i| \leq |3.29|$

Τα αποτελέσματα του ελέγχου παρατίθενται στον πίνακα 3.5, από τον οποίο διαπιστώνεται ότι η ανισότητα ισχύει για κάθε παρατήρηση, επομένως δεν υπάρχει χονδροειδής ή συστηματικό σφάλμα στις παρατηρήσεις για το επιλεγμένο επίπεδο σημαντικότητας.

$v_i$ (cc)	$\sigma_{vi}$ (cc)	$\left  \frac{v_i}{\sigma_{vi}} \right $	$v_i$ (mm)	$\sigma_{vi}$ (mm)	$\left  \frac{v_i}{\sigma_{vi}} \right $
4,5	±21,6	0,2	2,1	±3,8	0,6
13,3	±7,5	1,7	0,2	±3,7	0,0
-9,6	±15,3	0,6	-0,1	±3,8	0,7
18,3	±24,3	0,7	-2,7	±3,7	1,5
3,8	±23,8	0,2	-5,5	±3,6	0,6
-25,0	±21,9	1,1	2,2	±3,7	1,5
-2,1	±10,4	0,2	5,3	±3,8	0,5
-4,0	±18,1	1,7	1,7	±3,8	1,3
38,2	±21,8	1,3	5,0	±3,7	0,0
8,8	±6,8	0,6	0,0	±3,9	1,1
-3,2	±5,0	0,3	3,9	±3,8	1,4
-5,6	±20,2	0,5	5,5	±3,7	0,1
12,0	±21,8	0,1	-0,2	±3,7	0,5
0,3	±3,9	0,5	1,3	±3,8	0,3
-9,3	±17,9	0,7	-2,4	±3,8	0,6
14,8	±19,5	0,5	-3,4	±3,8	0,9
13,1	±22,6	0,4	2,7	±3,7	0,7
-1,8	±4,5	2,2	3,8	±3,9	1,0
42,6	±19,2	1,5	-5,4	±3,8	1,4
-35,9	±24,1	0,2	-5,3	±3,7	1,3
-4,1	±20,5	1,3	-5,8	±3,8	1,5
-7,3	±5,5	0,9	0,6	±3,8	0,2
-20,6	±21,4	2,2			
46,9	±20,9	0,5			

**Πίνακας 3. 5:** Σάρωση παρατηρήσεων κατά Baarda

**Table 3.5:** Baarda Data snooping

### 3.10 Προσδιορισμός υψομέτρων κορυφών δικτύου

Για τον προσδιορισμό των υψομέτρων των κορυφών Σ5, Σ6, Σ7, Σ8, Σ9, Σ10 του δικτύου, που έχουν υλοποιηθεί περιμετρικά του αεροπλάνου, εφαρμόσθηκε η μέθοδος της διπλής γεωμετρικής χωροστάθμησης. Για τον υπολογισμό των υψομέτρων δόθηκε στην κορυφή Σ1 αυθαίρετο υψόμετρο 100 m ( $H_{\Sigma_1} = 100\text{m}$ ). Τα υψόμετρα των κορυφών Σ2, Σ3, Σ4 που βρίσκονται πάνω στο αεροσκάφος προσδιορίσθηκαν με τριγωνομετρική υψομετρία.

Για τις μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός :

- Ψηφιακός χωροβάτης Leica Sprinter 150M (στον πίνακα 3.6 παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του).

Τεχνικά χαρακτηριστικά Leica Sprinter 150M	
Ακρίβεια διπλής γεωμετρικής χωροστάθμησης με ψηφιακή μέτρηση	$\pm 1.5 \text{ mm} / \sqrt{1\text{km}}$
Ακρίβεια διπλής γεωμετρικής χωροστάθμησης με οπτική μέτρηση	$\pm 2.5\text{mm} / \sqrt{1\text{km}}$
Ακρίβεια μέτρησης απόστασης	10mm για $D \leq 10 \text{ m}$
Εμβέλεια	2-100 m
Χρόνος μέτρησης	< 3 sec
Αποθηκευτική μνήμη	πάνω από 1.000 σημεία
Βάρος	2.5 kg

Πίνακας 3.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά ψηφιακού χωροβάτη Leica Sprinter 150M

Table 3.6: Technical features of Leica digital level Sprinter 150M

- Κωδικοποιημένη σταδία αλουμινίου 3m,
- τρίποδας αλουμινίου,
- ειδική βάση για σημειακή τοποθέτηση της σταδίας στις περιμετρικές κορυφές του δικτύου (εικόνα 3.6),
- βαριά χωροσταθμική βάση – χελώνα.



Εικόνα 3.6: Ειδική Βάση για τη σημειακή εφαρμογή της σταδίας

Figure 3.6: Special construction for the leveling

Στο παράρτημα II παρατίθενται οι πρωτογενείς μετρήσεις της γεωμετρικής χωροστάθμησης και η επεξεργασία τους.

Τα υψόμετρα των κορυφών του δικτύου με τις αβεβαιότητές τους παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα 3.7.

<b>ΚΟΡΥΦΗ</b>	<b>H (m)</b>	<b><math>\sigma_H</math> (mm)</b>
Σ1	100.000	0,0
Σ2	100.467	±1,6
Σ3	100.347	±2,0
Σ4	100.412	±2,0
Σ5	98.477	±2,0
Σ6	98.404	±2,2
Σ7	98.647	±2,1
Σ8	98.879	±2,0
Σ9	98.771	±2,0
Σ10	98.452	±2,3

**Πίνακας 3.7:** Υψόμετρα κορυφών του Δικτύου Οριζοντίου Ελέγχου με τις αβεβαιότητες τους  
**Table 3.7:** Heights of the Horizontal Control Network's points together with their standard deviations





**Κεφάλαιο 4**  
**ΣΑΡΩΣΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ**



## 4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για τη σάρωση του αεροσκάφους και περιγράφεται η διαδικασία της σάρωσης του.

## 4.2 Εξοπλισμός Σάρωσης

Για την πραγματοποίηση των σαρώσεων χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Επίγειος σαρωτής Leica ScanStation2 με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.,
- Ειδικός βαρύς τρίποδας Leica για την τοποθέτηση του σαρωτή,
- Ειδικός HDS ημισφαιρικός στόχος για τον μηδενισμό του σαρωτή,
- Τρίποδας και τρικόχλιο με οπτική κέντρωση για την τοποθέτηση του ημισφαιρικού στόχου,
- Μετροταινία για τη μέτρηση του ύψους του οργάνου (σαρωτή) και του ημισφαιρικού στόχου,
- Φορητός υπολογιστής με εγκατεστημένο το λογισμικό Leica Cyclone 6.0, μέσω του οποίου ελέγχεται ο σαρωτής και αποθηκεύονται τα αποτελέσματα της σάρωσης,
- Γεννήτρια και καλώδιο τροφοδοσίας του σαρωτή και του υπολογιστή και καλώδιο LAN για την επικοινωνία σαρωτή - υπολογιστή.

<b>Τεχνικά Χαρακτηριστικά LEICA SCANSTATION 2</b>	
<b>Τύπος laser</b>	Πράσινο παλμικό laser μήκους κύματος 532mm
<b>Εμβέλεια Σάρωσης</b>	300 m
<b>Ταχύτητα Σάρωσης</b>	50.000σημεία/δευτερόλεπτο
<b>Ακρίβεια μέτρησης θέσης για αποστάσεις ως 50 m</b>	± 6 mm
<b>Ακρίβεια μέτρησης μήκους για αποστάσεις ως 50 m</b>	± 4mm
<b>Ακρίβεια μέτρησης γωνιών για αποστάσεις ως 50 m</b>	±12'' (36 cc)
<b>Διαστάσεις (πλάτος × μήκος × ύψος)</b>	265mm × 370mm × 510mm
<b>Βάρος</b>	18.8 kg

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά σαρωτή Leica ScanStation 2  
Table 4.1: Technical features of 3D laser Scanner Leica ScanStation 2

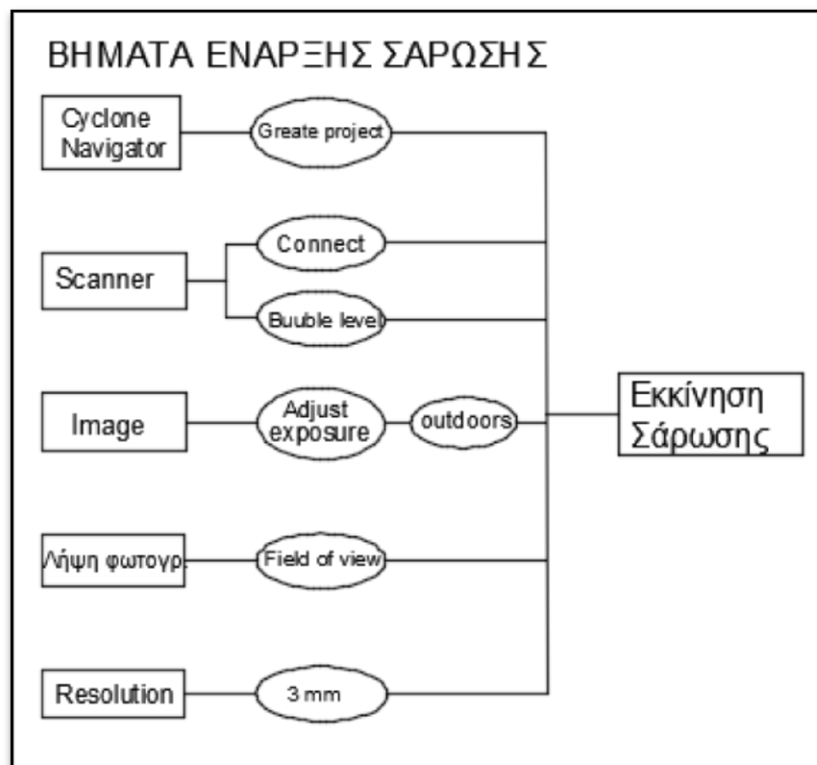
### 4.3 Διαδικασία Σάρωσης

Ο σαρωτής τοποθετήθηκε σε κάθε κορυφή του δικτύου περιμετρικά του αεροσκάφους, κεντρώθηκε και οριζοντιώθηκε. Αντίστοιχα, ο ημισφαιρικός στόχος τοποθετήθηκε σε κορυφή του δικτύου, ορατή από το σαρωτή, για να πραγματοποιηθεί η άμεση γεωαναφορά του νέφους σημείων.

Παρατίθενται τα βήματα που ακολουθήθηκαν πριν την έναρξη των σαρώσεων :

- Δημιουργία αρχείου, στο οποίο θα αποθηκευτούν οι σαρώσεις. Τα αρχεία έχουν όνομα Scanworld. (Cyclone Navigator → Create Project)
- Σύνδεση σαρωτή με τον Η/Υ ( Scanner → Connect )
- Διόρθωση οριζοντίωσης σαρωτή μέσω του Η/Υ (Scanner → Bubble Level)
- Ρύθμιση συνθηκών φωτεινότητας για τη λήψη φωτογραφίας από το σαρωτή (image → adjust exposure → outdoors)
- Αναγνώριση του γύρω χώρου από το όργανο για τη λήψη φωτογραφίας (Field of view)
- Επιλογή βήματος σάρωσης (resolution), τέθηκε ίσο με 3mm, καθώς κρίθηκε ότι θα αποδώσει με την επιθυμητή λεπτομέρεια την επιφάνεια του αεροσκάφους
- Εκκίνηση σάρωσης.

Στο διάγραμμα 4.1 παρατίθεται το διάγραμμα ροής των βημάτων για την έναρξη της σάρωσης.



**Διάγραμμα 4.1:** Διάγραμμα ροής έναρξης σάρωσης

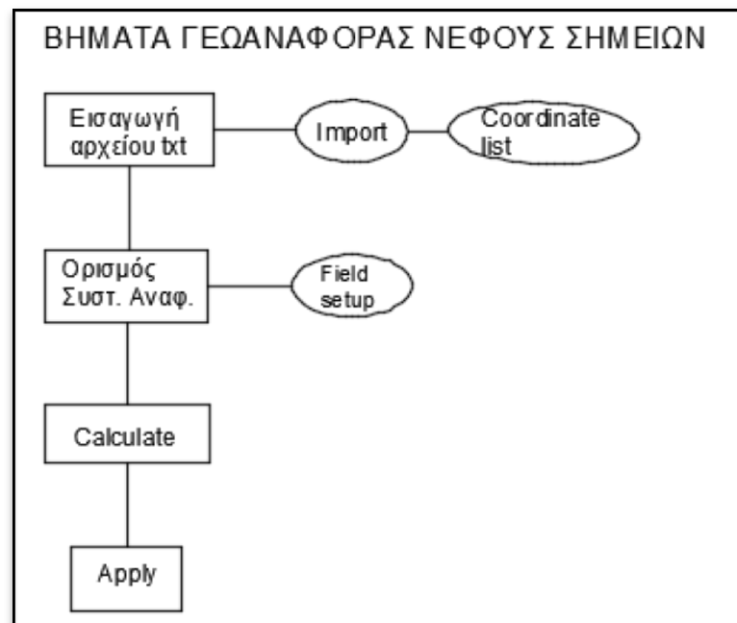
**Diagram 4.1:** Diagram presenting the steps to be followed before starting the scan

Στη συνέχεια γίνεται σάρωση του ημισφαιρικού στόχου για τη γεωαναφορά του νέφους. Η μέθοδος γεωαναφοράς είναι η Known Back Sight. Απαραίτητα στοιχεία για την πραγματοποίηση της γεωαναφοράς με τη μέθοδο αυτή είναι: οι συντεταγμένες και το υψόμετρο των κορυφών που βρίσκεται ο σαρωτής και ο ημισφαιρικός στόχος καθώς και το ύψος σαρωτή και ημισφαιρικού στόχου. Αρχικά γίνεται επιλογή του τύπου του στόχου (Sphere target), στη συνέχεια γίνεται σάρωση του ημισφαιρικού στόχου και επιλέγεται το κέντρο της σφαίρας (pick point). Ο σαρωτής σαρώνει πάλι τη σφαίρα και προσδιορίζει τα (X, Y, H) του κέντρου της, τα οποία συγκρίνει με αυτά που του έχουν δοθεί. Από τη σύγκριση προκύπτει η ποιότητα της γεωαναφοράς. Εφόσον η ποιότητα της γεωαναφοράς γίνει αποδεκτή, επιλέγεται στο Cyclone η περιοχή σάρωσης πάνω στη φωτογραφία.

Παρατίθενται συνοπτικά τα βήματα για τη γεωαναφορά του νέφους :

- Εισαγωγή αρχείου txt με τις συντεταγμένες των κορυφών (Import → Coordinate list)
- Συμπλήρωση πλαισίου Field setup (ο σαρωτής μετρά στο σύστημα αναφοράς που του ορίζει ο χρήστης, δίνοντας τις συντεταγμένες της θέσης του οργάνου και του στόχου και το ύψος του οργάνου και του στόχου).
- Εκτέλεση εντολών για τον υπολογισμό της γεωαναφοράς ( Calculate → Apply )

Στο διάγραμμα 4.2 παρατίθεται το διάγραμμα ροής με τα βήματα για τη γεωαναφορά του νέφους σημείων.



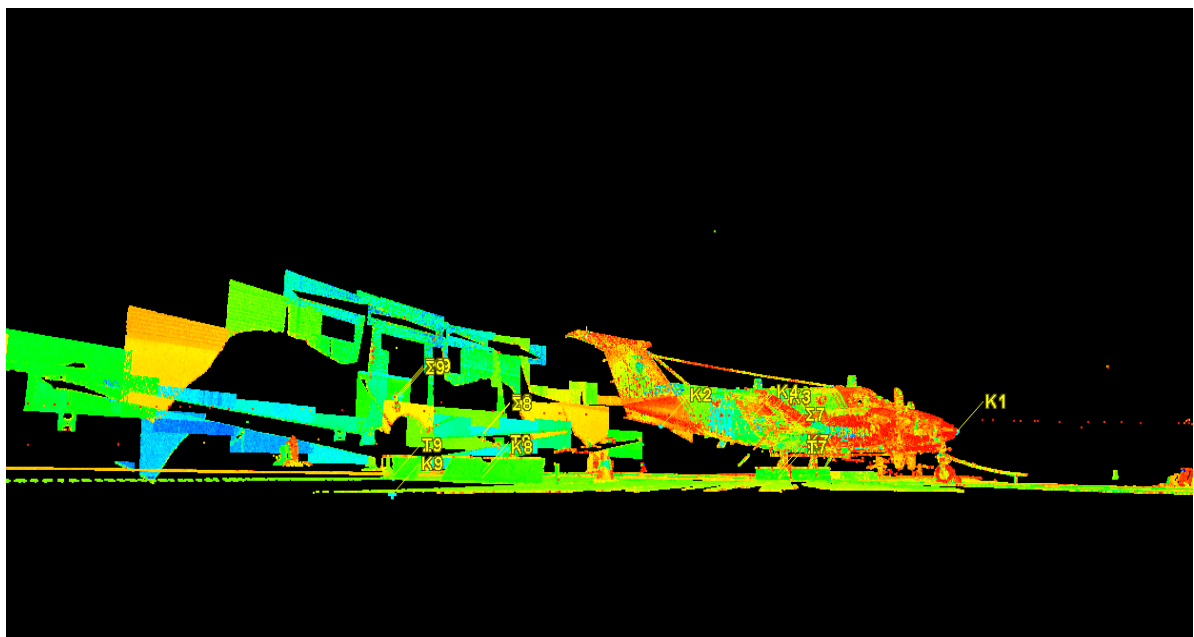
**Διάγραμμα 4.2:** Διάγραμμα ροής γεωαναφοράς νέφους σημείων  
**Diagram 4.2:** Diagram presenting the steps for the georeferencing of point cloud

Στον πίνακα 4.2 παρατίθεται το οριζοντιογραφικό και το υψομετρικό σφάλμα γεωαναφοράς από κάθε κορυφή.

ΚΟΡΥΦΗ	$\sigma_{HOR}$ (m)	$\sigma_{VER}$ (m)
Σ5	0.006	-0.004
Σ6	0.001	-0.003
Σ7	0.006	-0.002
Σ8	0.005	-0.002
Σ9	0.005	-0.002
Σ10	0.004	-0.004

**Πίνακας 4.2:** Αποτελέσματα Γεωαναφοράς  
**Table 4.2:** Georeferencing Results

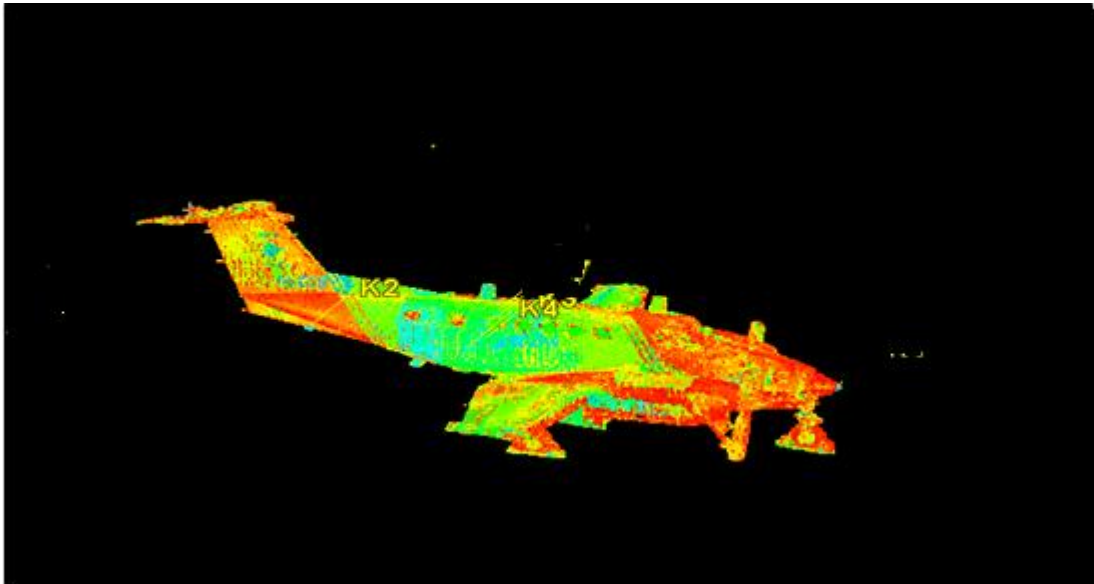
Μετά την ολοκλήρωση των σαρώσεων του αεροσκάφους από τις περιμετρικές κορυφές του δικτύου, πρέπει να γίνει συνένωση των επιμέρους νεφών (Scanworlds 1-6) σε ένα ενιαίο νέφος σημείων. Η διαδικασία είναι αρκετά απλή καθώς κάθε νέφος αναφέρεται στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Η συνένωση γίνεται μέσω του λογισμικού Cyclone (Create Scanworld/Freeze Registration και Create and open Modelspace). Στην εικόνα 4.1 φαίνεται το αποτέλεσμα της συνένωσης των επιμέρους νεφών : το αεροσκάφος και ο περιβάλλον χώρος.



