



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Μηχανική Λογισμικού για Διαδικτυακές & Φορητές Εφαρμογές

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

Εκσυγχρονισμένο Σύστημα 4D Πρόβλεψης Τροχιάς Αεροσκα- φών με Χρήση Αποθηκών Δεδο- μένων και Μηχανικής Μάθησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεροντόπουλος Δημήτριος (ΑΜ: 00005)

Επιβλέπουσα: Γεωργία Γκαράνη, Καθηγήτρια

ΛΑΡΙΣΑ, Οκτώβριος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY

MSc Software Engineering

for Internet & Mobile Applications

Digital Systems Department

A Modernization System for 4D Aircraft Trajectory Prediction Us- ing Data Warehouse and Machine Learning

MASTER THESIS

Dimitrios Gerontopoulos (RN: 00005)

Supervisor: *Georgia Garani*

LARISSA, October 2024

Υπεύθυνη Δήλωση περί Ακαδημαϊκής Δεοντολογίας και Πνευματικών Δικαιωμάτων

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον, και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

(Υπογραφή)

Γεροντόπουλος Δημήτριος

2/10/2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πουσα	Γκαράνη Γεωργία Καθηγήτρια, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
-----------------	--

Μέλος	Ονοματεπώνυμο Μέλους 1 Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 1, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 1
-------	---

Μέλος	Ονοματεπώνυμο Μέλους 2 Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 2, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 2
-------	---

Ημερομηνία έγκρισης: 16-10-2024

Περίληψη

Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας Αποθήκης Δεδομένων Τροχιάς ΑΔΤ (Trajectory Data Warehouse - TDW) και ενός συστήματος για τον εκσυγχρονισμό των υπηρεσιών της Εναέριας Κυκλοφορίας. Η αποθήκη δεδομένων περιέχει όλες τις ζωτικές πληροφορίες ώστε να αποτελέσει την βάση ενός μοντέρνου συστήματος Trajectory Predictor για πρόβλεψη τροχιάς αεροσκάφους που θα προσφέρει ευελιξία στην αεροναυτιλία. Η ΑΔΤ θα συγκεντρώνει ιστορικά δεδομένα πτήσεων όπως αυτά καταγράφηκαν από αισθητήρες εδάφους ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast) του δικτύου OpenSKY που είναι κατανομημένοι ανά την υφήλιο. Το πρωτόκολλο ADS-B αναμεταδίδεται αυτόματα δύο φορές κάθε δευτερόλεπτο, ενθυλακώνοντας πληροφορίες που προέρχονται από τα ηλεκτρονικά (avionics) του αεροσκάφους. Οι πληροφορίες που αναμεταδίδονται είναι η γεωγραφική θέση, το υψόμετρο η ταχύτητα και η ταυτότητα του αεροσκάφους. Η υλοποίηση του Trajectory Predictor βασίζεται στην μηχανική μάθηση με την χρήση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου (Artificial Neural Network). Η μηχανική μάθηση ως μέθοδος για την πρόβλεψη της τροχιάς είναι η πιο προσοδοφόρα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Είναι ξεκάθαρο ότι η εύρεση εξισώσεων, για την ακριβής μοντελοποίηση της τροχιάς ενός αεροσκάφους δεν είναι εύκολη λόγω αστάθμητων παραγόντων. Η μηχανική μάθηση μπορεί να «μάθει» τις κινήσεις και να προβλέψει τροχιές με αλγόριθμους εξόρυξης δεδομένων.