**Εικόνα 4.1:** Συνένωση επιμέρους νεφών σημείων  
**Figure 4.1:** Final point cloud

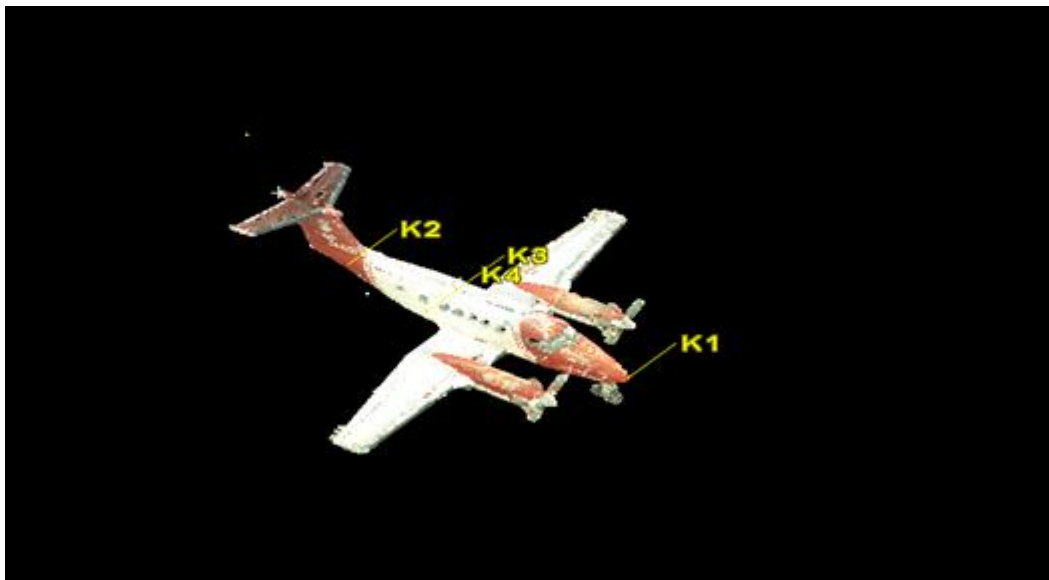
Στη συνέχεια απαιτείται να γίνει καθαρισμός του θορύβου του νέφους σημείων και αφαίρεση της περιττής πληροφορίας. Η διαδικασία πραγματοποιείται στο λογισμικό Cyclone με την εντολή Polygon Fence όπου επιλέγονται τα περιττά σημεία και διαγράφονται.

Από το αρχικό πλήθος των 34.901.421 σημείων που σαρώθηκε, ύστερα από τον καθαρισμό του θορύβου και την αφαίρεση της περιττής πληροφορίας, το πλήθος σημείων είναι 18.306.481 Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 4.2



**Εικόνα 4.2:** Νέφος σημείων μετά την αφαίρεση του θορύβου  
**Figure 4.2:** Point cloud of the aircraft after the noise removal

Το λογισμικό, εκτός από την τεχνητή σκίαση, δίνει τη δυνατότητα διατήρησης των χρωμάτων στις πραγματικές συνθήκες φωτισμού που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 4.3.



**Εικόνα 4.3:** Αποτέλεσμα σάρωσης με πραγματικά χρώματα  
**Figure 4.3:** Scan result with real colors





**Κεφάλαιο 5**  
**ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ**



## 5.1 Γενικά

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας της μοντελοποιημένης επιφάνειας του αεροσκάφους στο λογισμικό Geomagic Studio, γίνεται η αξιολόγηση αυτής της επιφάνειας και στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση της δυνατότητας ανίχνευσης των πιθανών παραμορφώσεων της επιφάνειας της ατράκτου.

## 5.2 Διαδικασία Μοντελοποίησης

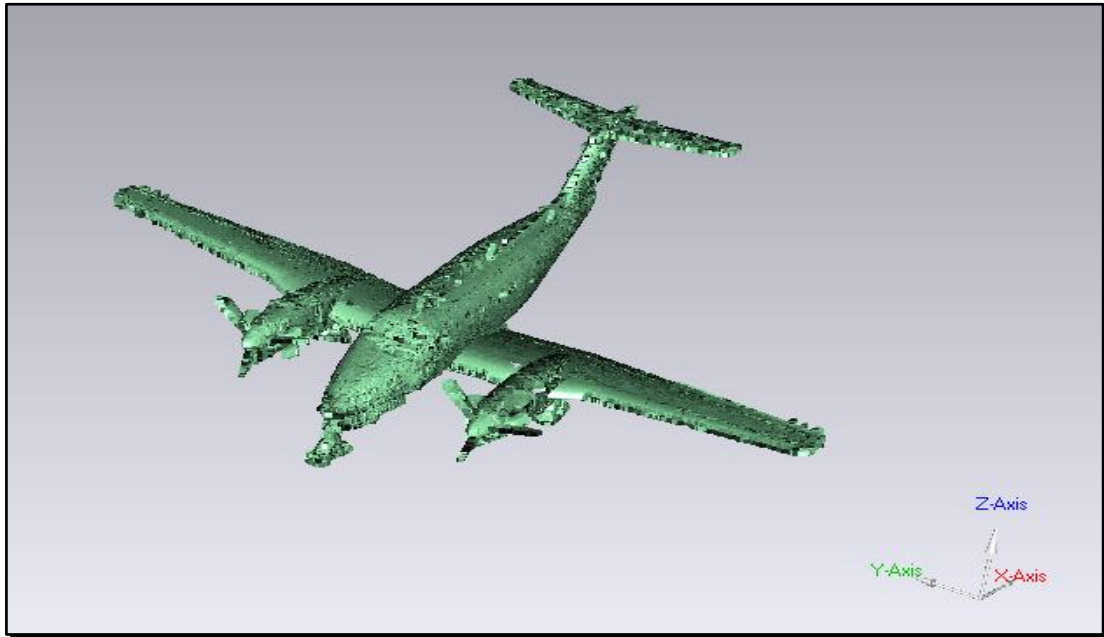
Αφού ολοκληρωθεί η συνένωση των νεφών των σημείων και ολοκληρωθεί η απομάκρυνση του θορύβου, μπορεί να γίνει η επεξεργασία για τη δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου του αεροσκάφους. Η επεξεργασία του μοντέλου, σε πρώτη φάση, πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Leica Cyclone και στη συνέχεια με το λογισμικό Geomagic Studio.

Το αποτέλεσμα της συνένωσης εξάγεται (export) σε αρχείο xyz από το λογισμικό Cyclone και εισάγεται στο λογισμικό Geomagic Studio με την εντολή <<File → Import >>. Το νέφος, όταν εισάγεται στο πρόγραμμα, είναι αποχρωματισμένο (εικόνα 5.1).



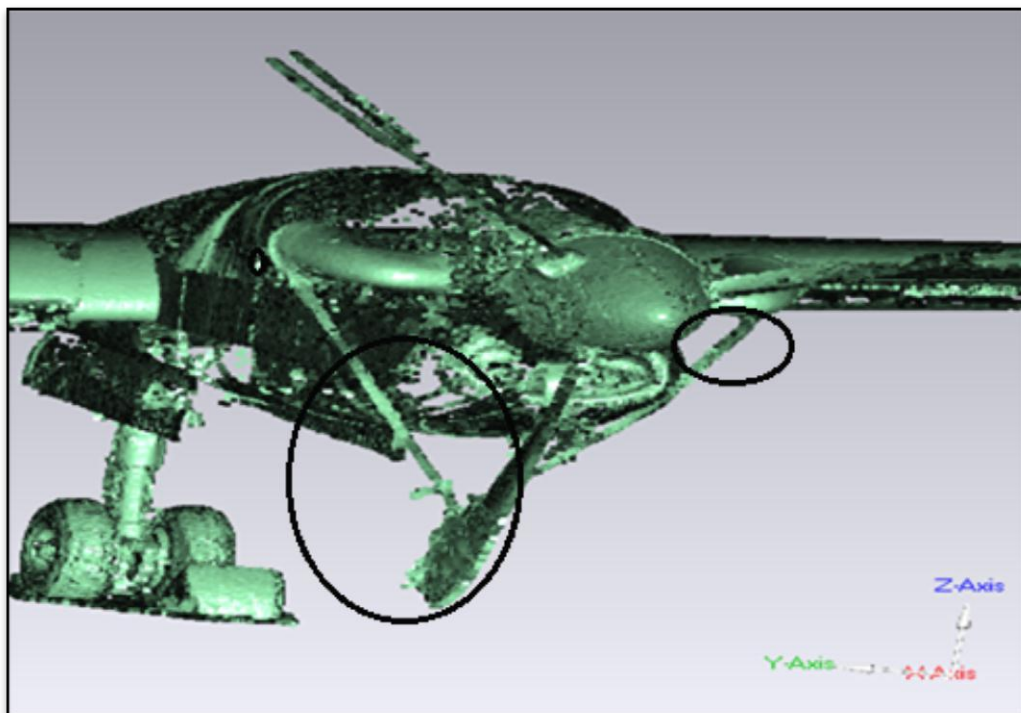
**Εικόνα 5.1:** Νέφος στο λογισμικό Geomagic Studio  
**Figure 5.1:** Point cloud inserted in Geomagic Studio software

Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.1, η επεξεργασία του νέφους καθίσταται δύσκολη χωρίς την ύπαρξη χρωμάτων, καθώς δεν γίνεται αντιληπτό το ανάγλυφο του αεροσκάφους χωρίς σκίαση, με αποτέλεσμα να μην αναγνωρίζεται εύκολα το αντικείμενο στις 3 διαστάσεις του. Επομένως το αντικείμενο θα πρέπει να χρωματιστεί με κατάλληλες χρωματικές επιλογές. Η εισαγωγή χρώματος γίνεται με την εντολή << View → Shading → Shade points >>, η οποία δίνει πράσινη μονοχρωματική απόχρωση στο νέφος. Έτσι γίνεται καλύτερα αντιληπτό το σχήμα του αεροσκάφους. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 5.2.



**Εικόνα 5.2:** Χρωματισμός και φωτισμός νέφους σημείων στο Geomagic Studio  
**Figure 5.2:** Coloring and lighting of the points cloud in Geomagic Studio

Μετά το χρωματισμό του αντικειμένου ακολουθεί ο καθαρισμός του μοντέλου. Λόγω της μεγαλύτερης ευελιξίας του λογισμικού Geomagic Studio ήταν ευκολότερη η αφαίρεση περιττών σημείων, όπως τα σκοινιά που συγκρατούν τους έλικες κ.λπ. (εικόνα 5.3).



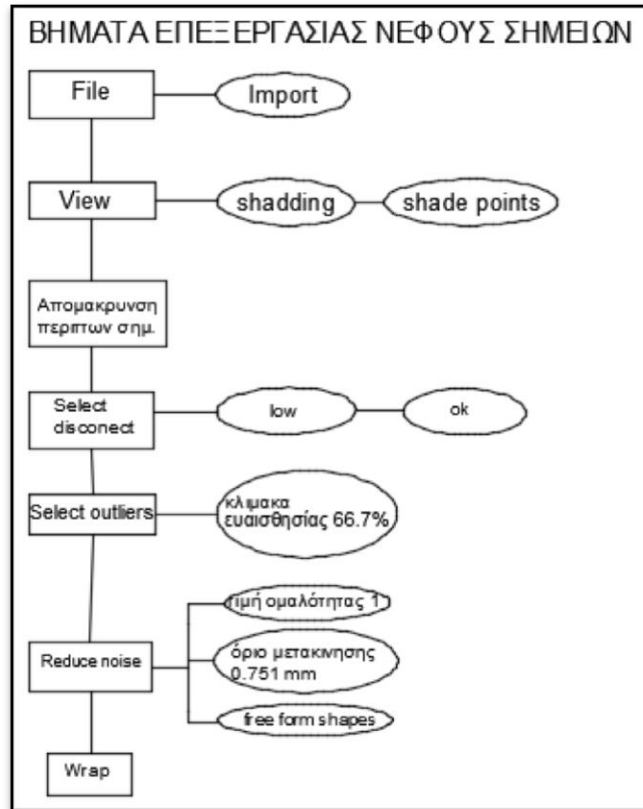
**Εικόνα 5.3:** Περιττά σημεία προς απαλοιφή στο Geomagic  
**Figure 5.3:** Elimination of unnecessary points in Geomagic

Τελικά, με τον καθαρισμό αυτόν, αφαιρέθηκαν **154.920** σημεία. Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή του αλγορίθμου «select disconnected → Low → Ok». Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εντοπίζει σημεία απομακρυσμένα από το αντικείμενο (κύριος όγκος σημείων) και τα απαλείφει (εντοπίστηκαν 1.956 σημεία). Μετά από την εφαρμογή του αλγορίθμου, το πλήθος των σημείων του νέφους είναι 18.149.605.

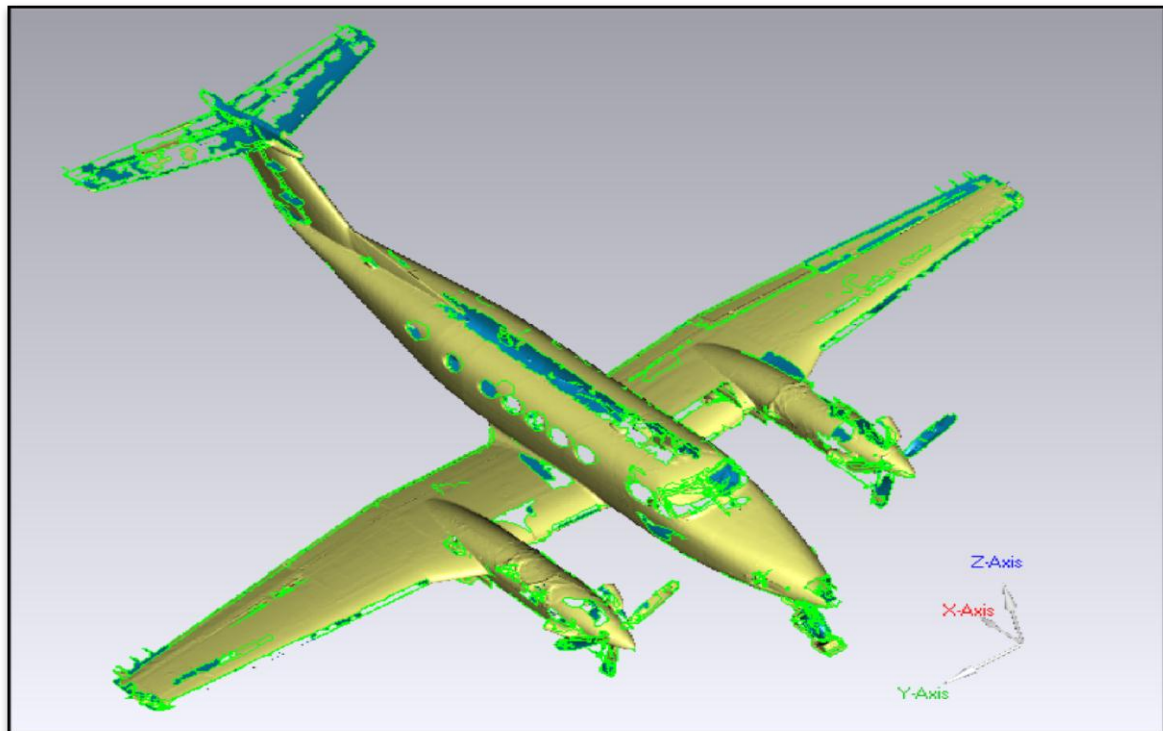
Για τη μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας του νέφους χρησιμοποιήθηκε η εντολή << select Outliers >>. Η εντολή αυτή είναι ένας αλγόριθμος του λογισμικού, ο οποίος, βάσει κατάλληλης κλίμακας ευαισθησίας, αναγνωρίζει σημεία ως θόρυβο. Η κλίμακα ευαισθησίας που επιλέχθηκε, ήταν η προτεινόμενη από το λογισμικό (66,67%). Από την εφαρμογή του αλγορίθμου ο συνολικός και τελικός αριθμός των σημείων του νέφους είναι 17.646.666 points.

Η περαιτέρω εξομάλυνση του νέφους έγινε με την εντολή <<Reduce Noise>>. Με τη συγκεκριμένη εντολή, ο αλγόριθμος εντοπίζει πάλι, βασιζόμενος σε κατάλληλες παραμέτρους (τιμή ομαλότητας, όριο μετακίνησης), σημεία ως θόρυβο, αλλά σε αυτή τη περίπτωση δεν τα απαλείφει, αλλά τα μετακινεί, προκειμένου να δημιουργηθούν ομαλότερες επιφάνειες. Η τιμή ομαλότητας, με εύρος επιλογής 0 ως 4, τέθηκε 1. Ο αλγόριθμος έτρεξε 3 επαναλαμβανόμενες φορές και το όριο μετακίνησης τέθηκε 0,751 mm (προδιαγραφές λογισμικού). Επίσης, επιλέχθηκε η παράμετρος <<free form shapes>> (σχήματα ελεύθερης μορφής) καθώς η επιφάνεια αποτελείται από σύνθετη γεωμετρική μορφή, η οποία δεν μπορεί να αναπαρασταθεί από απλούστερα γεωμετρικά σχήματα. Εκτελώντας και αυτή την εντολή, ολοκληρώθηκε η επεξεργασία του νέφους σημείων.

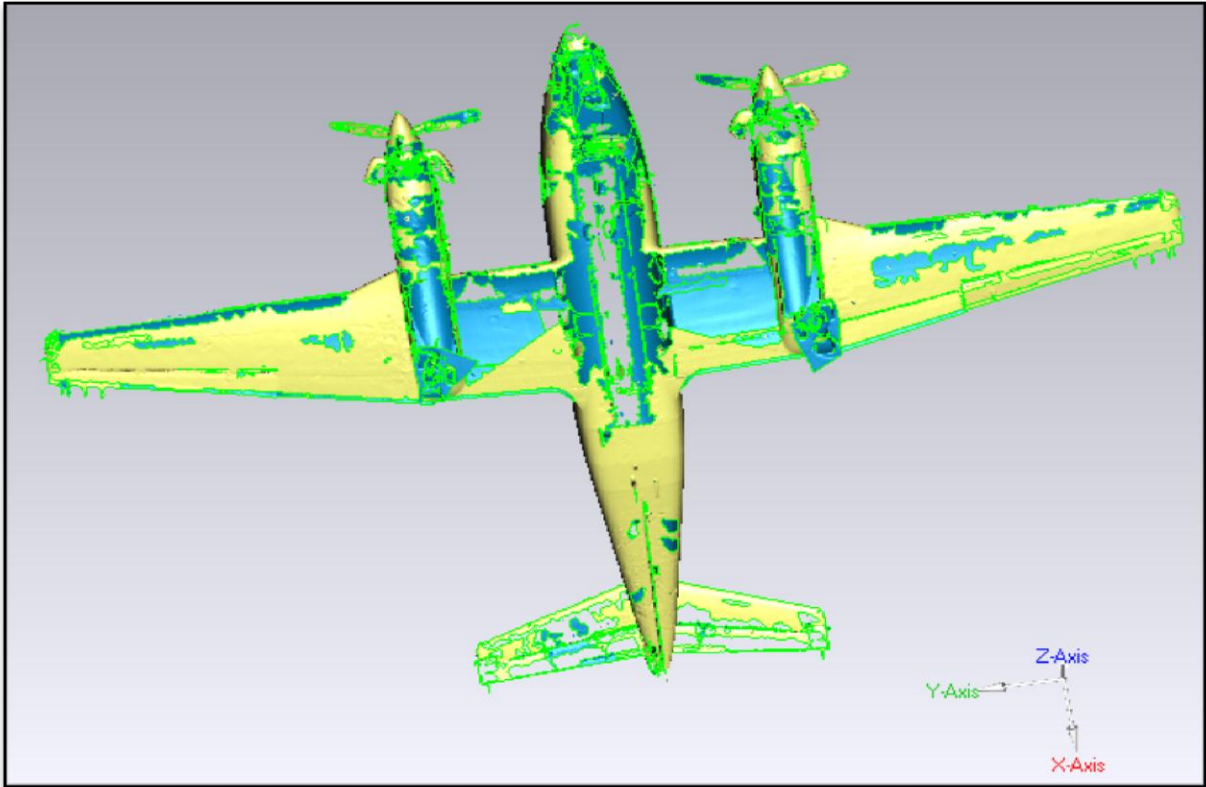
Τέλος, έγινε η μετατροπή του νέφους σε τρισδιάστατο μοντέλο τριγωνικών στοιχείων, χρησιμοποιώντας την εντολή <<Wrap>>. Με την εντολή αυτή δημιουργούνται τρίγωνα, των οποίων οι κορυφές είναι σημεία του νέφους. Προφανώς, η διαδικασία είναι δυνατή, εφόσον έχει προηγηθεί η απομάκρυνση των περιττών σημείων αλλά και του θορύβου. Στο διάγραμμα 5.1 παρουσιάζονται, συνοπτικά, τα βήματα που ακολουθήθηκαν στο λογισμικό Geomagic Studio για τη δημιουργία της επιφάνειας. Το τελικό αποτέλεσμα από την εφαρμογή των αλγορίθμων και της εντολής Wrap φαίνεται στην εικόνα 5.4 όπου παρουσιάζεται η πάνω επιφάνεια του αεροσκάφους και στην εικόνα 5.5 όπου παρουσιάζεται η κάτω επιφάνεια του αεροσκάφους.



**Διάγραμμα 5.1:** Διάγραμμα ροής εργασιών για τη δημιουργία της μοντελοποιημένης επιφάνειας  
**Diagram 5.1:** Diagram presenting the steps to create the modeled surface



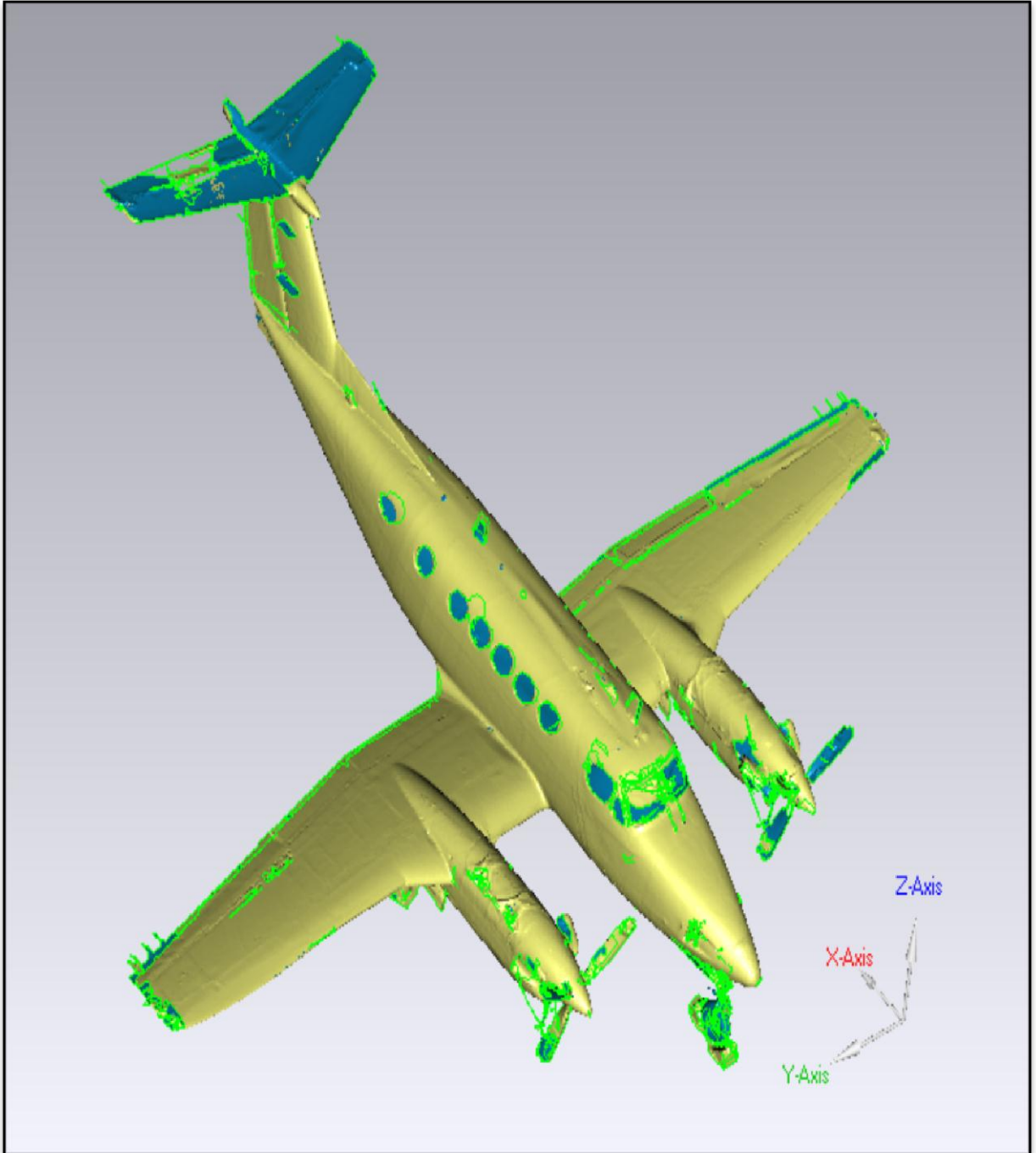
**Εικόνα 5.4:** Μοντελοποιημένη πάνω επιφάνεια του αεροσκάφους μετά την εντολή Wrap  
**Figure 5.4:** Modeled upper surface of the aircraft after applying the command “wrap”



**Εικόνα 5.5:** Μοντελοποιημένη κάτω επιφάνεια του αεροσκάφους μετά την εντολή Wrap  
**Figure 5.5:** Modeled bottom surface of the aircraft after applying the command “wrap”

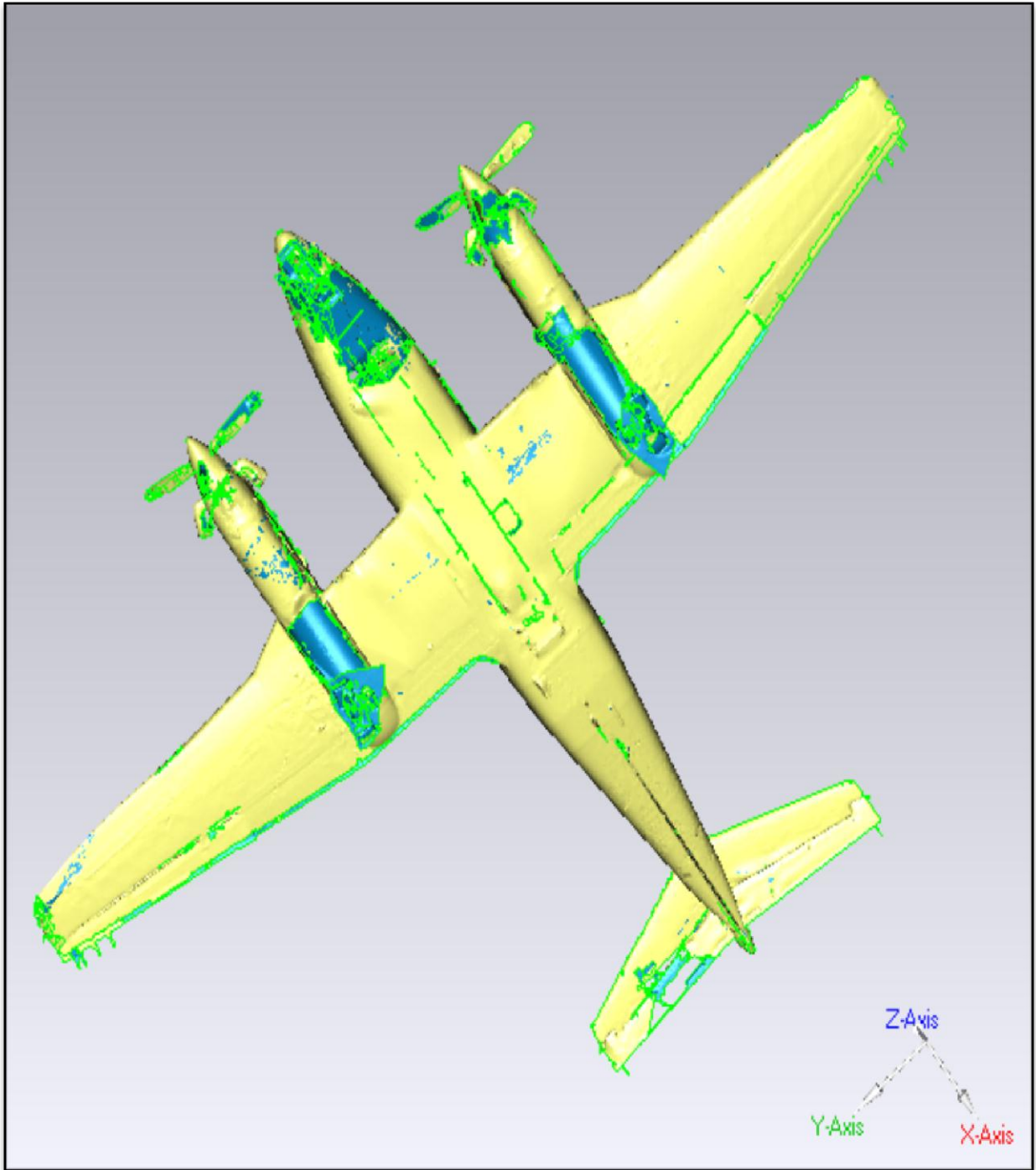
Όπως παρατηρείται στις εικόνες 5.4 και 5.5, υπάρχουν κενά στο μοντέλο, στο πάνω και στο κάτω μέρος της ατράκτου, στις θέσεις των πτερύγων και στον οριζόντιο σταθεροποιητή. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς δεν υπήρχε ορατότητα του σαρωτή στις περιοχές αυτές. Για την ολοκλήρωση του μοντέλου απαιτείται να συμπληρωθούν τα κενά αυτά στην επιφάνεια του αντικειμένου.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η εντολή <<Fill Holes>>. Η συγκεκριμένη εντολή δίνει τη δυνατότητα ολικής ή μερικής συμπλήρωσης κενών, καθώς και της συνένωσης των απομακρυσμένων τμημάτων του μοντέλου (bridge). Η συμπλήρωση των κενών μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη την καμπυλότητα των γύρω τριγώνων, ή η συμπλήρωσή τους να γίνει με όσο το δυνατό πιο επίπεδες επιφάνειες. Το τελικό μοντέλο, που δημιουργήθηκε μέσω του λογισμικού Geomagic Studio, φαίνεται στην εικόνα 5.6, για την πάνω επιφάνεια του αεροσκάφους, ενώ στην εικόνα 5.7 φαίνεται το αποτέλεσμα από την εφαρμογή της εντολής Fill Holes στην κάτω επιφάνεια της ατράκτου και των πτερύγων.



**Εικόνα 5.6:** Τελική μοντελοποιημένη πάνω επιφάνεια του αεροσκάφους  
**Figure 5.6:** Final modeled upper surface of the aircraft





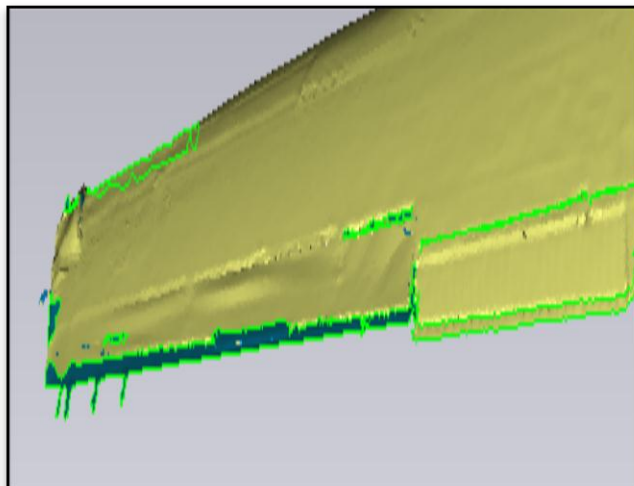
**Εικόνα 5.7:** Τελική μοντελοποιημένη κάτω επιφάνεια του αεροσκάφους  
**Figure 5.7:** Final modeled bottom surface of the aircraft

### 5.3 Αξιολόγηση Μοντελοποιημένης Επιφάνειας

Παρατηρώντας τη μοντελοποιημένη επιφάνεια διαπιστώνεται ότι αναπαριστά, με σημαντική λεπτομέρεια, πληροφορία στην επιφάνεια του αεροσκάφους (θέση των πηδαλίων κλίσης στις πτέρυγες, εξαερισμός του αεροσκάφους κ.α). Στις εικόνες 5.8, 5.9, 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται παραδείγματα σύγκρισης της μοντελοποιημένης επιφάνειας με την πραγματική.



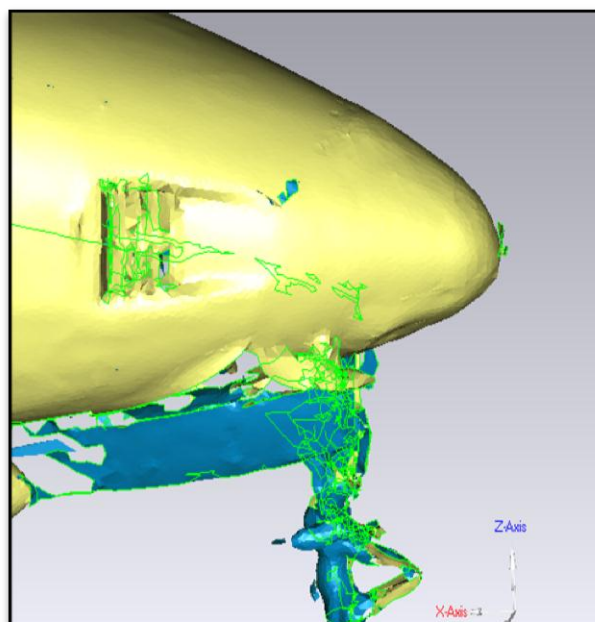
**Εικόνα 5.8:** Πηδάλιο ελέγχου κλίσης του αεροσκάφους  
**Figure 5.8:** Roll control of aircraft



**Εικόνα 5.9:** Πηδάλιο ελέγχου κλίσης στη μοντελοποιημένη επιφάνεια  
**Figure 5.9:** Roll control in the modeled surface

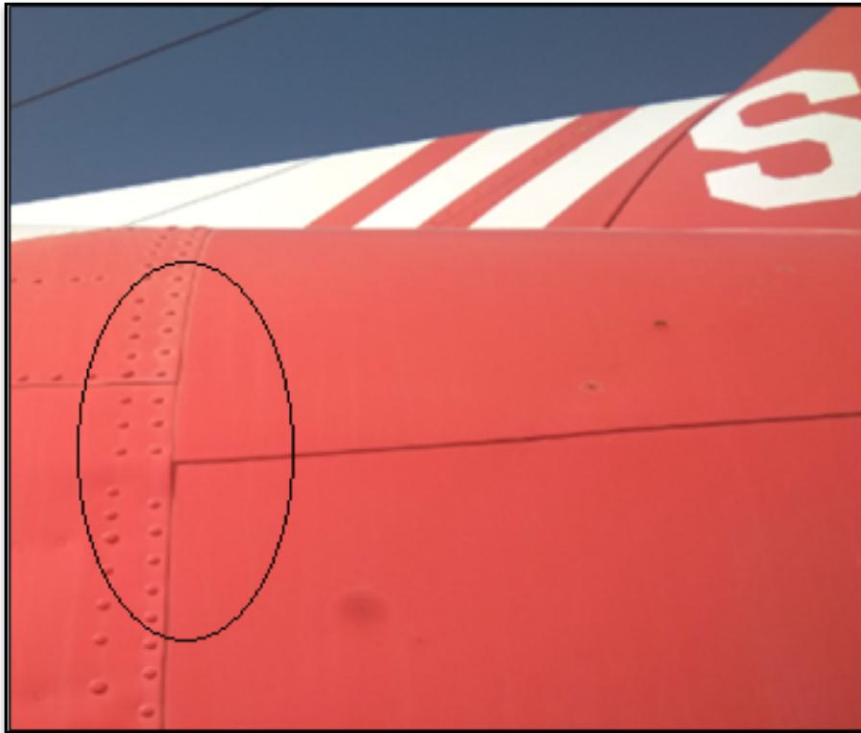


**Εικόνα 5.11:** Εξαερισμός Αεροσκάφους  
**Figure 5.10:** Aircraft ventilation



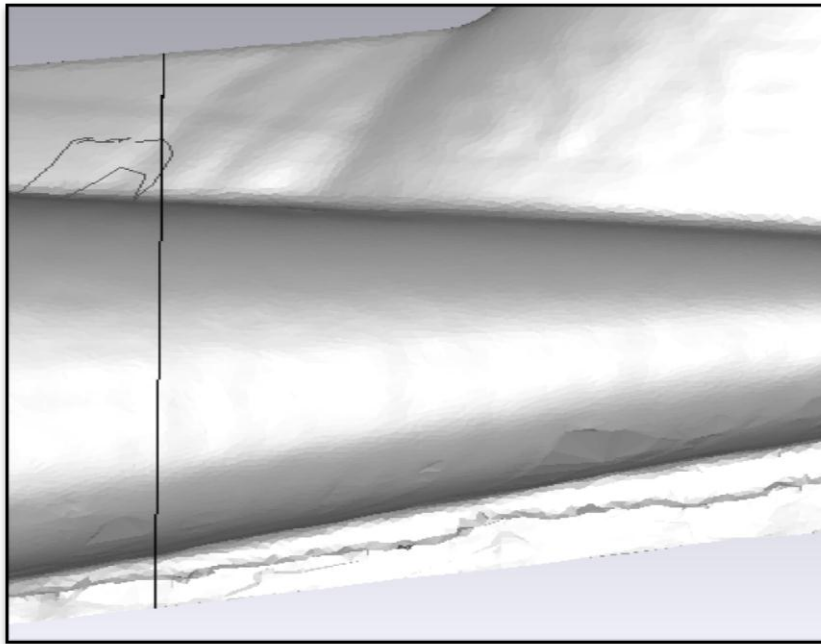
**Εικόνα 5.10:** Εξαερισμός στη μοντελοποιημένη επιφάνεια  
**Figure 5.11:** Aircraft ventilation in the modeled surface

Ωστόσο, μικρότερες παραμορφώσεις της επιφάνειας της ατράκτου, λόγω της εφαρμογής των αλγόριθμων μείωσης τραχύτητας, έχουν αναγνωρισθεί ως θόρυβος και έχουν απαλειφθεί. Στην εικόνα 5.12 φαίνεται μικρή σε μέγεθος και έκταση παραμόρφωση (εξόγκωμα) στην άτρακτο του αεροσκάφους. Επίσης, στην ίδια εικόνα, παρουσιάζονται τα μεταλλικά φύλλα επικάλυψης του σώματος της ατράκτου και οι ήλοι (καρφιά) σύνδεσης τους.