Η χρήση της PostGIS, επέκταση της PostgreSQL (σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων) με δυνατότητα αποθήκευσης επεξεργασίας γεωχωρικών δεδομένων, θεωρείται ιδανικότερη για την ΑΔΤ. Η επέκταση αυτή υποστηρίζει την αποθήκευση γεωγραφικών αντικειμένων και εκτέλεση ερωτημάτων πάνω σε αυτά. Με την διατύπωση των θεμελιωδών κανόνων που διέπουν την τροχιά ενός αντικειμένου, θα γίνει προσπάθεια ανάλυσης τεσσάρων μοντέλων και υλοποίησης τριών εξ' αυτών για την αποθήκευση των δεδομένων. Το τελικό σύστημα θα απαρτίζεται εκτός από την ΑΔΤ και από την παραγωγή του λογισμικού απεικόνισης και επεξεργασίας των δεδομένων "AIRFLIX", το οποίο θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι του συστήματος. Η διεξαγωγή και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, θα γίνει με την χρήση του "AIRFLIX". Η σχεδίαση και ανάπτυξη του λογισμι-

κού έγινε με την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Java. Παράλληλα για την ανάπτυξη του λογισμικού έγινε χρήση του framework της Java Spring Boot. Η spring boot παρέχει όλες τις απαραίτητες τεχνολογίες για την εύκολη ανάπτυξη κώδικα και την απλοποιημένη σύνδεση σε RDBMS (Relational DataBase Management System) και NoSQL βάσεις δεδομένων. Σκοπός της ανάπτυξης του συστήματος είναι η πρόβλεψη τετραδιάστατης 4D τροχιάς των αεροσκαφών και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

Λέξεις – Κλειδά

Βάσεις δεδομένων, αποθήκες δεδομένων, μηχανική μάθηση, έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας, Java, πρόβλεψη τροχιάς

Abstract

The purpose of this Thesis is the development of a Trajectory Data Warehouse (TDW) and a system for the modernization of Air Traffic services. The data warehouse contains all the vital information necessary to form the foundation of a modern Trajectory Predictor system for aircraft trajectory prediction, offering flexibility in aviation. The TDW will aggregate historical flight data as recorded by ground-based ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast) sensors of the OpenSKY network, which are distributed globally. The ADS-B protocol automatically broadcasts twice per second, encapsulating information derived from the aircraft's avionics. The transmitted information includes the aircraft's geographic position, altitude, speed, and identity. The implementation of the Trajectory Predictor is based on machine learning using an Artificial Neural Network. Machine learning as a method for trajectory prediction is the most promising compared to other methods. It is evident that finding equations for the precise modeling of an aircraft's trajectory is not easy due to unpredictable factors. Machine learning can "learn" the movements and predict trajectories with data mining algorithms.

The use of PostGIS, an extension of PostgreSQL (a relational database management system) with the capability of storing and processing geospatial data, is considered ideal for the TDW. This extension supports the storage of geographic objects and the execution of queries on them. By formulating the fundamental rules governing the trajectory of an object, an attempt will be made to propose three models and implement two of them for data storage. The final system will consist not only of the TDW but also of the production of the "AIRFLIX" data visualization and processing software, which will be an integral part of the system. The conduct and visualization of the results will be done using "AIRFLIX." The design and development of the software were carried out using the Java programming language. Simultaneously, the development of the software involved using the Java Spring Boot framework. Spring Boot provides all the necessary technologies for easy code development and simplified connection to RDBMS (Relational Database Management System) and NoSQL databases. The purpose of the system's development is the prediction of the four-dimensional (4D) trajectories of aircraft and the extraction of conclusions.

Keywords:

Databases, data warehouses, air traffic control, machine learning, Java, trajectory prediction

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κ. Γεωργία Γκαράνη για την πολύτιμη βοήθειά της καθώς και για την τεράστια κατανόηση που επέδειξαν καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Δημήτριος Γεροντόπουλος