**Εικόνα 5.12:** Παραμόρφωση (εξόγκωμα) στη θέση 389.75in της ατράκτου  
**Figure 5.12:** Deformation on the fuselage at the position 389.75in

Στην εικόνα 5.13 παρουσιάζεται η μοντελοποιημένη επιφάνεια στην περιοχή που εμφανίζεται στην εικόνα 5.12. Η γραμμή, στην εικόνα 5.13, υποδεικνύει τη θέση 389.750 in., σύμφωνα με το διάγραμμα σταθμών του αεροσκάφους (εικόνα 2.7), όπου εντοπίζεται η παραμόρφωση. Όπως παρατηρείται, τόσο τα φύλλα επικάλυψης, όσο και οι ήλοι σύνδεσης τους, δεν εμφανίζονται, αντίθετα, η επιφάνεια του αεροσκάφους παρουσιάζεται ως πλήρως ομαλή. Επομένως η μοντελοποιημένη επιφάνεια δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό μικρού μεγέθους παραμορφώσεων.



**Εικόνα 5.13:** Αποτέλεσμα μοντελοποιημένης επιφάνειας στη θέση 389.75in  
**Figure 5.13:** Result of the modeled surface at the position 389.75in

### 5.3.1 Εκτίμηση του μεγέθους της ελάχιστης ανιχνεύσιμης παραμόρφωσης

Στη παράγραφο αυτή εκτιμάται το ελάχιστο μέγεθος παραμόρφωσης, που είναι δυνατόν να ανιχνευθεί στην επιφάνεια της ατράκτου του αεροσκάφους, για επίπεδο εμπιστοσύνης 99 %.

Η μέση αβεβαιότητα ( $\sigma_p$ ) προσδιορισμού θέσης ενός σημείου του νέφους, προκύπτει από την αβεβαιότητα ( $\sigma_{LS}$ ) προσδιορισμού της θέσης του από το σαρωτή (σύμφωνα με τον κατασκευαστή  $\sigma_{LS} = \pm 6 \text{ mm}$ ) και από τη μέση αβεβαιότητα ( $\sigma_N$ ) της θέσης των κορυφών του γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου, από τις οποίες έγινε η σάρωση ( $\sigma_N = \pm 2.0 \text{ mm}$ ). Εφαρμόζοντας το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων εκτιμάται ότι η μέση αβεβαιότητα θέσης σημείου ( $\sigma_p$ ) είναι :

$$\sigma_p = \pm \sqrt{\sigma_{LS}^2 + \sigma_N^2} \quad (5.1)$$

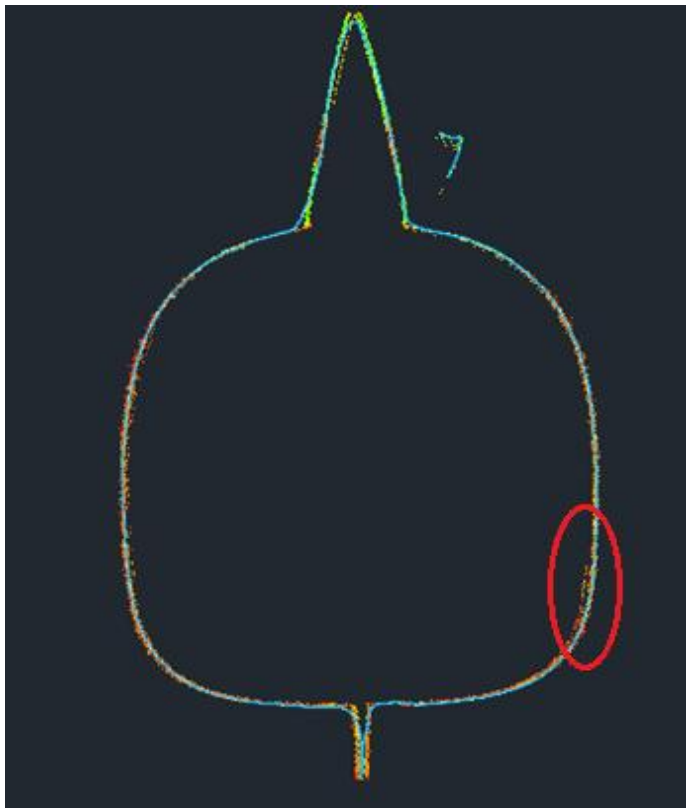
$$\sigma_p = \pm \sqrt{6^2 + 2^2} \Rightarrow \sigma_p = \pm \sqrt{36 + 4} \Rightarrow \sigma_p = \pm 6.3 \text{ mm}$$

Επομένως, για να θεωρηθεί στατιστικά σημαντική η ανιχνευόμενη παραμόρφωση για επίπεδο εμπιστοσύνης 99%, θα πρέπει το μέγεθός της (S) να είναι :

$$|S| > |\sigma_p| \times 2.576 > 17 \text{ mm} \cong 2 \text{ cm} \quad (5.2)$$

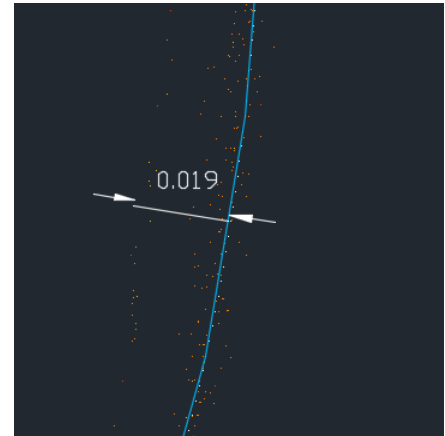
Με σκοπό την ανίχνευση πιθανών παραμορφώσεων της ατράκτου πραγματοποιήθηκαν τομές της επιφάνειάς της. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε τομή της ατράκτου κάθετη στον άξονα X στη θέση 389.750 in (εικόνα 2.7), όπου εντοπίζεται η παραμόρφωση που παρουσιάζεται στην εικόνα 5.12. Η τομή πραγματοποιήθηκε στη μοντελοποιημένη επιφάνεια, στο λογισμικό Geomagic Studio, καθώς και στο σημειοσύνολο του νέφους στο λογισμικό Cyclone. Στην εικόνα 5.14 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα από την εξαγωγή των δύο τομών στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCAD.

Με μπλε γραμμή φαίνεται η τομή της μοντελοποιημένης επιφάνειας και με αποχρώσεις του κόκκινου παρουσιάζονται τα σημεία του σημειοσυνόλου.



**Εικόνα 5.14:** Τομές ατράκτου στη θέση 389.75in στο AutoCad. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η μοντελοποιημένη επιφάνεια και με κόκκινο τα σημεία του σημειοσυνόλου

**Figure 5.14:** Cross section of the airplane in position 389.75in in AutoCAD, the modeled surface is presented with blue color while the section of the points' cloud with red.

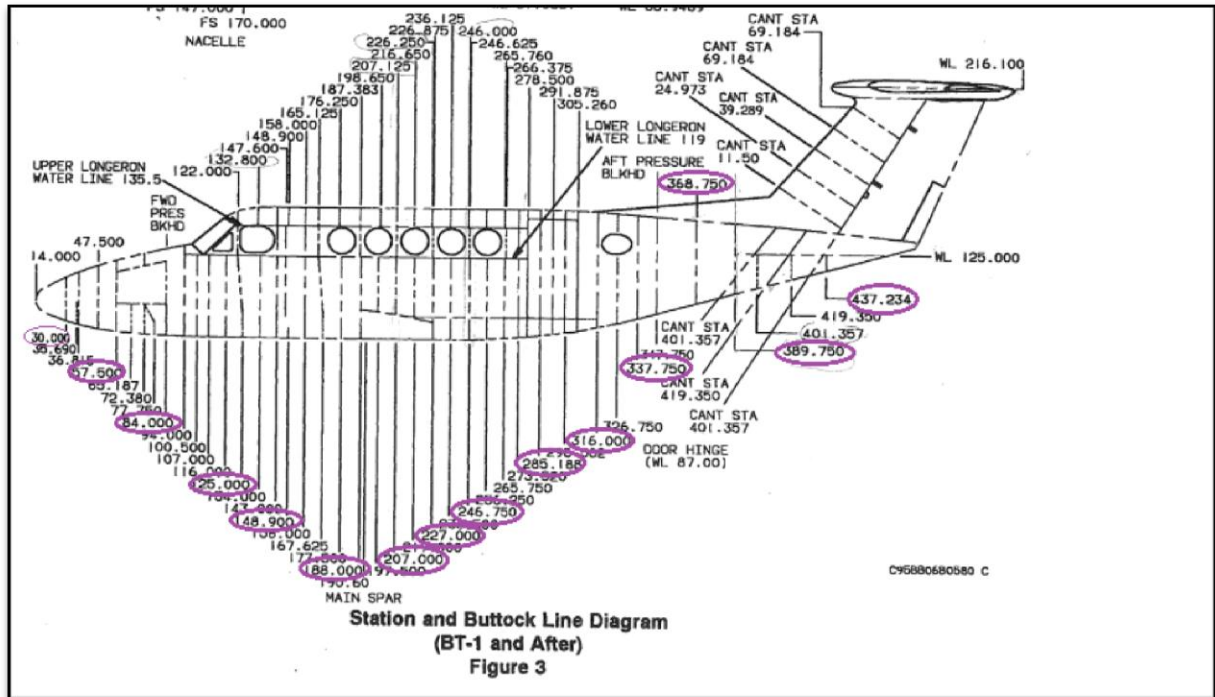


**Εικόνα 5.14<sup>α</sup> :** Μέγιστη απόκλιση μοντελοποιημένης επιφάνειας και σημειοσυνόλου

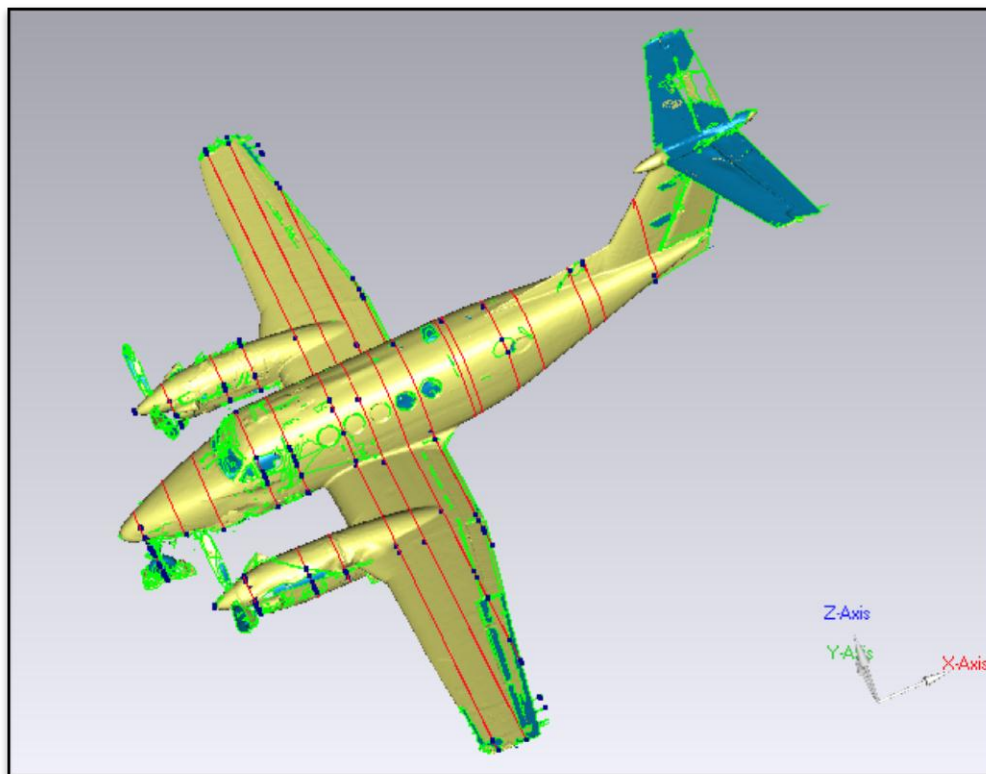
**Figure 5.14a :** Max deviation between the modeled surface and the point cloud in the cross section

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.14 η παραμόρφωση δεν γίνεται αντιληπτή. Στον κόκκινο κύκλο, στην εικόνα 5.14, έχει επισημανθεί η περιοχή όπου εντοπίζεται η μέγιστη απόκλιση των δύο τομών. Στην περιοχή αυτή, εντοπίστηκε το πιο απομακρυσμένο σημείο του σημειοσυνόλου και προσδιορίστηκε η απόστασή του από τη μοντελοποιημένη επιφάνεια (εικόνα 5.14α). Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.14α η απόσταση είναι 1.9 cm, η οποία δεν θεωρείται στατιστικά σημαντική σύμφωνα με την ανάλυση που περιγράφηκε παραπάνω.

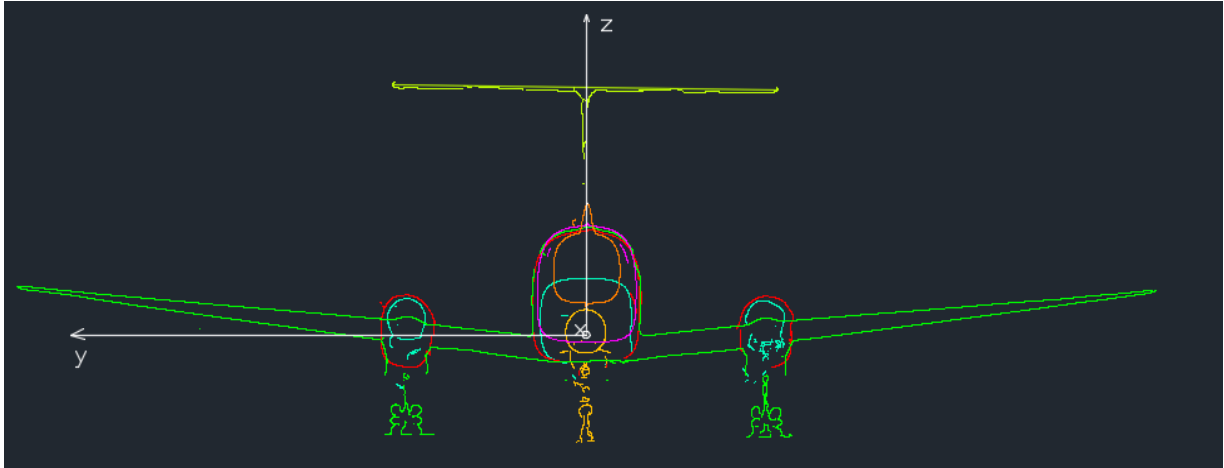
Πραγματοποιήθηκαν τομές, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, και σε άλλες θέσεις του αεροσκάφους, για να διερευνηθεί αν υπάρχουν ανιχνεύσιμες παραμορφώσεις. Οι θέσεις που έγιναν οι τομές, σύμφωνα και με το διάγραμμα σταθμών από τα κατασκευαστικά σχέδια, φαίνονται στην εικόνα 5.15. Στην εικόνα 5.16 με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι συγκεκριμένες θέσεις των τομών πάνω στη μοντελοποιημένη επιφάνεια στο λογισμικό Geomagic Studio και στην εικόνα 5.17 φαίνονται σε όψη οι τομές που πραγματοποιήθηκαν στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCAD.



Εικόνα 5.15: Θέσεις των τομών στην άτρακτο του αεροσκάφους  
 Figure 5.15: Positions of the cross sections on the aircraft's fuselage



Εικόνα 5.16: Θέσεις τομών στη μοντελοποιημένη επιφάνεια  
 Figure 5.16: Positions of the cross sections in the modeled surface



**Εικόνα 5.17:** Τομές αεροσκάφους στο AutoCAD  
**Figure 5.17:** Airplane's Cross sections (AutoCAD)

Ολοκληρώνοντας, με βάση τα αποτελέσματα των τομών που έγιναν, διαπιστώθηκε ότι δεν ανιχνεύονται παραμορφώσεις με μέγεθος μεγαλύτερο των 2cm, στην άτρακτο του αεροσκάφους. Αυτό, πιθανόν να οφείλεται στην εφαρμογή των αλγορίθμων μείωσης τραχύτητας με την οποία η επιφάνεια ομαλοποιείται.





**Κεφάλαιο 6**  
**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ –**  
**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ**



## 6.1 Γενικά

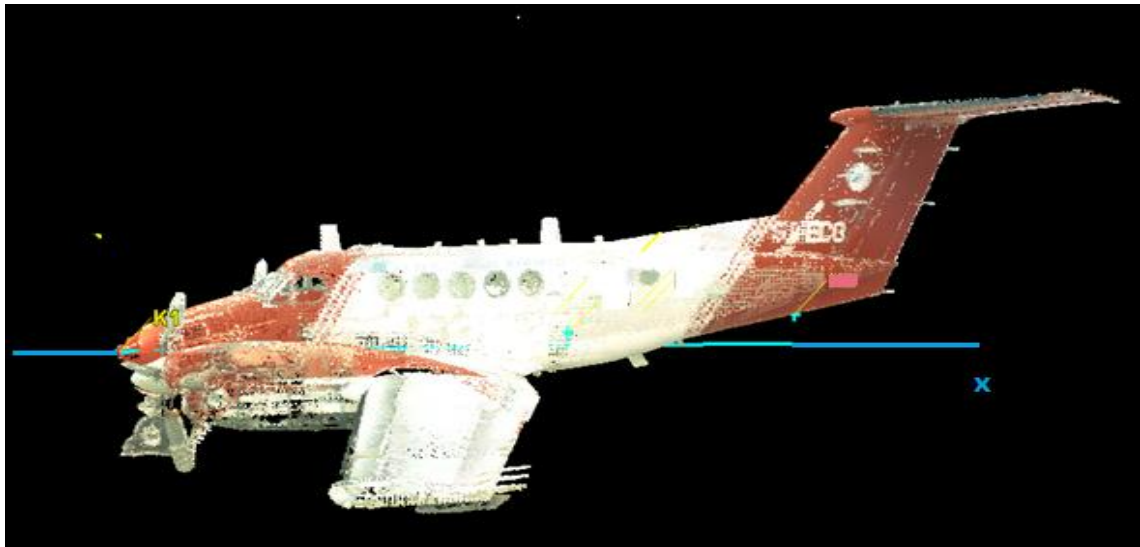
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους από το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο του. Τα γεωμετρικά στοιχεία που προσδιορίζονται είναι: το **άνοιγμα των πτερύγων**, η **αξονική απόσταση συστημάτων οπίσθιων τροχών**, το **άνοιγμα του οριζόντιου σταθεροποιητή**, η **απόσταση εμπρόσθιου τροχού από τον σύστημα των οπίσθιων τροχών** και τέλος το **μήκος του αεροσκάφους**. Τα γεωμετρικά αυτά στοιχεία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα των κατασκευαστικών σχεδίων του αεροσκάφους, με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών αποκλίσεων. Τέλος παρουσιάζεται η αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας των αποτελεσμάτων της σύγκρισης.