2 Οκτ 2024

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VII
ABSTRACT	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	XI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	2
1.2 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ – STATE OF THE ART.....	3
1.3 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ	6
2 ΕΝΑΕΡΙΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ	9
2.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....	10
2.2 ΟΙ ΠΡΩΤΟΙ ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΑΕΡΟΔΙΑΔΡΟΜΟΙ	11
2.3 ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΕΕΚ.....	12
2.4 Η 1 ^Η ΚΑΙ Η 2 ^Η ΓΕΝΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΕΚ	14
2.5 Η 3 ^Η ΓΕΝΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΕΚ.....	17
2.6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΗΣ 3 ^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ.....	18
2.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΕΚ.....	23
3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΕΙΣ	27
3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΠΤΗΣΗΣ – FLIGHT TRAJECTORY	27
3.2 ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	29
4 ΑΠΟΘΗΚΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΡΟΧΙΑΣ.....	34
4.1 ΠΟΛΥΔΙΑΣΤΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	35
4.2 ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	36
4.2.1 <i>Ιεραρχία Διαστάσεων</i>	37
4.2.2 <i>Διαστάσεις της αποθήκης δεδομένων</i>	38
4.2.3 <i>Η διάσταση του Χρόνου</i>	38
4.2.4 <i>Η διάσταση των Αεροδρομίων</i>	40

4.2.5	Η διάσταση των Αεροσκαφών	42
4.2.6	Η διάσταση του Εναέριου Χώρου - <i>Airspace</i>	44
4.2.7	Η διάσταση της ταυτότητας της Τροχιάς - <i>Trajectories</i>	45
4.3	ΠΙΝΑΚΕΣ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ	47
4.3.1	Δεδομένα κινούμενων αντικειμένων	47
4.3.2	Δομή Δεδομένων Τροχιάς – <i>Trajectory Data Structure</i>	48
4.4	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΠΟΘΗΚΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	51
4.4.1	Το επίπεδο μοντέλο - “ <i>Flat Model</i> ”	52
4.4.2	Το μοντέλο <i>Segment</i>	53
4.4.3	Το μοντέλο <i>TrajMat</i>	57
5	ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ	58
5.1	ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ	59
5.2	ΠΡΑΞΕΙΣ OLAP	60
5.3	ΚΑΤΑΝΕΜΗΤΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ	67
5.3.1	Εύρεση <i>max speed</i> ανά <i>trajectory</i>	68
5.3.2	Εύρεση <i>min speed</i> ανά <i>trajectory</i>	73
5.3.3	Εύρεση μέγιστου υψόμετρου ανά <i>trajectory</i>	79
5.4	ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΣΕ ΟΛΗ ΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΗ	84
5.4.1	Εύρεση <i>trajectory</i> με την μεγαλύτερη ταχύτητα	84
5.4.2	Εύρεση <i>trajectory</i> με την μικρότερη ταχύτητα	86
5.5	ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (AVERAGE SPEED) ΑΝΑ TRAJECTORY	89
5.6	ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΜΕΣΟΥ ΥΨΟΥΣ (AVERAGE ALTITUDE) ΑΝΑ TRAJECTORY	93
5.7	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	96
6	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ AIRFLIX	99
6.1	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ	99
6.2	Η ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ GEOTOOLS	100
6.3	ΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΠΑΦΗ ΧΡΗΣΤΗ – GRAPHICAL USER INTERFACE GUI	101
6.4	ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ – NEURAL NETWORK	105
6.4.1	Νευρωνικά Δίκτυα	105
6.4.2	Η βιβλιοθήκη <i>Encog</i>	106
6.4.3	Προσέγγιση Συνάρτησης – <i>Function Approximation</i>	106
6.4.4	Αρχιτεκτονική Δικτύου	107

6.4.5 Ομαλοποίηση δεδομένων	108
6.4.6 Συνάρτηση Ενεργοποίησης <i>Activation Function</i>	110
6.4.7 Εκπαίδευση Νευρωνικού δικτύου	111
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	117

1 Εισαγωγή

Η ζήτηση στις αερομεταφορές τις επόμενες δύο δεκαετίες προβλέπεται να αυξηθεί, με το αεροπλάνο να γίνεται ολοένα και περισσότερο το βασικό μεταφορικό μέσο σε μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού. Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση των αερομεταφορών, φέρει σημαντικές προκλήσεις στην βιομηχανία της πολιτικής αεροπορίας. Προβλέπεται ότι τα επόμενα 20 χρόνια [1] η αύξηση των αερομεταφορών θα είναι της τάξεως 4.4% παγκοσμίως και μόνο στην Ευρώπη ο όγκος της εναέριας κυκλοφορίας θα τριπλασιαστεί [2].

Προκειμένου να καλυφθούν οι νέες προσδοκίες (λειτουργική αποτελεσματικότητα, ασφάλεια των πτήσεων, οικονομική αποτελεσματικότητα και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο), τα ενδιαφερόμενα μέλη από πολλές χώρες και οργανισμούς, έχουν ξεκινήσει έρευνες για την αναβάθμιση των συστημάτων της διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας [3]. Στην παρούσα φάση η λειτουργία της εναέριας κυκλοφορίας παγκοσμίως στηρίζεται σε προκαθορισμένους τομείς (sector-based) Εικόνα 1-1 στους οποίους χωρίζεται ο εναέριος χώρος (airspace). Το μοντέλο αυτό δημιουργεί ένα όριο στην χωρητικότητα (capacity limit) των εναέριων μέσων που ίπτανται. Οι ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας αδυνατούν με τα υπάρχοντα συστήματα να διαχειριστούν τις ολοένα και αυξανόμενες κυκλοφορίες. Η πρόβλεψη τροχιάς του αεροσκάφους (trajectory prediction) είναι το κλειδί για την αποτελεσματικότερη διαχείριση του εναέριου χώρου. Η «τετραδιάστατη» 4D πρόβλεψη τροχιάς (trajectory prediction), ο υπολογισμός δηλαδή μελλοντικών καταστάσεων με γνώμονα τις τέσσερις διαστάσεις (ύψος, θέση, ταχύτητα, χρόνος) του αεροσκάφους, είναι η βάση στην λήψη αποφάσεων των σύγχρονων αυτοματοποιημένων συστημάτων διαχείρισης του εναέριου χώρου. Με βάση το trajectory prediction προστίθεται η δυνατότητα στα συστήματα να υπολογίζουν και να διαχειρίζονται αυτοματοποιημένα με ακρίβεια, τις ουρές των αεροσκαφών στις αφίξεις και τις αναχωρήσεις ενός αεροδρόμιου, τον έγκαιρο εντοπισμό και αποφυγή των συγκρούσεων για την ασφάλεια των πτήσεων, την επίγνωση της κατάστασης «Situation Awareness» του εναέριου χώρου και τελευταίο και σημαντικότερο την υποβοηθούμενη πλοήγηση των αεροσκαφών στον αέρα για εξοικονόμηση καυσίμων και μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα [4] [3].