## 6.2 Τομές για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους με επίπεδα κάθετα στον άξονα X ή στον άξονα Y.

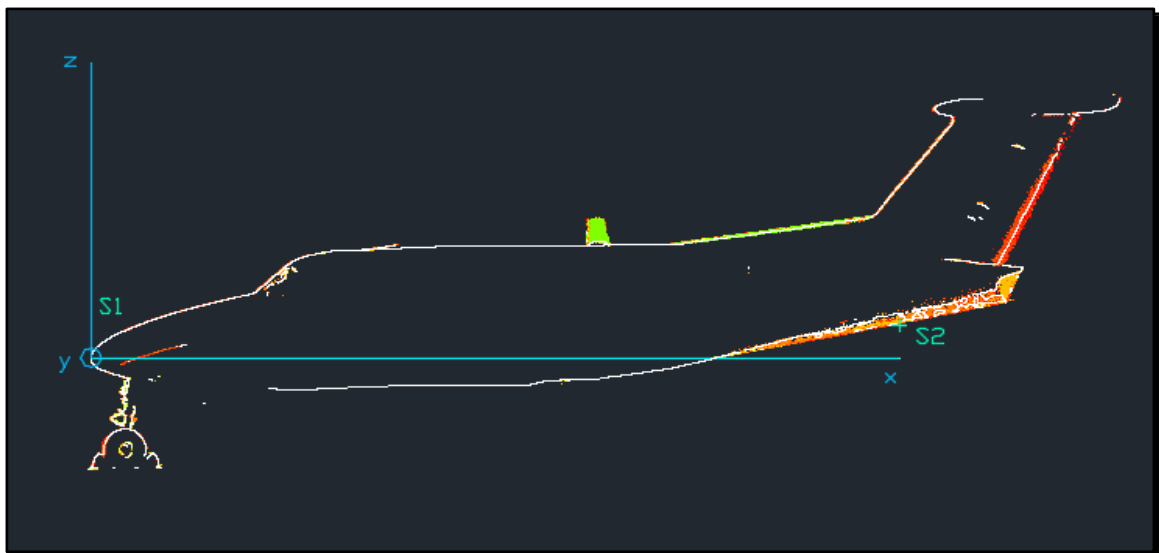
Για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους πραγματοποιήθηκαν τομές κάθετες στον άξονα X και τομές κάθετες στον άξονα Y. Τα γεωμετρικά στοιχεία που θα προσδιορισθούν, μέσω αυτών των τομών, είναι τα εξής:

1. Άνοιγμα πτερύγων
2. Αξονική απόσταση συστημάτων των οπίσθιων τροχών
3. Άνοιγμα οριζόντιου σταθεροποιητή
4. Απόσταση του εμπρόσθιου τροχού από το σύστημα των οπίσθιων τροχών
5. Μήκος αεροσκάφους

Από το διάγραμμα σταθμών (εικόνα 2.7) εντοπίστηκε η θέση κάθε τομής στο σύστημα αναφοράς. Στο διάγραμμα σταθμών, η κορυφή Σ1 του δικτύου οριζόντιου ελέγχου, που έχει υλοποιηθεί στο ρύγχος του αεροσκάφους, βρίσκεται στη θέση 14 in. Για διευκόλυνση έγινε παράλληλη μετάθεση του διαγράμματος των σταθμών κατά 14 in ώστε η αρίθμηση των σταθμών να ξεκινάει από το μηδέν. Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζεται ο άξονας X του συστήματος αναφοράς στο λογισμικό Cyclone, ενώ στην εικόνα 6.2 παρουσιάζεται τομή κατά το επίπεδο (Y=1000 m) στην οποία φαίνονται οι άξονας X και Z του (Σ.Α.)



**Εικόνα 6.1:** Άξονας X στο λογισμικό Cyclone  
**Figure 6.1:** Axis X of the reference system (Cyclone software)



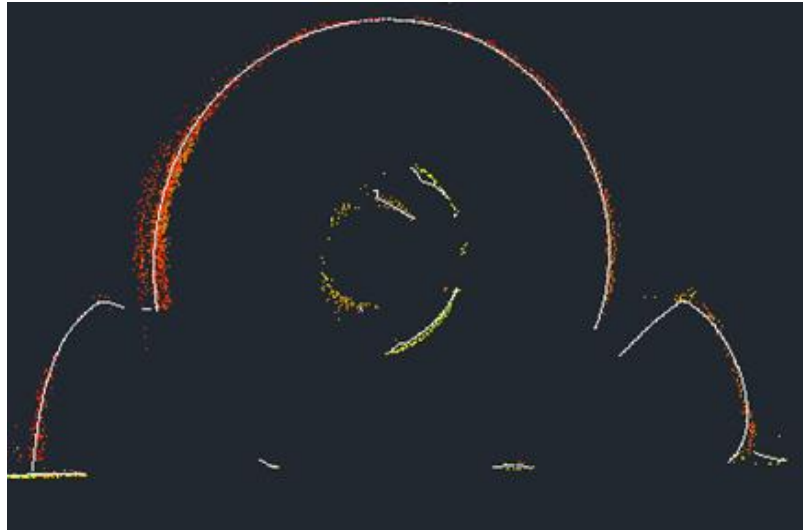
**Εικόνα 6.2:** Τομή παράλληλη στο επίπεδο X-Z του αεροσκάφους  
**Figure 6.2:** Section parallel to the plane X-Z

Οι τομές πραγματοποιήθηκαν είτε στο λογισμικό Geomagic Studio (μοντελοποιημένη επιφάνεια) είτε στο λογισμικό Cyclone (νέφος σημείων). Οι τομές στο λογισμικό Geomagic Studio έχουν μηδενικό πάχος σύμφωνα με τις προδιαγραφές του λογισμικού. Αντίθετα, οι τομές στο λογισμικό Cyclone αποτελούνται, η κάθε μια, από δυο επίπεδα με απόσταση μεταξύ τους («πάχος»), που καθορίζεται από τον χρήστη. Το «πάχος» της τομής επιλέχθηκε 5mm, λίγο μεγαλύτερο από το βήμα σάρωσης (3mm), ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα υπάρχουν αρκετά σημεία μέσα σε αυτό.

Το άνοιγμα των πτερύγων, η αξονική απόσταση των συστημάτων των οπίσθιων τροχών, το άνοιγμα του οριζόντιου σταθεροποιητή και το μήκος του αεροσκάφους προσδιορίστηκαν μέσω τομών στο λογισμικό Cyclone, γιατί στη μοντελοποιημένη επιφάνεια, στις συγκεκριμένες θέσεις, υπήρχαν κενά (εικόνες 5.4, 5.5). Η απόσταση του κέντρου του εμπρόσθιου τροχού από τον άξονα του συστήματος των οπίσθιων τροχών προσδιορίστηκαν

μέσω τομών στη μοντελοποιημένη επιφάνεια, καθώς στις θέσεις αυτές δεν υπήρχαν κενά. Τα γεωμετρικά στοιχεία προσδιορίστηκαν από τα ακραία σημεία του σημειοσυνόλου κάθε τομής.

Στην εικόνα 6.3 παρουσιάζεται η προσαρμογή της μοντελοποιημένης στο νέφος σημείων σε έναν από τους τροχούς του αεροσκάφους.



**Εικόνα 6.3:** Σύγκριση σημειοσυνόλου με τη μοντελοποιημένη επιφάνεια σε τροχό του αεροσκάφους  
**Figure 6.3:** Comparison of point cloud and modeled surface on the aircraft wheel

Στον πίνακα 6.1 με βάση και το διάγραμμα σταθμών (εικόνα 2.7) παρατίθενται, για κάθε γεωμετρικό στοιχείο του αεροσκάφους που θα προσδιορισθεί, η θέση της τομής στο σύστημα αναφοράς

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΜΗΣ
Άνοιγμα πτερύγων	X = 1004.900m
Αξονική απόσταση συστημάτων οπίσθιων τροχών	X = 1004.900m
Άνοιγμα οριζόντιου σταθεροποιητή	X = 1012.500m
Κέντρο εμπρόσθιου τροχού Κέντρο εξωτερικού οπίσθιου δεξιού τροχού Κέντρο εξωτερικού οπίσθιου αριστερού τροχού	Y = 1000.000m Y = 997.234m Y = 1002.816m
Μήκος αεροσκάφους	Y = 1000.000m

**Πίνακας 6.1:** Θέσεις και επίπεδα τομών για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους  
**Table 6.1:** Positions and planes of cross sections for the estimation of the aircraft's geometric elements

### 6.3 Προσδιορισμός Γεωμετρικών Στοιχείων Αεροσκάφους και Σύγκριση με τα Κατασκευαστικά Σχέδια

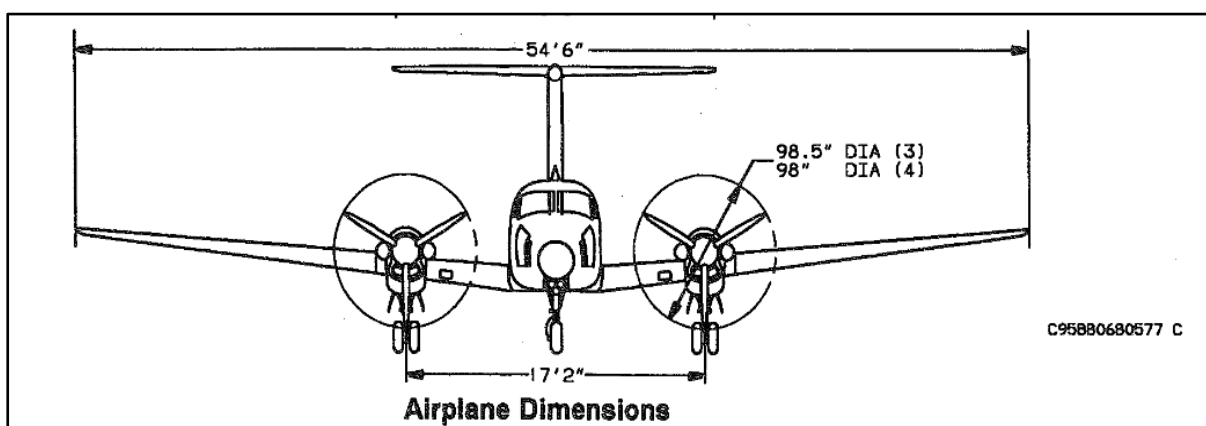
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο προσδιορισμός των γεωμετρικών στοιχείων του αεροσκάφους που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 και η σύγκρισή τους με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αεροσκάφους, όπως δίνονται από τα κατασκευαστικά σχέδια της Υ.Π.Α., με σκοπό τον προσδιορισμό πιθανών αποκλίσεων.

#### 6.3.1 Έλεγχος Ανοίγματος Πτερύγων

Στην εικόνα 6.4 φαίνεται το άνοιγμα των πτερύγων, το οποίο, σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια, είναι 54'6ft ή 16.611m (πίνακας 2.2).

Στην εικόνα 6.5 επισημαίνεται, με κόκκινο χρώμα, η θέση που πραγματοποιήθηκε η τομή (σταθμός 207), θέση που αντιστοιχεί στο μέσον της σύνδεσης των πτερύγων στη άτρακτο.

Στον πίνακα 6.1 δίνεται η ακριβής θέση και το επίπεδο της τομής στο λογισμικό Cyclone. Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή του σημειοσυνόλου της τομής σε περιβάλλον AutoCAD. Από την τομή, εντοπίστηκαν τα ακραία σημεία των πτερύγων και προσδιορίσθηκε η απόστασή τους. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 6.6.

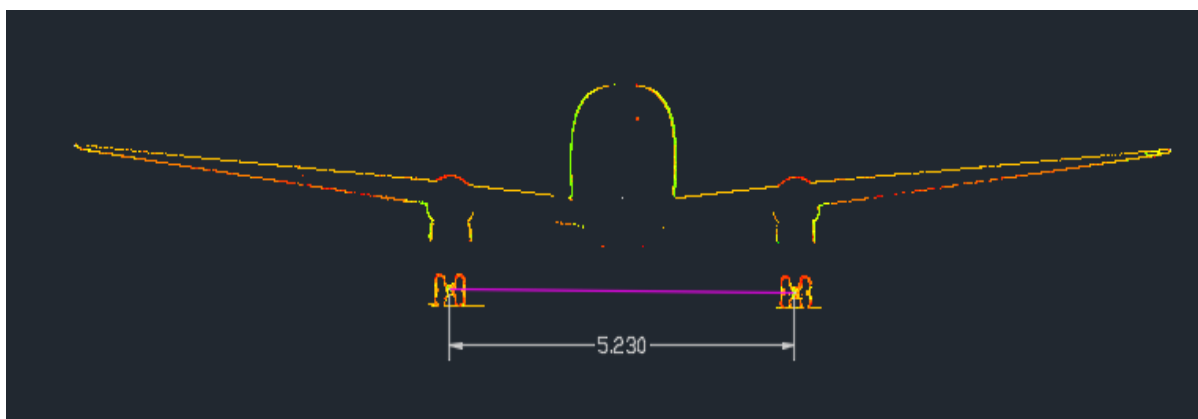


Εικόνα 6.4: Άνοιγμα Πτερύγων  
Figure 6.4: Wing length



### 6.3.2 Έλεγχος Αξονικής Απόστασης Οπίσθιων Τροχών

Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια (εικόνα 6.4) η αξονική απόσταση των οπίσθιων τροχών είναι 17'2' ft ή 5.232m (πίνακας 2.2). Η αξονική απόσταση των οπίσθιων τροχών προσδιορίστηκε από τα δεδομένα της σάρωσης, από την τομή για τον προσδιορισμό του ανοίγματος των πτερύγων (σταθμός 207in - πίνακας 6.1). Το αποτέλεσμα της τομής φαίνεται στην εικόνα 6.7



Εικόνα 6.7: Τομή στη θέση 207in για τον προσδιορισμό της αξονικής απόστασης των συστημάτων των οπίσθιων τροχών

Figure 6.7: Cross section at the position 207in for the estimation of the axial distance of the two back wheels

Η αξονική απόσταση των οπίσθιων τροχών προσδιορίστηκε **5.230m**. Η **διαφορά** από αυτή των κατασκευαστικών σχεδίων του αεροσκάφους είναι **-2 mm**.

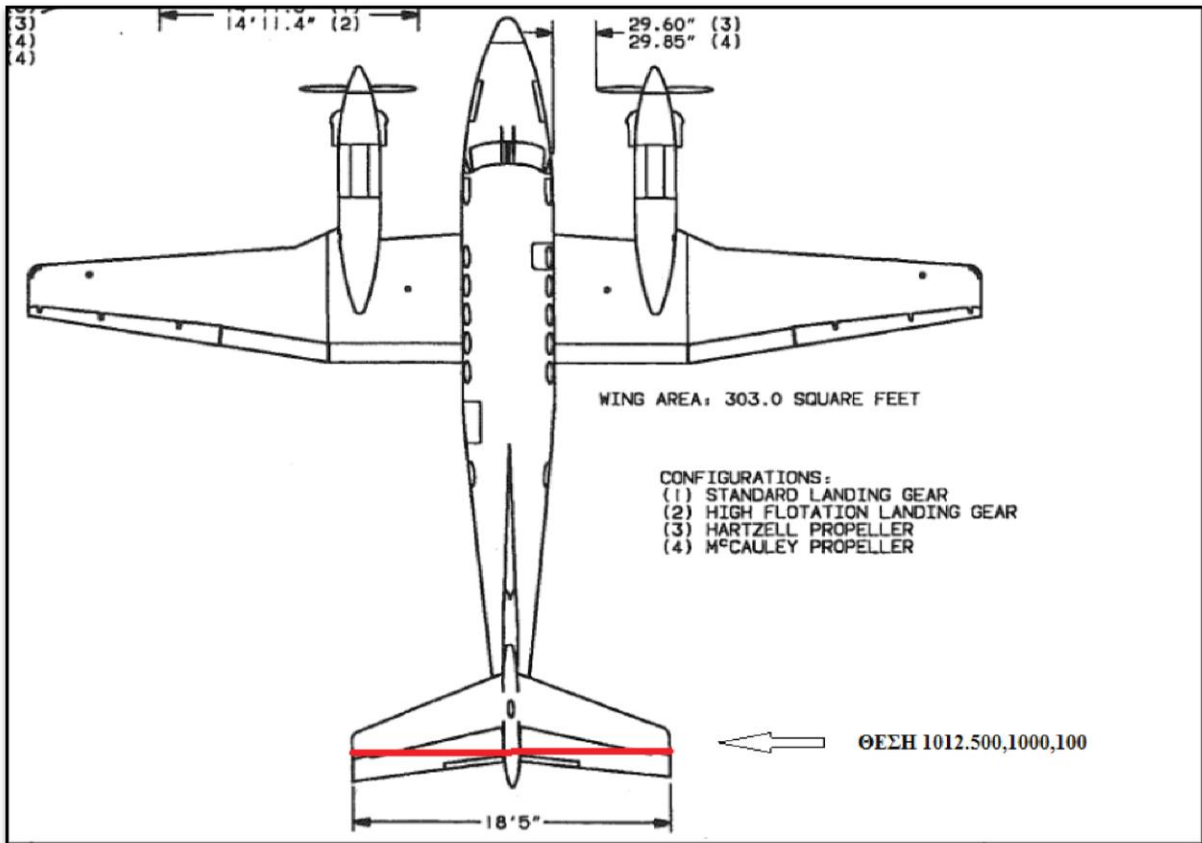
### 6.3.3 Έλεγχος Ανοίγματος Οριζόντιου Σταθεροποιητή

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.8 το άνοιγμα του οριζόντιου σταθεροποιητή είναι 18'5" ft ή 5.613m (πίνακας 2.2).

Στην ίδια εικόνα (6.8) υποδεικνύεται, με κόκκινο χρώμα, η θέση στην οποία θα πραγματοποιηθεί η τομή στον οριζόντιο σταθεροποιητή, για να προσδιορισθεί το άνοιγμά του. Η θέση του επιπέδου της τομής (πίνακας 6.1) επιλέχθηκε ώστε να τμηθεί ο οριζόντιος σταθεροποιητής στο μέσον του πλάτους των πτερυγίων του.

Το αποτέλεσμα της τομής φαίνεται στην εικόνα 6.9. Με πράσινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που συνδέει τα δύο ακραία σημεία των πτερυγίων του οριζόντιου σταθεροποιητή. Η απόστασή τους προσδιορίστηκε **5.615m**. Η **διαφορά** από αυτή των κατασκευαστικών σχεδίων του αεροσκάφους είναι **+ 2 mm**.