1.1 Ορισμός του προβλήματος

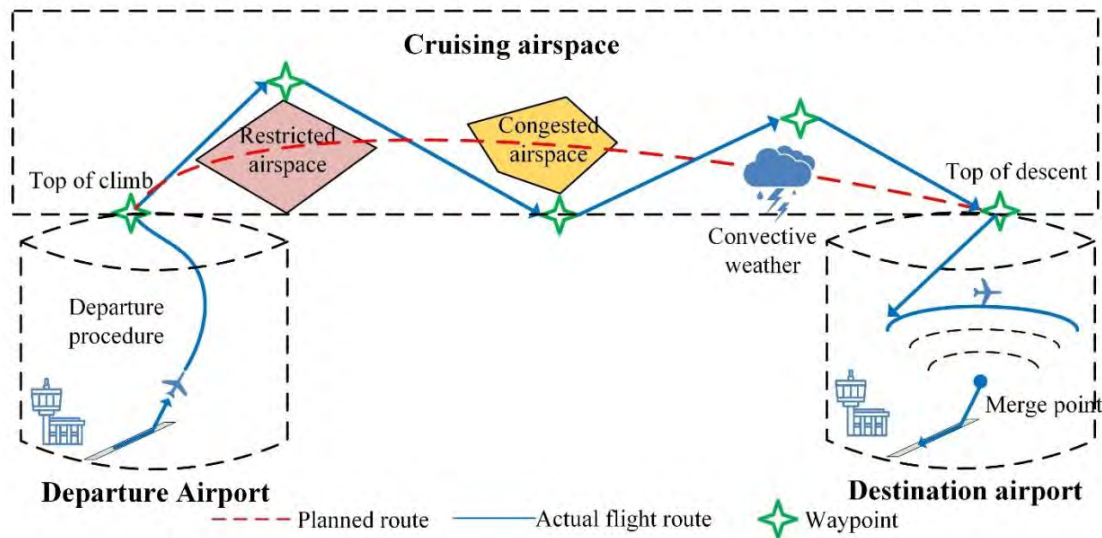
Η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας – ΟΔΑ των Η.Π.Α, γνωστότερη με το αρκτικόλεξο FAA (Federal Aviation Administration) και ο Ευρωπαϊκός οργανισμός για την ασφάλεια της Αεροναυτιλίας Eurocontrol θέσπισαν τον ορισμό της τροχιάς (trajectory) ως ένα τεσσάρων διαστάσεων (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος, ύψος και χρόνος) διάνυσμα για την αποτύπωση της διαδρομής πτήσης ενός αεροσκάφους [5] [6]. Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Air Organization - ICAO) επέκτεινε τον ορισμό της τροχιάς και στις επίγειες επιχειρήσεις, εκφράζοντας την τροχιά ως την περιγραφή της κίνησης του αεροσκάφους τόσο στον αέρα όσο και στο έδαφος συμπεριλαμβάνοντας και άλλες διαστάσεις όπως η ταχύτητα εδάφους, επιτάχυνση, το ύψος και άλλα γνωρίσματα.

Εξαιτίας της συμφόρησης των εναέριων χώρων από κυκλοφορίες, των καιρικών συνθηκών, διαφόρων περιορισμών και προσωρινών στρατιωτικών ασκήσεων που λαμβάνουν ενίοτε χώρα, ποτέ σχεδόν μία πτήση δεν ακολουθεί τη προσχεδιασμένη διαδρομή που έχει δηλώσει μέσω του σχεδίου πτήσης. Οι παραπάνω περιορισμοί και ο προκαθορισμένος εναέριος χώρος, καθιστούν την πρόβλεψη της κυκλοφορίας αρκετά δύσκολη και την διαχείριση του εναέριου χώρου περίπλοκη. Επομένως η πρόβλεψη τροχιάς τεσσάρων διαστάσεων του αεροσκάφους κρίνεται ζωτικής σημασίας.

Η πρόβλεψη της τροχιάς ενός αεροσκάφους, είναι η διαδικασία εκτίμησης της μελλοντικής του θέσης με βάση την τωρινή του κατάσταση. Η εκτίμηση των προθέσεων του πιλότου ή του ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας, οι καιρικές συνθήκες και τα υπολογιστικά μοντέλα επίδοσης των αεροσκαφών είναι τα βασικά δεδομένα για την πρόβλεψη της τροχιάς. Έχοντας τα προηγούμενα δεδομένα μπορεί να δει κανείς την πρόβλεψη τροχιάς από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Τα περισσότερα από τα δεδομένα που χρειάζονται για την πρόβλεψη εκπέμπονται τις περισσότερες φορές και από το ίδιο το αεροσκάφος ή ανιχνεύονται και συλλέγονται από επίγειους σταθμούς RADAR.

Η πρόβλεψη μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, της Στρατηγικής και της Τακτικής πρόβλεψης. Η στρατηγική πρόβλεψη στοχεύει κυρίως στην πρόβλεψη πιθανών διαδρομών βασιζόμενη στο σχέδιο πτήσης, που έχει κατατεθεί στις αρμόδιες υπηρεσίες πριν την απογείωση, στις καιρικές συνθήκες, σε ιστορικά δεδομένα όμοιων πτήσεων και στην επίδοση του εκάστοτε τύπου του αεροσκάφους (μέγιστη ταχύτητα, επιχειρησιακή οροφή - ύψος). Η τακτική πρόβλεψη είναι πιο ακριβής αφού συμπεριλαμβάνει δυναμικά δεδομένα όπως την ακριβή θέση του αεροσκάφους καθώς και την υπόλοιπη κυκλοφορία για

την πρόβλεψη. Ως προς την χρονική κλίμακα, η πρόβλεψη τροχιάς επίσης χωρίζεται σε δύο κατηγορίες [7] [8]: (1) Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη που αφορά μερικά λεπτά ή και λιγότερο, (2) Μακροπρόθεσμή πρόβλεψη που αφορά από δέκα λεπτά και πάνω.

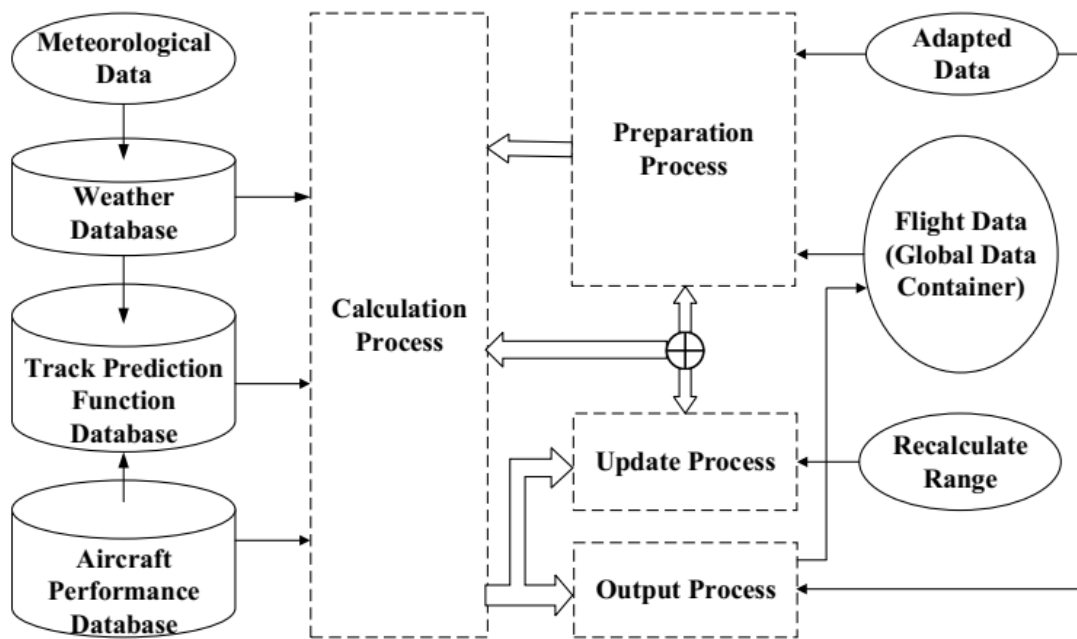


Εικόνα 1-1: Προκαθορισμένοι τομείς των εναέριων χώρων.