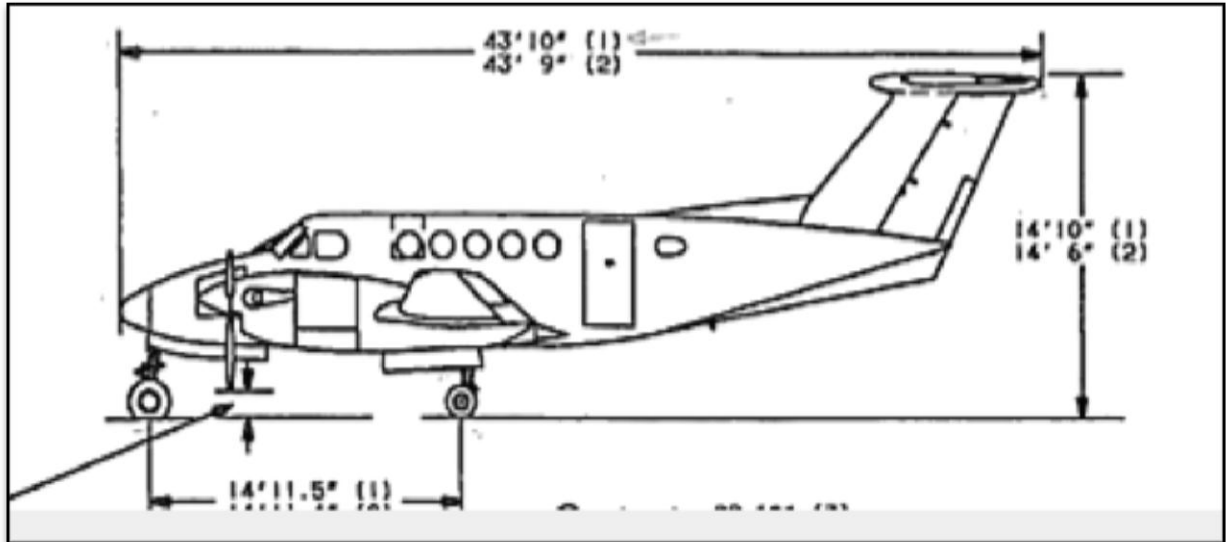
Εικόνα 6.8: Άνοιγμα οριζόντιου ουραίου πτερυγίου  
 Figure 6.8: Width of horizontal stabilizer



Εικόνα 6.9: Τομή για τον προσδιορισμό του ανοίγματος του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου  
 Figure 6.9: Cross section of the estimation of horizontal stabilizer's width

### 6.3.4 Έλεγχος απόστασης εμπρόσθιου τροχού από τον άξονα του συστήματος των οπίσθιων τροχών

Στην εικόνα 6.10 φαίνεται η απόσταση του εμπρόσθιου τροχού του συστήματος προσγείωσης του αεροσκάφους από τον άξονα του συστήματος των οπίσθιων τροχών. Η απόσταση σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια είναι 14'11,5" ft ή 4.559m (πίνακας 2.2).



**Εικόνα 6.10:** Αξονική απόσταση εμπρόσθιου –οπίσθιων τροχών  
**Figure 6.10:** Axial distance between front and back wheels

Για να προσδιορισθεί η απόσταση πραγματοποιήθηκαν τρεις τομές στη μοντελοποιημένη επιφάνεια του αεροσκάφους στο λογισμικό Geomagic. Η πρώτη έγινε κατά το επίπεδο  $Y = 1000\text{m}$ , κατά μήκος του διαμήκη άξονα του αεροσκάφους, ώστε να γίνει τομή στο μέσον του εμπρόσθιου τροχού. Η δεύτερη έγινε κατά το επίπεδο  $Y = 997.234\text{m}$ . Η θέση της δεύτερης τομής προσδιορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση του πίσω εξωτερικού δεξιού τροχού από το διαμήκη άξονα του αεροσκάφους καθώς και το ημιπλάτος των τροχών, όπως αυτά δίνονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του αεροσκάφους. Έτσι, αυτή η τομή έγινε στο μέσον του εξωτερικού οπίσθιου δεξιού τροχού. Αντίστοιχα, η τρίτη τομή έγινε κατά το επίπεδο  $Y = 1002.816\text{m}$  στο μέσον του εξωτερικού οπίσθιου αριστερού τροχού.

Έγινε εξαγωγή των σημείων των τριών τομών στο AutoCAD, έγινε προσαρμογή κύκλου στα σημεία των τομών και προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες των κέντρων των τριών κύκλων (πίνακας 6.2).

Τροχοί	(X, Y, H) (m) κέντρου προσαρμοσμένου κύκλου
Εμπρόσθιος τροχός (Ε.Τ.)	1000.436, 1000, 98.777
Οπίσθιος δεξιός τροχός (Π.Δ.Τ.)	1004.975, 997.234, 98.784
Οπίσθιος αριστερός τροχός (Π.Α.Τ.)	1004.984 ,1002.816 , 98.819

Πίνακας 6.2: Συντεταγμένες των κέντρων των προσαρμοσμένων κύκλων  
Table 6.2: Centers' Coordinates of the circles fitted to the wheels' sections

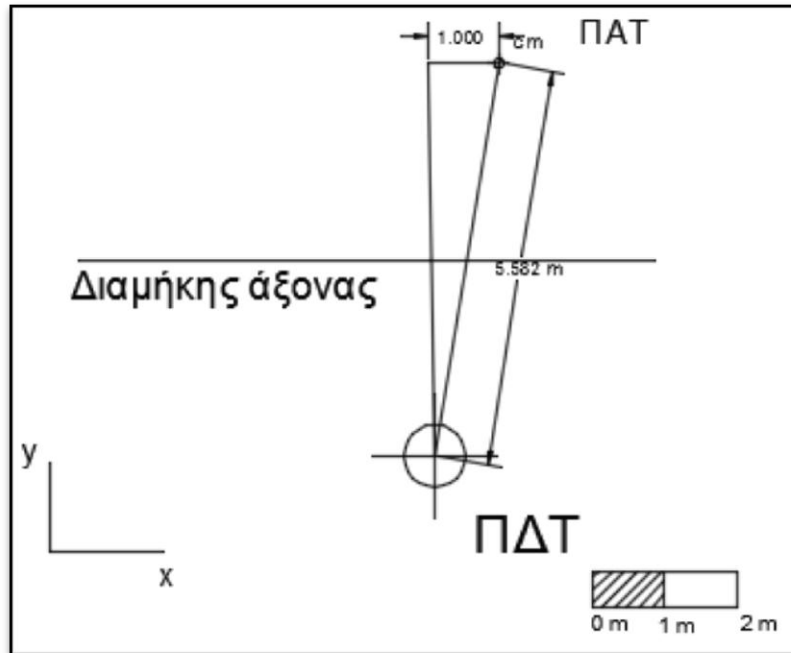
Αρχικά ελέγχθηκε η καθετότητα του άξονα του συστήματος των οπίσθιων τροχών με τον διαμήκη άξονα του αεροσκάφους, δηλαδή ελέγχθηκε αν  $a_{\text{ΠΔΤ,ΠΑΤ}} = 0\text{g}$  (θεωρητική τιμή). Η  $a_{\text{ΠΔΤ,ΠΑΤ}}$  υπολογίστηκε από τις συντεταγμένες των αντίστοιχων κέντρων (πίνακας 6.2),  $a'_{\text{ΠΔΤ,ΠΑΤ}} = 0.1026\text{g}$  (πραγματική τιμή). Επομένως, ο άξονας του συστήματος των οπίσθιων τροχών δεν είναι κάθετος στο διαμήκη άξονα η διαφορά θεωρητικής - πραγματικής γωνίας διεύθυνσης είναι  $\delta a_{\text{ΠΔΤ,ΠΑΤ}} = -0.1026\text{g}$ . Με βάση αυτή τη διαφορά υπολογίζεται η αντίστοιχη, κάθετη στον άξονα των τροχών, γραμμική μετατόπιση (σχήμα 6.1). Η μετατόπιση αυτή προσδιορίστηκε **1 cm**, δηλαδή ο οπίσθιος αριστερός τροχός (Π.Α.Τ.) βρίσκεται 1cm πιο «πίσω» από τον οπίσθιο δεξιό τροχό (Π.Δ.Τ.).

Επίσης, ελέγχθηκε αν τα κέντρα των προσαρμοσμένων, στους τροχούς, κύκλων σχηματίζουν ισοσκελές τρίγωνο (σχήμα 6.2.). Από τις συντεταγμένες των κέντρων των οπίσθιων τροχών και του εμπρόσθιου τροχού, προσδιορίστηκαν οι αποστάσεις:

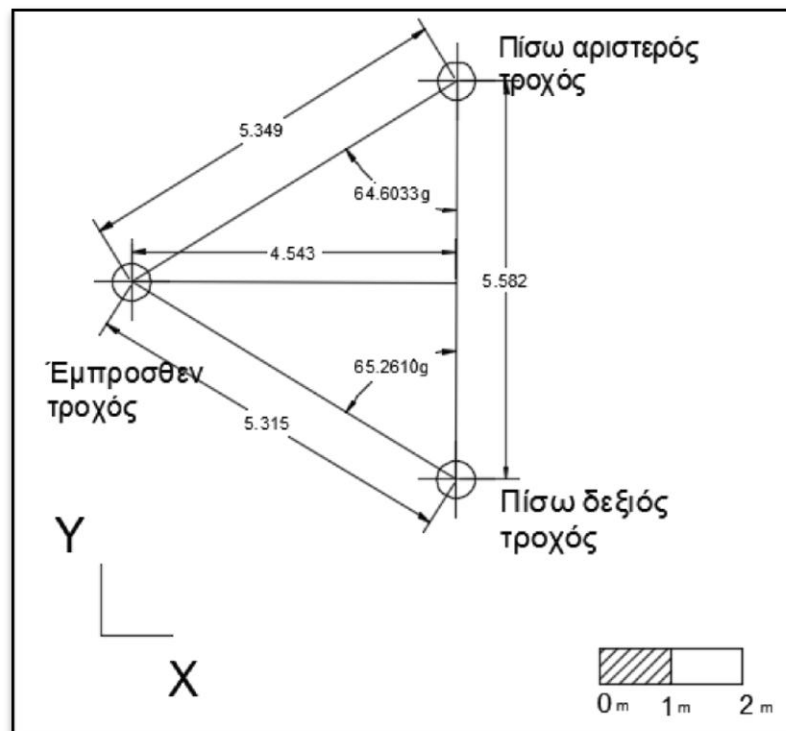
$$(Ε.Τ.) - (Π.Α.Τ.) = 5.349\text{m} \text{ και } (Ε.Τ.) - (Π.Δ.Τ.) = 5.315\text{m}.$$

Διαπιστώνεται ότι οι αποστάσεις αυτές δεν είναι ίσες, επομένως, το τρίγωνο που σχηματίζουν τα κέντρα των τροχών **δεν είναι ισοσκελές**.

Τέλος, προσδιορίστηκε η απόσταση του κέντρου του εμπρόσθιου τροχού από τον άξονα του συστήματος των οπίσθιων τροχών (σχήμα 6.2), δηλαδή το ύψος του τριγώνου από την κορυφή (Ε.Τ.). Η απόσταση αυτή προσδιορίστηκε **4.543 m** (σχήμα 6.2.) Η διαφορά της από αυτή των κατασκευαστικών σχεδίων του αεροσκάφους (4.559m) είναι **- 1.6 cm**.



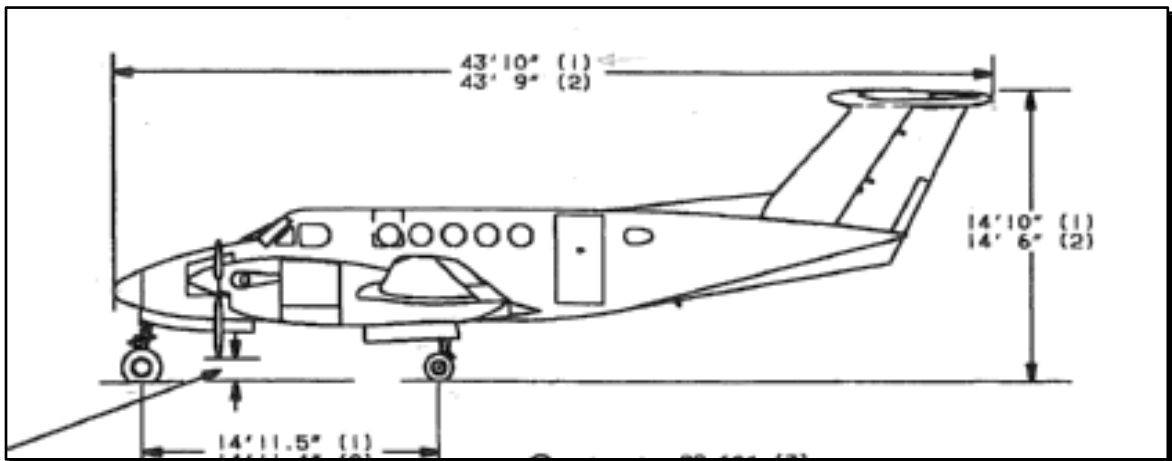
Σχήμα 6.1: Γραμμική απόκλιση οπίσθιων τροχών  
 Figure 6.1: Linear deviation of the back rear wheels



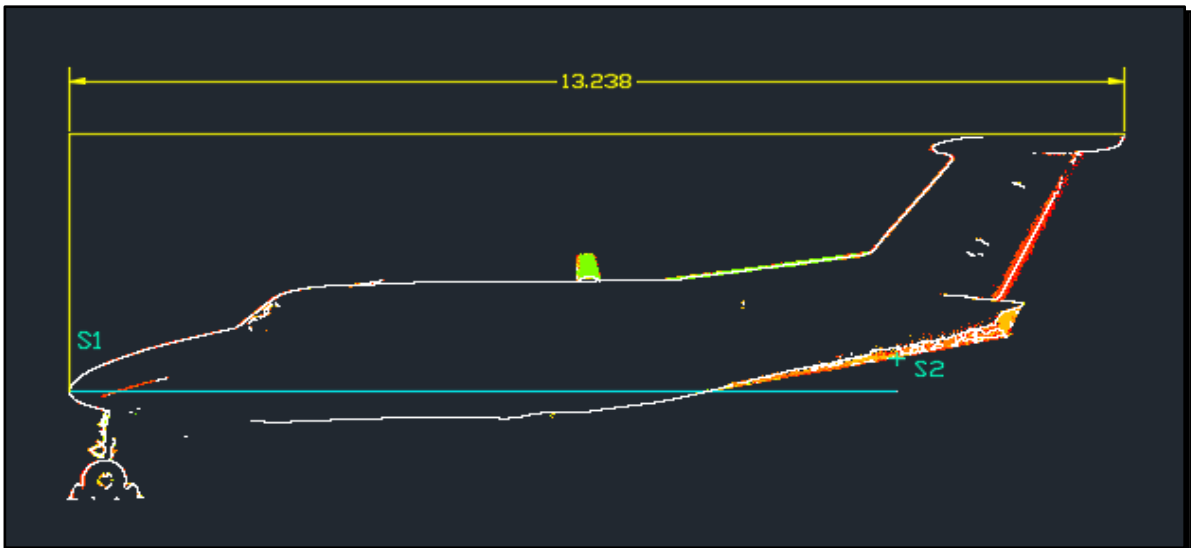
Σχήμα 6.2: Διάταξη τροχών  
 Figure 6.2: Wheels position

### 6.3.5 Έλεγχος Μήκους Αεροσκάφους

Στην εικόνα 6.11 παρουσιάζεται το συνολικό μήκος του αεροσκάφους, το οποίο, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά, είναι 43'10"ft ή 13.360m (πίνακας 2.2). Το συνολικό μήκος του αεροσκάφους ορίζεται ως η απόσταση από το ρύγχος του αεροσκάφους έως την άκρη του ουραίου περυγίου. Για τον προσδιορισμό του συγκεκριμένου μήκους πραγματοποιήθηκε τομή στο λογισμικό Cyclone κατά το επίπεδο  $Y = 1000m$ . Το αποτέλεσμα της τομής φαίνεται στην εικόνα 6.12. Το συνολικό μήκος του αεροσκάφους προσδιορίστηκε από τις συντεταγμένες του ακραίου σημείου του ουραίου περυγίου και της κορυφής  $S1$  που έχει υλοποιηθεί στο ρύγχος του αεροσκάφους. Το μήκος προσδιορίστηκε **13.238m**. Η διαφορά του, από αυτή των τεχνικών χαρακτηριστικών του αεροσκάφους, είναι **-12.2 cm**



Εικόνα 6.11: Μήκος αεροσκάφους κατά το διαμήκη  
Figure 6.11: Aircraft's longitudinal length



Εικόνα 6.12: Τομή κατά μήκος του διαμήκη άξονα κατά το επίπεδο  $Y=1000m$  για τον προσδιορισμό του μήκους του αεροσκάφους  
Figure 6.12: Cross section along the aircraft's longitudinal axis for the estimation of the aircraft's length

## 6.4 Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας αποκλίσεων

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται ο έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητας των αποκλίσεων ( $\delta D$ ) των γεωμετρικών στοιχείων που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο 6.3. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το αντικείμενο που ελέγχεται είναι βιομηχανικό παράγωγο, η πιθανή αστοχία του οποίου συνδέεται με την απώλεια ανθρώπινων ζώων και την πρόκληση μεγάλου κοινωνικού κόστους, επιλέχθηκε πιο αυστηρό κριτήριο ελέγχου (επίπεδο εμπιστοσύνης 68%) αντί του συνηθισμένου επίπεδου εμπιστοσύνης 95%.

Η αβεβαιότητα  $\sigma_{D_{\text{μετρ}}}$  των προσδιορισμένων αποστάσεων εκτιμήθηκε από την αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της θέσης σημείου σύμφωνα με τον κατασκευαστή του οργάνου ( $\pm 6\text{mm}$ ):  $\sigma_{D_{\text{μετρ}}} = \pm 6\text{mm}$

Για να θεωρηθεί η απόκλιση  $\delta D$  στατιστικά σημαντική θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$|\delta D| \geq |\sigma_{\delta D}| \cdot Z_{68\%} \quad (6.1)$$

όπου :

$$\delta D = D_{\text{μετρημένο}} - D_{\text{τεχν. χαρακτηριστικών}} \quad (6.2)$$

$$\sigma_{\delta D} = \pm \sqrt{\sigma_{D_{\text{μετρ}}}^2 + \sigma_{D_{\text{τεχν.}}}^2} \quad (6.3)$$

Θεωρώντας ότι  $\sigma_{D_{\text{τεχν.}}} = 0$  προκύπτει :

$$\sigma_{\delta D} = \pm \sqrt{\sigma_{\delta D}^2} = \pm \sqrt{6^2} = \pm 6\text{mm}$$

Όπου:  $Z_{68\%}$  εκατοστιαίο σημείο τυποποιημένης κανονικής κατανομής, ( $Z_{68\%} = 1$ )

Στον πίνακα 6.3 παρατίθεται ο έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητας των αποκλίσεων  $\delta D$  που προσδιορίστηκαν. Με έντονη γραμματοσειρά επισημαίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία, των οποίων η απόκλιση από τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι στατιστικά σημαντική για επίπεδο εμπιστοσύνης 68%. Τα στοιχεία αυτά είναι: **η απόσταση του εμπρόσθιου τροχού από τον άξονα του συστήματος των οπίσθιων τροχών και το μήκος του αεροσκάφους.**

Εξεταζόμενα Γεωμετρικά Στοιχεία	Δτεχνικών χαρακτηριστικών (m)	Δμετρημένο (m)	δD
Άνοιγμα πτερύγων	16.611	16.612	+1 mm
Αξονική απόσταση συστημάτων οπίσθιων τροχών	5.232	5.230	-2 mm
Άνοιγμα οριζόντιου σταθεροποιητή	5.613	5.615	+2 mm
Απόσταση κέντρου εμπρόσθιου τροχού από άξονα οπίσθιων τροχών	4.559	4.543	-16 mm
Μήκος αεροσκάφους	13.360	13.238	-122mm

Πίνακας 6.3: Έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας της διαφοράς δD  
Table 6.3: Test of the statistical significance of the difference δD





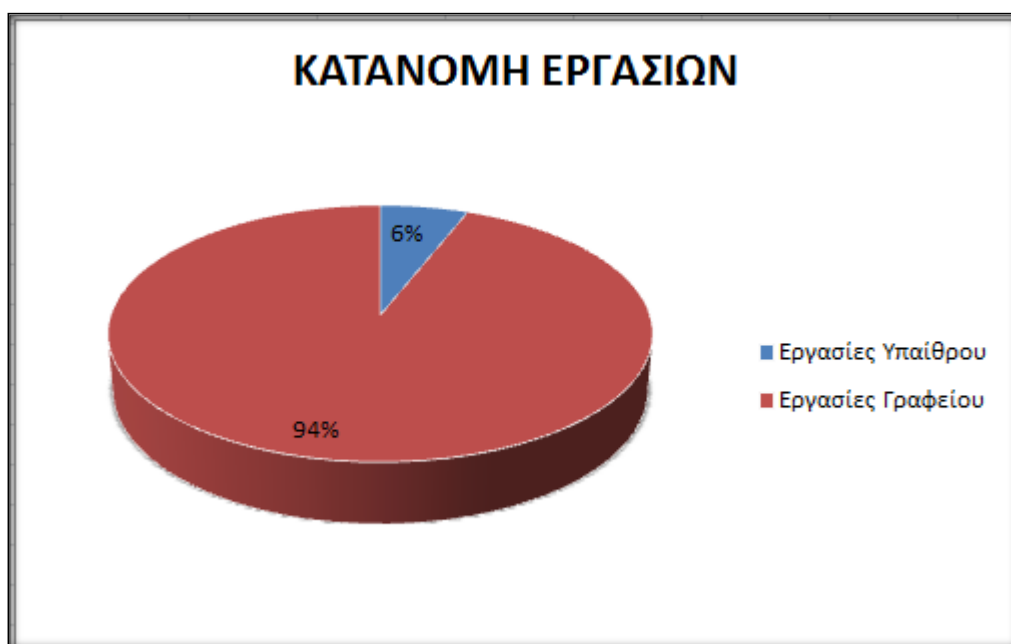
**Κεφάλαιο 7**  
**ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ**



## 7.1 Γενικά

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφεται η χρονική και ποσοστιαία κατανομή των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι εργασίες για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας, διακρίνονται σε εργασίες υπαίθρου και εργασίες γραφείου. Συγκεκριμένα οι εργασίες υπαίθρου διήρκησαν 14 μέρες με ποσοστό 6% στο συνολικό χρόνο κατανομής εργασιών και οι εργασίες γραφείου 220 μέρες με ποσοστό 94%. Ο μέσος χρόνος εργασιών ανά ημέρα εκτιμήθηκε ίσος με 8 ώρες. Στο διάγραμμα 7.1 φαίνεται η κατανομή των εργασιών.