1.2 Υφιστάμενη Κατάσταση – State of the art

Η πρόβλεψη τροχιάς γίνεται σε επίπεδο λογισμικού από τα αυτοματοποιημένα συστήματα εδάφους που διαχειρίζονται την εναέρια κυκλοφορία. Τέτοια συστήματα αντλούν πληροφορίες κυρίως από αποθήκες δεδομένων (ιστορικά δεδομένα) και από τις εισερχόμενες ροές πληροφοριών (δίκτυο επιτήρησης εναέριων χώρων) σε πραγματικό χρόνο. Αποθήκες δεδομένων με ιστορικά flight trajectories ή και ιστορικά σχέδια πτήσης χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη δεδομένων για την παροχή πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast). Το πρωτόκολλο ADS-B χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών όπως θέση, ταχύτητα, ύψος σε πραγματικό χρόνο από τα αεροσκάφη. Εκπέμπεται ανά δύο δευτερόλεπτα από το αεροσκάφος και παρέχει μεγάλη ακρίβεια. Τα συστήματα που εκτελούν την πρόβλεψη, είναι είτε εμφωλευμένα, αποτελούν μέρος άλλων μεγαλύτερων συστημάτων είτε είναι αυτόνομα. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται «Trajectory Predictors» εφεξής TP και υλοποιούν αναλόγως των απαιτήσεων κάποιο μοντέλο πρόβλεψης. Λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων στη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας, το μοντέλο πρόβλεψης διαμορφώνεται ανάλογα. Το μοντέλο υλοποίησης των TPs εξαρτάται από τις απαιτήσεις χρήσης των παραγόμενων προβλέψεων από τον εκάστοτε χρήστη. Σε όρους

χρήσης ενός TP αυτά που παίζουν καθοριστικό ρόλο είναι η αναγκαιότητα της ακρίβειας των προβλέψεων, της αβεβαιότητας, της συχνότητας λήψης των προβλέψεων, των δεδομένων εισόδου, της διαδικασίας πρόβλεψης και της δομή των αποθηκευμένων δεδομένων. Λόγω των πολλαπλών απαιτήσεων ορισμένες φορές πολλά συστήματα κάνουν χρήση πολλών διαφορετικών TPs ταυτόχρονα. Ο FAA και το Eurocontrol προτείνουν ένα γενικό μοντέλο για σκοπούς διαλειτουργικότητας (interoperability) των συστημάτων μεταξύ τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-2



Εικόνα 1-2 Γενική Διαδικασία υλοποίησης ενός TP

Από την Εικόνα 1-2 διακρίνεται η γενική διαδικασία της πρόβλεψης της τροχιάς, όπως προτάθηκε από τους οργανισμούς, όπου αποτελείται από τέσσερις ενότητες: (1) προετοιμασία, (2) πρόβλεψη, (3) ανανέωση, (4) έξοδος δεδομένων [5]. Τα δεδομένα προετοιμασίας περιλαμβάνουν σχέδια πτήσης, τυποποιημένες διαδικασίες λειτουργίας των αερογραμμών, καιρικά δεδομένα και συνήθως μία βάση δεδομένων με τα χαρακτηριστικά (μέγιστη-ελάχιστη ταχύτητα, μήκος, πλάτος της ατράκτου κ.α.) επίδοσης του αεροσκάφους. Η διαδικασία πρόβλεψης θα ενσωματώσει αυτά τα δεδομένα για την δημιουργία ενός σεναρίου πτήσης (flight script, FS) που θα περιγράφει τις επόμενες κινήσεις του αεροσκάφους τμηματικά, δημιουργώντας ένα μοντέλο συμπεριφοράς (behavioral model). Το μοντέλο συμπεριφοράς αποτελείται από μία ταξινομημένη λίστα από τους ελιγμούς (maneuvers) πτήσης που πρόκειται να εκτελέσει το αεροσκάφος (γνωστές και ως προθέσεις του αεροσκάφους – flight intent). Περιγράφει το πως θα κινηθεί

το αεροσκάφος για να διαγράψει το μονοπάτι πτήσης. Στη διαδικασία πρόβλεψης οι TPs υλοποιούν ένα σύνολο αλγορίθμων συνθέτοντας ένα trajectory engine (TE). Ο TE παράγει την υπολογισμένη μελλοντική τροχιά συνδυάζοντας το μοντέλο συμπεριφοράς, που έχει προκύψει από την διαδικασία της προετοιμασίας, μετεωρολογικά δεδομένα και τις επιδόσεις του αεροσκάφους. Η ανανέωση των δεδομένων αναλαμβάνει την αναβάθμιση του σεναρίου πτήσης δηλαδή του μοντέλου συμπεριφοράς σύμφωνα με συνεχώς μεταβαλλόμενες πληροφορίες σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η αναβάθμιση του σεναρίου πτήσης μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολές ή και σε δημιουργία νέου σεναρίου πτήσης κάτι που ίσως πυροδοτήσει την εκ νέου δημιουργία νέας διαδικασίας προετοιμασίας. Η ενότητα της εξόδου των δεδομένων έχει σκοπό την αποστολή των προβλέψεων στην εφαρμογή του χρήστη για αξιοποίηση ή αξιολόγηση της προβλεπόμενης τροχιάς.