**Διάγραμμα 7.1:** Κατανομή εργασιών Διπλωματικής εργασίας  
**Diagram 7.1:** Work distribution of this thesis

Πιο συγκεκριμένα οι εργασίες υπαίθρου περιλαμβάνουν τα εξής στάδια με τον αντίστοιχο χρόνο και ποσοστό, όπως φαίνεται παρακάτω:

- Την εξοικείωση με τον τρισδιάστατο σαρωτή , η οποία διήρκησε 6 μέρες (43%).
- Τους ελέγχους των γεωδαιτικών οργάνων πριν την πραγματοποίηση των μετρήσεων, που διήρκησαν 2 μέρες (14%).
- Την αναγνώριση της περιοχής στην οποία βρίσκεται το αεροσκάφος και την ίδρυση του δικτύου ελέγχου, διάρκειας 1 μέρας (7%).
- Τη μέτρηση των στοιχείων του δικτύου οριζοντίου ελέγχου και την πραγματοποίηση της γεωμετρικής χωροστάθμησης, διάρκειας 2 ημερών (14%).
- Τη σάρωση του αεροσκάφους , διάρκειας 3 ημερών (22%).

Οι εργασίες υπαίθρου πραγματοποιήθηκαν τις περιόδους Φεβρουαρίου και Ιουλίου του 2019. Στο διάγραμμα 7.2 φαίνεται η κατανομή των εργασιών υπαίθρου.

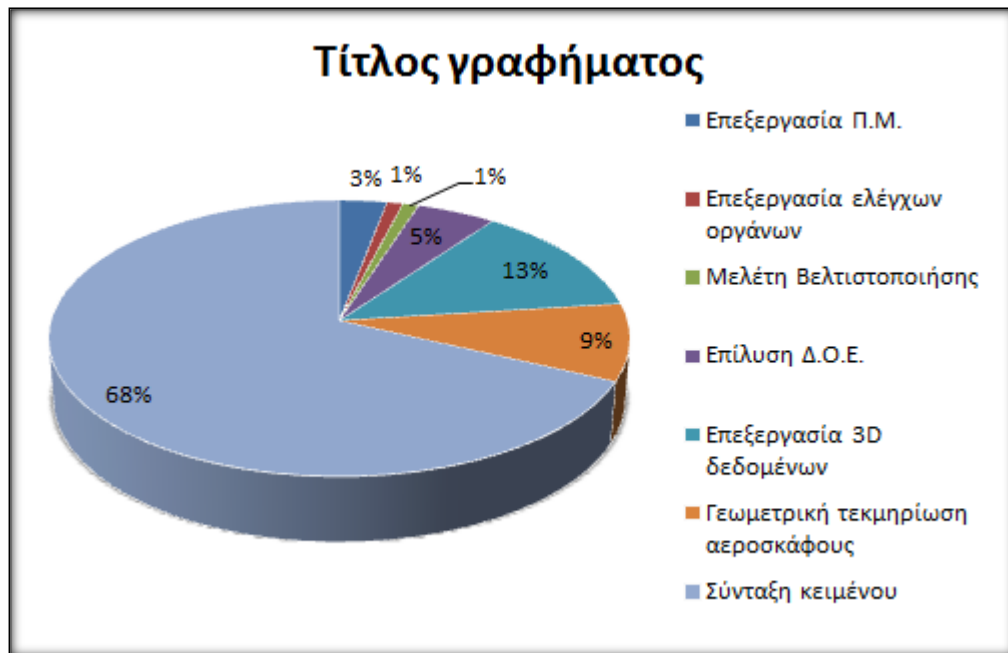


**Διάγραμμα 7.2:** κατανομή εργασιών υπαίθρου  
**Diagram 7.2:** Field work distribution

Οι εργασίες γραφείου περιλάμβαναν τα επόμενα στάδια με τον αντίστοιχο χρόνο και ποσοστό, όπως φαίνεται παρακάτω:

- Την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων (Π.Μ.) του σαρωτή που διήρκησαν 6 μέρες (3%).
- Την επεξεργασία των μετρήσεων των ελέγχων των γεωδαιτικών οργάνων, διάρκειας 2 ημερών (1%).
- Τη μελέτη βελτιστοποίησης του δικτύου οριζοντίου ελέγχου, διάρκειας 2 ημερών (1%).
- Την επεξεργασία των στοιχείων του δικτύου οριζοντίου ελέγχου και των στοιχείων της γεωμετρικής χωροστάθμησης, διάρκειας 10 ημερών (5%).
- Την επεξεργασία των τρισδιάστατων δεδομένων σάρωσης και τη δημιουργία μοντελοποιημένης επιφάνειας, διάρκειας 30 ημερών (13%).
- Τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων και τη σύγκριση με τα τεχνικά σχέδια του αεροσκάφους, διάρκειας 20 ημερών (9%).
- Τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας, η οποία διήρκησε 150 ημέρες (68%).

Στο διάγραμμα 7.3 που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή των εργασιών γραφείου.



**Διάγραμμα 7.3:** Κατανομή εργασιών γραφείου  
**Diagram 7.3:** Office work distribution



**Κεφάλαιο 8**  
**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**





## 8.1 Γενικά

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που προέκυψαν από την παρούσα Διπλωματική Εργασία.

## 8.2 Συμπεράσματα

- **Σχετικά με τη Χρήση της Γεωδαιτικής Μεθοδολογίας**  
Η γεωδαιτική μεθοδολογία, που χρησιμοποιήθηκε, περιλαμβάνει το γεωδαιτικό δίκτυο ελέγχου, τις κατάλληλες τομές σε βασικούς άξονες του τρισδιάστατου μοντέλου και επιπλέον τον έλεγχο όλων των ενδιάμεσων φάσεων, αλλά και των ανιχνεύσεων των αποκλίσεων με στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Με το δίκτυο ελέγχου, ως βασική υποδομή των σαρώσεων, επιτυγχάνεται η βέλτιστη συνένωση και γεωαναφορά των νεφών των σημείων, με συνέπεια τη δημιουργία του πλέον αξιόπιστου τρισδιάστατου μοντέλου. Με τις τομές, σε αυτό το μοντέλο, και τη στατιστική ανάλυση, κατά το στάδιο των συγκρίσεων των γεωμετρικών στοιχείων, που προκύπτουν με τα αντίστοιχα των κατασκευαστικών σχεδίων, ο μετρικός έλεγχος του αεροσκάφους δίνει ασφαλή αποτελέσματα. Έτσι γίνεται δυνατός ο έλεγχος του αξιόπλοου του αεροσκάφους.
- **Σχετικά με το Σύστημα Αναφοράς**  
Η ίδρυση ενός “σωματόδετου” συστήματος αναφοράς, δίνει τη δυνατότητα της αντιμετώπισης της πιθανής μικρής μετατόπισης ή μεγάλης μετακίνησης, σε κινητά αντικείμενα, όπως το ελεγχόμενο αεροσκάφος. Έτσι, το σύστημα αναφοράς ανεξαρτοποιείται από τον περιβάλλοντα χώρο του αντικειμένου και επικεντρώνεται αποκλειστικά στον έλεγχο της εσωτερικής ακρίβειας του με απόλυτη αξιοπιστία, σε οποιαδήποτε θέση και αν αυτό βρίσκεται.
- **Σχετικά με το Δίκτυο Οριζοντίου Ελέγχου**  
Ειδικότερα για το δίκτυο οριζοντίου ελέγχου, λαμβάνοντας ως δεδομένο την απαίτηση της υψηλής ακρίβειας στο αποτέλεσμα της σάρωσης, κρίθηκε απολύτως αναγκαία η ίδρυσή του. Συγκεκριμένα, με βάση τον ποιοτικά καλό προσδιορισμό της θέσης των κορυφών του δικτύου, επιτυγχάνεται η δημιουργία του πλέον αξιόπιστου τρισδιάστατου μοντέλου και στη συνέχεια ο βέλτιστος γεωμετρικός έλεγχος του αεροσκάφους.
- **Σχετικά με τη δημιουργία του Μοντέλου**  
Λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του αεροσκάφους, τα κενά που υπήρχαν στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο ήταν αρκετά. Η κάλυψη αυτών των κενών με τη δημιουργία της μοντελοποιημένης επιφάνειας δημιουργεί προβλήματα στην ανίχνευση και τον εντοπισμό των πιθανών παραμορφώσεων στα τμήματα του αεροσκάφους. Έτσι, αν και με βάση τη στατιστική ανάλυση φαίνεται ότι είναι δυνατή η ανίχνευση και ο εντοπισμός παραμορφώσεων μεγαλύτερων από 2cm, στην πράξη το μέγεθος των ανιχνευόμενων παραμορφώσεων εκτιμάται ότι θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο.

- **Σχετικά με την ύπαρξη αποκλίσεων στα γεωμετρικά στοιχεία του Αεροσκάφους**

Σε αντίθεση με τον έλεγχο των παραμορφώσεων, ο γεωμετρικός έλεγχος του αεροσκάφους, με τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του και των κατάλληλων τομών στους βασικούς άξονες του, αποδεικνύεται ότι είναι ο βέλτιστος δυνατός. Συγκεκριμένα, με αυτό τον τρόπο, γίνεται δυνατή η ανίχνευση και ο προσδιορισμός των πιθανών αποκλίσεων από τα κατασκευαστικά σχέδια του αεροσκάφους με μεγάλη αξιοπιστία. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο να είναι γνωστά όλα τα γεωμετρικά στοιχεία του αεροσκάφους, με ακρίβεια, για τον πλήρη έλεγχο της εκ των υστέρων γεωμετρίας του, με σκοπό τον εντοπισμό των αποκλίσεων, η ύπαρξη των οποίων είναι πιθανό να οφείλεται και στην κόπωση ή την αστοχία του υλικού ή των συνδέσεων, σε συγκεκριμένες θέσεις.

### 8.3 Προτάσεις

- Προτείνεται η χρήση “σωματόδετων” συστημάτων αναφοράς σε αντικείμενα τα οποία ενδέχεται να μετακινηθούν κατά την διάρκεια των εργασιών υπαίθρου. Με βάση τα παραπάνω συστήματα αναφοράς, αυτά τα αντικείμενα, όπως π.χ. οχήματα, σκάφη, αεροσκάφη, είναι δυνατό να μελετώνται, χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία τους. Επιπλέον, είναι δυνατή η μελέτη και ο έλεγχος τους υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης (π.χ. ακραίες).
- Προτείνεται ο έλεγχος των παραμορφώσεων, για τις περιπτώσεις κινητών αντικειμένων, να γίνεται σε τρισδιάστατα μοντέλα μεμονωμένων στοιχείων π.χ. μόνο της ατράκτου ή μόνο των πτερύγων, με όσο το δυνατό μικρότερο βήμα σάρωσης (π.χ. 2mm). Σε αυτά τα μοντέλα δεν θα πρέπει να επιδιώκεται η δημιουργία μοντελοποιημένης επιφάνειας, εκτός αν το νέφος των σημείων δεν παρουσιάζει κενά. Ωστόσο, είναι ασφαλέστερο ο έλεγχος να γίνεται στο σημειοσύνολο του μοντέλου.
- Προτείνεται ο συνδυασμός των σαρώσεων με επίγειο τρισδιάστατο σαρωτή από απόσταση, όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, και σαρωτή επαφής για τη δημιουργία νέφους σημείων χωρίς την ύπαρξη κενών. Με αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλιστεί η καλύτερη προσαρμογή της μοντελοποιημένης επιφάνειας στα δεδομένα της σάρωσης, αν κριθεί ότι ο έλεγχος θα γίνει με την χρήση της.
- Προτείνεται, για τα κινητά αντικείμενα, η δημιουργία μόνιμου πεδίου ελέγχου των παραμορφώσεων και των αποκλίσεων τους, μέσα σε στεγασμένο χώρο στάθμευσης. Στο συγκεκριμένο πεδίο ελέγχου, οι κορυφές του δικτύου ελέγχου θα πρέπει να ιδρύονται σε διαφορετικές στάθμες, έτσι ώστε οι σαρώσεις από αυτές να καλύπτουν όσο το δυνατόν καλύτερα ολόκληρη την επιφάνεια του αντικειμένου.
- Τέλος, προτείνεται ανεπιφύλακτα, η περιγραφόμενη γεωδαιτική μεθοδολογία, που περιλαμβάνει το “σωματόδετο” (ΣΑ), το δίκτυο οριζοντίου ελέγχου και τις τομές, για τον γεωμετρικό έλεγχο των αεροσκαφών. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος έλεγχος θα πρέπει να έχει περιοδικό χαρακτήρα και να υποστηρίζεται από λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια για όλους τους τύπους των αεροσκαφών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγατζά- Μπαλοδήμου Α.Μ.: *Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις I* , Σ.Α.Τ.Μ. ΕΜΠ, Αθήνα 2007
2. Αγατζά- Μπαλοδήμου Α.Μ.: *Θεωρία Σφαλμάτων και Συνορθώσεις II* , Σ.Α.Τ.Μ. ΕΜΠ Αθήνα 2009
3. Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.Μ., Αραμπατζή Ο., Μπαλοδήμος Δ., Σταθάς Δ.: *Γεωδαιτικά Δίκτυα Ελέγχου Βιομηχανικών Παραγωγών. Εφαρμογή σε Σκάφος του Π-Ν* , ΤΕΕ τεύχος 1, Αθήνα 2000
4. Γεωργόπουλος Γ., Δογγούρης Σ., Λάμπρου Ε., Μπαλοδήμος Δ., Πανταζής Γ.: *Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Σ.Α.Τ.Μ. ΕΜΠ, Αθήνα 2005*
5. *Εισαγωγή στη Γεωδαισία*, Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Σ.Α.Τ.Μ. ΕΜΠ, Αθήνα 2008
6. Βαμβακάς Ευάγγελος: *Σχεδιασμός και μελέτη αεροδυναμικής συμπεριφοράς μοντέλου υποχητηκού αεροσκάφους*, Διπλωματική Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Τμήμα Μηχανολογίας, Καβάλα 2013
7. Δήμου Μιχαήλ: *Σχεδίαση μέρους ατράκτου (FUSELAGE) Μεταγωγικού Αεροσκάφους*, Διπλωματική Εργασία, ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Αθήνα 2016
8. Αναστασιάδης Δημήτριος, Μπούντρης Δονάτος: *Μηχανική Αεροσκαφών και Εφαρμογές Αεροδυναμικής*, Διπλωματική Εργασία, ΤΕΙ ΚΑΒΑΛΑΣ, 2015
9. Καποκάκης Στυλιανός: *Γεωμετρικός έλεγχος παραμορφώσεων σχήματος και άλλες εφαρμογές με μεθόδους Βιομηχανικής Γεωδαισίας*, Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ. ΕΜΠ, 2014
10. Τζουνάκος Νικόλαος: *Γεωμετρική Τεκμηρίωση γάστρας παραδοσιακού σκάφους με τοπογραφικές μεθόδους και σύγκριση αυτών*, Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ, ΕΜΠ, Αθήνα 2015
11. Τσόντζου Αναστασία: *Έλεγχος παραμορφώσεων και μελέτη των εκλεπτύνσεων του κίονα Κ31 του ναού Νεμείου Διός με χρήση επίγειου τρισδιάστατου σαρωτή*, Διπλωματική Εργασία, Σ.Α.Τ.Μ. ΕΜΠ, 2014
12. Cyclone software manual
13. Geomagic Studio software manual

## ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

1. [www.ypa.gr](http://www.ypa.gr)
2. [www.en.wikipedia.org](http://www.en.wikipedia.org)
3. [www.rocketroute.com](http://www.rocketroute.com)
4. [www.globalair.com](http://www.globalair.com)

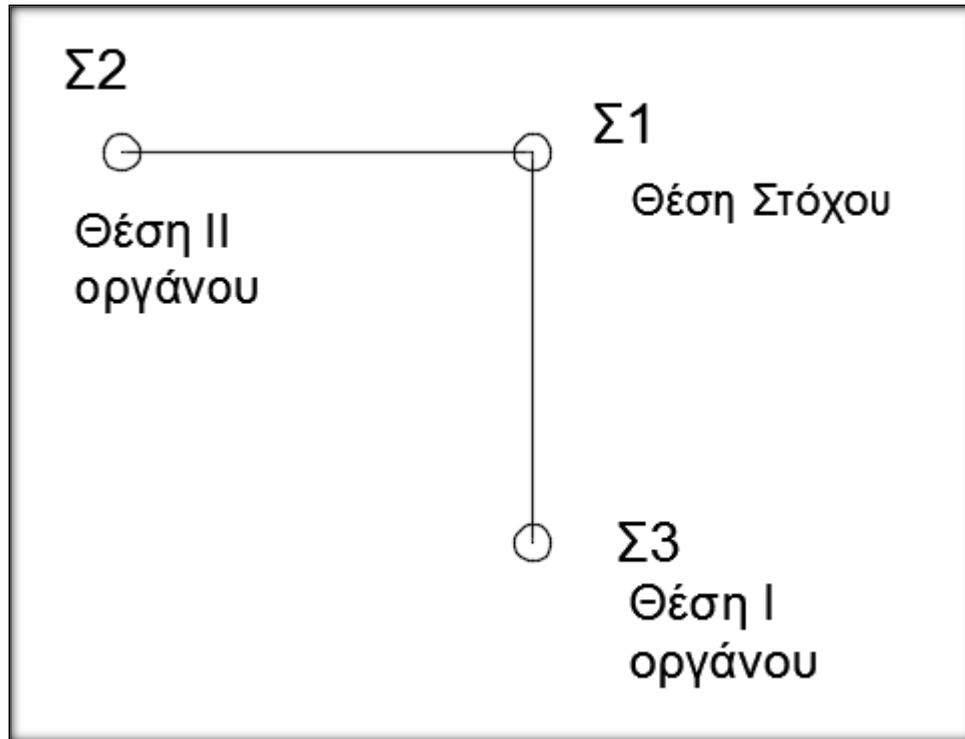


## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι**



## 1. Έλεγχος Οπτικής Κέντρωσης Τριχοχλίων

Σκοπός του συγκεκριμένου ελέγχου είναι να ελεγχθεί η ορθή λειτουργία της οπτικής κέντρωσης των τριχοχλίων, με σκοπό να εντοπιστούν σφάλματα στη κέντρωση, τα οποία θα προκαλούσαν συστηματικά σφάλματα στις μετρήσεις. Για τον έλεγχο υλοποιούνται, σε επίπεδο έδαφος, τρία σημεία Σ1, Σ2, Σ3 έτσι ώστε οι ευθείες Σ1Σ2 και Σ1Σ3 να σχηματίζουν ορθή γωνία. Ο έλεγχος της οπτικής κέντρωσης πραγματοποιείται σε δυο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Στο σχήμα Ι φαίνεται η διάταξη για την πραγματοποίηση του ελέγχου.



Σχήμα Ι: Διάταξη για πραγματοποίηση ελέγχου οπτικής κέντρωσης  
Figure I: Layout for the tribrach test

Στο σημείο Σ1 τοποθετείται τρίποδας με το τρικόχλιο που ελέγχεται και κατάφωτο, το οποίο κεντρώνεται και οριζοντιώνεται. Στο σημείο Σ2 τοποθετείται τρίποδας με το γεωδαιτικό σταθμό. Από το τηλεσκόπιο του οργάνου σκοπεύετε το σημείο στο έδαφος και πακτώνεται η οριζόντια κίνηση του οργάνου. Περιστρέφοντας το τηλεσκόπιο περί τον (ΔΔ'), πρέπει η κατακόρυφη γραμμή του σταυρονήματος να περνά από το κέντρο του πρίσματος. Στη συνέχεια το όργανο μεταφέρεται στη θέση Σ3 και επαναλαμβάνετε η ίδια διαδικασία. Στη περίπτωση που το αποτέλεσμα είναι το ίδιο, όπως και προηγούμενα, διαπιστώνεται η ορθότητα της οπτικής κέντρωσης του τριχοχλίου του στόχου. Ο έλεγχος επαναλαμβάνεται και για το δεύτερο τρικόχλιο καθώς και για το τρικόχλιο του οργάνου.

## 2. Έλεγχος Σταθεράς Οργάνου- Καταφώτων



ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟ	ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΡΟΣ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΓΩΝΙΑ (g)	ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΜΗΚΟΣ(m)	Δμετρ.(m)	Δγνωστό (m)	δD (mm)
B1	B26	100.0540	49.999	49.999	50.00263	3.6
	B15	100.0830	29.997	29.997	29.99986	2.9
	B9	100.1420	19.999	19.999	20.00099	2
	B5	100.2870	10.000	10.000	10.00309	3

**Πίνακας I.1:** Έλεγχος σταθεράς οργάνου – καταφώτου (πρίσμα 1)

**Table I.1:** Test of the total station - prism 1 constant

ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟ	ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΡΟΣ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΓΩΝΙΑ (g)	ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΜΗΚΟΣ (m)	Δμετρ.(m)	Δγνωστό (m)	δD (mm)
B1	B26	100.0620	50.000	50.000	50.00263	2.7
	B15	100.1080	29.998	29.998	29.99986	1.9
	B9	100.1860	19.999	19.999	20.00099	2
	B5	100.3820	10.002	10.002	10.00309	1.1

**Πίνακας I.2:** Έλεγχος σταθεράς οργάνου- καταφώτου (πρίσμα 2)

**Table I.2:** Test of the total station - prism 2 constant



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ**



## 1.Επεξεργασία Μετρήσεων Δικτύου

### 1.1Υπολογισμός Οριζοντίων Γωνιών

ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΓΩΝΙΕΣ							
	ΚΟΡΥΦΗ	ΠΡΟΣ	ΘΕΣΗ I	ΘΕΣΗ II	Μ.Τ	Μ.Α.Τ	Γ.Μ.Ο
1 Περίοδος	<b>Σ5</b>	Σ9	0.000	199.992	399.996	0.000	<b>0.000</b>
		Σ4	49.240	249.238	49.239	49.243	<b>49.243</b>
		Σ1	70.668	270.666	70.667	70.671	<b>70.673</b>
		Σ8	33.036	233.024	33.030	33.034	<b>33.036</b>
		Σ9	0.000	199.998	399.999	0.000	
		Σ6	103.242	303.244	103.243	103.244	<b>103.244</b>
		Σ10	106.797	306.799	106.798	106.799	<b>106.798</b>
2 Περίοδος	<b>Σ5</b>	Σ9	399.994	199.994	399.994	0.000	
		Σ4	49.238	249.236	49.237	49.243	
		Σ1	70.672	270.668	70.670	70.676	
		Σ8	33.036	233.028	33.032	33.038	
		Σ9	0.000	199.996	399.998	0.000	
		Σ6	103.244	303.242	103.243	103.245	
		Σ10	106.797	306.795	106.796	106.798	
1 Περίοδος	<b>Σ10</b>	Σ5	0.000	199.996	399.998	0.000	<b>0.000</b>
		Σ9	62.452	262.446	62.449	62.451	<b>62.457</b>
		Σ1	122.342	322.338	122.340	122.342	<b>122.343</b>
		Σ6	191.710	391.700	191.705	191.707	<b>191.712</b>
		Σ7	142.410	342.414	142.412	142.414	<b>142.419</b>
2 Περίοδος	<b>Σ10</b>	Σ5	399.996	199.99	399.993	0.000	
		Σ9	62.454	262.458	62.456	62.463	
		Σ1	122.342	322.334	122.338	122.345	
		Σ6	191.714	391.706	191.71	191.717	
		Σ7	142.412	342.422	142.417	142.424	
1 Περίοδος	<b>Σ6</b>	Σ10	0.000	200.004	0.002	0.000	<b>0.000</b>
		Σ1	74.062	274.058	74.060	74.058	<b>74.054</b>
		Σ3	89.294	289.296	89.295	89.293	<b>89.289</b>
		Σ9	53.884	253.88	53.882	53.88	<b>53.876</b>
		Σ10	0.000	199.998	399.999	0.000	
		Σ7	132.249	332.250	132.249	132.250	<b>132.250</b>
2 Περίοδος	<b>Σ6</b>	Σ10	0.010	200.006	0.008	0.000	
		Σ1	74.058	274.058	74.058	74.050	
		Σ3	89.294	289.294	89.294	89.286	
		Σ9	53.880	253.88	53.880	53.872	
		Σ10	399.998	199.998	399.998	0.000	
		Σ7	132.248	332.250	132.249	132.251	
1	<b>Σ7</b>	Σ6	0.000	200.008	0.004	0.000	<b>0.000</b>
		Σ3	58.492	258.486	58.489	58.485	<b>58.484</b>

Περίοδος		Σ2	78.158	278.154	78.156	78.152	<b>78.150</b>
		Σ8	117.954	317.952	117.953	117.949	<b>117.947</b>
		Σ9	75.550	275.552	75.551	75.547	<b>75.545</b>
2 Περίοδος	<b>Σ7</b>	Σ6	0.008	200.008	0.008	0.000	
		Σ3	58.490	258.492	58.491	58.483	
		Σ2	78.158	278.156	78.157	78.149	
		Σ8	117.954	317.952	117.953	117.945	
		Σ9	75.550	275.552	75.551	75.543	
1 Περίοδος	<b>Σ8</b>	Σ7	0.000	200.002	0.001	0.000	<b>0.000</b>
		Σ2	57.922	257.924	57.923	57.922	<b>57.921</b>
		Σ9	119.546	319.540	119.543	119.542	<b>119.542</b>
		Σ5	84.336	284.330	84.333	84.332	<b>84.331</b>
2 Περίοδος	<b>Σ8</b>	Σ7	0.002	200.002	0.002	0.000	
		Σ2	57.924	257.920	57.922	57.920	
		Σ9	119.548	319.542	119.545	119.543	
		Σ5	84.332	284.334	84.333	84.331	
1 Περίοδος	<b>Σ9</b>	Σ7	0.000	199.996	399.998	0.000	<b>0.000</b>
		Σ2	397.728	197.730	397.729	397.731	<b>397.729</b>
		Σ4	14.560	214.562	14.561	14.563	<b>14.561</b>
		Σ8	361.954	161.95	361.952	361.954	<b>361.951</b>
		Σ5	93.690	293.686	93.688	93.690	<b>93.689</b>
2 Περίοδος	<b>Σ9</b>	Σ7	0.004	200.002	0.003	0.000	
		Σ2	397.728	197.732	397.73	397.727	
		Σ4	14.562	214.564	14.563	14.560	
		Σ8	361.952	161.950	361.951	361.948	
		Σ5	93.690	293.692	93.691	93.688	

### 1.2 Υπολογισμός Κατακόρυφων Γωνιών

	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΓΩΝΙΕΣ							
	ΚΟΡΥΦΗ	Υ.Ο	ΠΡΟΣ	Υ.Σ	ΘΕΣΗ Ι	ΘΕΣΗ ΙΙ	Μ.Τ.	Γ.Μ.Ο
<b>1</b> Περίοδος	<b>Σ5</b>	1.538	Σ9	1.440	99.282	300.668	99.307	<b>99.307</b>
			Σ10	1.450	100.694	299.252	100.721	<b>100.662</b>
			Σ4	0.000	98.666	301.284	98.691	<b>98.690</b>
			Σ1	0.000	100.038	299.914	100.062	<b>100.062</b>
			Σ6	1.463	100.502	299.444	100.529	<b>100.531</b>
			Σ8	1.461	99.300	300.648	99.326	<b>99.325</b>
<b>2</b> Περίοδος	<b>Σ5</b>	1.538	Σ9	1.440	99.282	300.666	99.308	
			Σ10	1.450	100.578	299.37	100.604	
			Σ4	0.000	98.664	301.284	98.690	
			Σ1	0.000	100.036	299.912	100.062	
			Σ6	1.463	100.508	299.442	100.533	
			Σ8	1.461	99.300	300.650	99.325	
<b>1</b> Περίοδος	<b>Σ10</b>	1.510	Σ5	1.490	99.946	300.002	99.972	<b>99.973</b>
			Σ9	1.485	99.124	300.826	99.149	<b>99.148</b>
			Σ1	0.000	99.728	300.226	99.751	<b>99.748</b>
			Σ6	1.500	100.456	299.488	100.484	<b>100.485</b>
			Σ7	1.480	99.534	300.42	99.557	<b>99.556</b>
<b>2</b> Περίοδος	<b>Σ10</b>	1.510	Σ5	1.490	99.950	300.002	99.974	
			Σ9	1.485	99.124	300.828	99.148	
			Σ1	0.000	99.722	300.230	99.746	
			Σ6	1.500	100.46	299.486	100.487	
			Σ7	1.480	99.532	300.42	99.556	
<b>1</b> Περίοδος	<b>Σ6</b>	1.524	Σ10	1.465	100.06	299.88	100.09	<b>100.089</b>
			Σ1	0.000	99.45	300.504	99.473	<b>99.474</b>
			Σ3	0.000	98.188	301.762	98.213	<b>98.213</b>
			Σ7	1.480	99.300	300.642	99.329	<b>99.326</b>
			Σ9	1.469	99.224	300.72	99.252	<b>99.251</b>
<b>2</b> Περίοδος	<b>Σ6</b>	1.524	Σ10	1.465	100.062	299.886	100.088	
			Σ1	0.000	99.450	300.500	99.475	
			Σ3	0.000	98.188	301.76	98.214	
			Σ7	1.480	99.298	300.65	99.324	
			Σ9	1.469	99.222	300.722	99.250	
<b>1</b> Περίοδος	<b>Σ7</b>	1.542	Σ6	1.460	101.086	298.866	101.110	<b>101.110</b>
			Σ3	0.000	99.118	300.83	99.144	<b>99.144</b>
			Σ2	0.000	98.554	301.398	98.578	<b>98.574</b>
			Σ8	1.495	99.234	300.710	99.262	<b>99.263</b>
			Σ9	1.469	99.864	300.088	99.888	<b>99.887</b>
<b>2</b> Περίοδος	<b>Σ7</b>	1.542	Σ6	1.460	101.088	298.866	101.111	
			Σ3	0.000	99.120	300.83	99.145	
			Σ2	0.000	98.548	301.406	98.571	

			Σ8	1.495	99.236	300.708	99.264	
			Σ9	1.469	99.862	300.09	99.886	
<b>1</b> Περίοδος	<b>Σ8</b>	1.533	Σ7	1.480	101.144	298.808	101.168	<b>101.169</b>
			Σ2	0.000	99.596	300.356	99.620	<b>99.620</b>
			Σ9	1.430	100.742	299.202	100.770	<b>100.769</b>
			Σ5	1.490	100.886	299.058	100.914	<b>100.915</b>
<b>2</b> Περίοδος	<b>Σ8</b>	1.533	Σ7	1.480	101.146	298.804	101.171	
			Σ2	0.000	99.594	300.354	99.620	
			Σ9	1.430	100.742	299.204	100.769	
			Σ5	1.490	100.888	299.054	100.917	
<b>1</b> Περίοδος	<b>Σ9</b>	1.512	Σ7	1.480	100.356	299.59	100.383	<b>100.383</b>
			Σ2	0.000	99.146	300.798	99.174	<b>99.175</b>
			Σ4	0.000	99.392	300.552	99.420	<b>99.420</b>
			Σ8	1.475	99.714	300.228	99.743	<b>99.741</b>
			Σ5	1.442	101.056	298.888	101.084	<b>101.08</b>
<b>2</b> Περίοδος	<b>Σ9</b>	1.512	Σ7	1.480	100.354	299.586	100.384	
			Σ2	0.000	99.150	300.796	99.177	
			Σ4	0.000	99.394	300.552	99.421	
			Σ8	1.475	99.712	300.232	99.740	
			Σ5	1.442	101.058	298.890	101.084	

## 2. Γεωμετρική Χωροστάθμηση -Υπολογισμός Υψομέτρων

α/α	Αναγνώσεις στη Σταδία		Μερικές ΔΗ (m)		Προσωρινή ΔΗ (m)	Διόρθωση	Οριστική ΔΗ	Η (m)
	Ο (m)	Ε (m)	+	-				
<b>ALLER</b>								
<b>Σ5</b>	1.5483							<b>98.477</b>
<b>Σ9</b>	1.4692	1.2537	0.2946		0.2941	-0.0002	0.2939	<b>98.771</b>
<b>Σ8</b>	1.2236	1.3615	0.1077		0.1078	-0.0002	0.1076	<b>98.878</b>
<b>Σ7</b>	1.1926	1.4554		-0.2318	-0.2319	-0.0002	-0.2321	<b>98.647</b>
<b>Σ6</b>	1.3925	1.4345		-0.2419	-0.2420	-0.0002	-0.2422	<b>98.404</b>
<b>Σ10</b>	1.3918	1.3445	0.048		0.0480	-0.0002	0.0478	<b>98.452</b>
<b>Σ5</b>		1.3667	0.0251		0.0250	-0.0002	0.0248	<b>98.477</b>
<b>RETOUR</b>								
<b>Σ5</b>	1.3745							
<b>Σ10</b>	1.3702	1.3995		-0.025				
<b>Σ6</b>	1.4486	1.4183		-0.0481				
<b>Σ7</b>	1.4486	1.2065	0.2421					
<b>Σ8</b>	1.3869	1.2167	0.2319					
<b>Σ9</b>	1.2777	1.4947		-0.1078				
<b>Σ5</b>		1.5713		-0.2936				

## 3. Τριγωνομετρική Υψομετρία - Υπολογισμός Υψομέτρων

ΑΠΌ	Υ.Ο(m)	ΠΡΟΣ	Υ.Σ (m)	Z (grad)	S (m)	ΔΗ (m)	Η (m)	ΚΟΡΥΦΗ	Τελικό Η (m)
<b>Σ7</b>	1.542	Σ2	0	98.574	12.460	1.821	100.467	<b>Σ2</b>	<b>100.467</b>
<b>Σ8</b>	1.533	Σ2	0	99.620	9.238	1.588	100.466		
<b>Σ9</b>	1.512	Σ2	0	99.175	14.281	1.697	100.468		
<b>Σ6</b>	1.524	Σ3	0	98.213	14.919	1.943	100.347	<b>Σ3</b>	<b>100.347</b>
<b>Σ7</b>	1.542	Σ3	0	99.144	11.726	1.700	100.346		
<b>Σ9</b>	1.512	Σ4	0	99.420	14.207	1.641	100.412	<b>Σ4</b>	<b>100.412</b>
<b>Σ5</b>	1.538	Σ4	0	98.690	19.250	1.934	100.411		

#### 4. A posteriori Πίνακας Μεταβλητότητας - Συμμεταβλητότητας $V_{\hat{x}}$

$$V_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} (\text{mm}^2)$$

1.54	1.28	0.42	1.07	-0.34	0.04	-0.21	0.53	-0.08	1.69	-0.16	1.44	0.27	0.81	0.33	0.36	-0.48
1.28	1.57	0.48	1.00	-0.33	-0.07	-0.47	0.64	-0.15	1.81	0.02	1.27	0.40	0.49	0.30	0.38	-0.62
0.42	0.48	1.04	0.29	-0.01	-0.52	-0.62	0.44	-0.24	1.08	0.39	0.28	0.53	-0.45	0.32	0.04	-0.56
1.07	1.00	0.29	1.27	-0.26	0.27	-0.09	0.48	0.04	1.21	-0.09	1.11	0.11	0.85	0.15	0.42	-0.33
-0.34	-0.33	-0.01	-0.26	1.61	-0.26	0.31	-0.14	-0.12	-0.29	0.05	-0.24	0.10	-0.42	0.47	-0.22	0.06
0.04	-0.07	-0.52	0.27	-0.26	2.12	1.18	0.07	1.19	-1.40	-0.34	0.00	-1.18	1.87	-1.02	0.93	0.79
-0.21	-0.47	-0.62	-0.09	0.31	1.18	2.12	-0.72	0.81	-1.59	-0.76	0.22	-1.06	1.54	0.02	0.03	1.12
0.53	0.64	0.44	0.48	-0.14	0.07	-0.72	0.84	-0.16	1.03	0.43	0.30	0.38	-0.09	-0.04	0.53	-0.68
-0.08	-0.15	-0.24	0.04	-0.12	1.19	0.81	-0.16	0.92	-1.03	-0.16	-0.12	-0.76	1.08	-0.57	0.44	0.57
1.69	1.81	1.08	1.21	-0.29	-1.40	-1.59	1.03	-1.03	3.50	0.47	1.59	1.41	-0.68	0.98	0.05	-1.46
-0.16	0.02	0.39	-0.09	0.05	-0.34	-0.76	0.43	-0.16	0.47	0.74	-0.49	0.49	-0.81	-0.02	0.13	-0.48
1.44	1.27	0.28	1.11	-0.24	0.00	0.22	0.30	-0.12	1.59	-0.49	1.83	0.13	1.09	0.58	0.18	-0.29
0.27	0.40	0.53	0.11	0.10	-1.18	-1.06	0.38	-0.76	1.41	0.49	0.13	1.19	-1.17	0.58	-0.27	-0.78
0.81	0.49	-0.45	0.85	-0.42	1.87	1.54	-0.09	1.08	-0.68	-0.81	1.09	-1.17	2.74	-0.52	0.75	0.76
0.33	0.30	0.32	0.15	0.47	-1.02	0.02	-0.04	-0.57	0.98	-0.02	0.58	0.58	-0.52	1.08	-0.47	-0.35
0.36	0.38	0.04	0.42	-0.22	0.93	0.03	0.53	0.44	0.05	0.13	0.18	-0.27	0.75	-0.47	0.73	-0.11
-0.48	-0.62	-0.56	-0.33	0.06	0.79	1.12	-0.68	0.57	-1.46	-0.48	-0.29	-0.78	0.76	-0.35	-0.11	1.18