Αναφορικά οι μέθοδοι πρόβλεψης δύνανται να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες (1) μεθόδους εκτίμησης κατάστασης (state estimation methods), (2) κινηματικές μεθόδους (kinetic methods) και σε (3) μεθόδους μηχανικής μάθησης (machine learning methods).

Οι μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης στηρίζονται σε εξισώσεις κίνησης για να εκτιμήσουν την κατάσταση του αεροσκάφους. Χρησιμοποιούν μόνο την θέση, ταχύτητα και την επιτάχυνση του αεροσκάφους ως παραμέτρους εκτίμησης. Η πιο γνωστή εξίσωση που χρησιμοποιείται σε αυτές της περιπτώσεις είναι ο αλγόριθμός Kalman Filter με βάση τον οποίο γίνεται εκτίμηση της μελλοντικής κατάστασης βασίζοντας σε προηγούμενες καταστάσεις. Οι μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης δεν λαμβάνουν υπόψιν κινηματικά κριτήρια με αποτέλεσμα να παράγουν λανθασμένες προβλέψεις. Οι μέθοδοι αυτοί είναι πιθανολογικοί (probabilistic).

Αντιθέτως οι προβλέψεις που στηρίζονται στις κινηματικές μεθόδους, μελετούν τις δυνάμεις που ασκούνται στο αεροσκάφος και απαιτούν υπερβολικά πολλές παραμέτρους για τις εξισώσεις τους, κάτι που τις καθιστά σχεδόν δύσκολο στην χρήση τους. Οι κινηματικές μέθοδοι στηρίζονται στις δυνάμεις που ασκούνται στο αεροσκάφος σε σχέση με την κίνησή του. Η πρόβλεψη βασίζεται σε ένα δυναμικό μοντέλο που εκφράζεται ως ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, δεδομένης της τρέχουσας κατάστασης του αεροσκάφους (όπως μάζα, ώθηση, οπισθέλκουσα, θέση, ταχύτητα, γωνία κλίσης και ανόδου ή καθόδου), μετεωρολογικές συνθήκες (όπως ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου) και τις προθέσεις του αεροσκάφους (όπως επόμενα σημεία, προορισμός, ρυθμός ανόδου κ.α.) για την

συνεχή πρόβλεψη μελλοντικών πιθανών σημείων που σχηματίζουν την τροχιά του. Παρόλου που οι προβλέψεις αυτές έχουν μεγάλη ακρίβεια, ακόμα και τα μεγαλύτερα κέντρα διαχείρισης εναέριας κυκλοφορίας είναι αδύνατο να συγκεντρώσουν σε πραγματικό χρόνο όλες αυτές τις παραμέτρους.

Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούν σαφώς μηχανική μάθηση (machine learning) και αλγορίθμους για την εξόρυξη των δεδομένων (data mining) από ιστορικές τροχιές πτήσης (historical flight trajectories) και ιστορικά μετεωρολογικά στοιχεία για την πρόβλεψη. Η μηχανική μάθηση δεν απαιτεί την σαφή μοντελοποίηση μέσω εξισώσεων της μηχανικής πτήσης, των διαδικασιών, των κανόνων πτήσης και την δυνάμεις που ασκούνται στο αεροσκάφος αντιθέτως «μαθαίνει» από τα ιστορικά δεδομένα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος των ιστορικών δεδομένων τόσο πιο αποτελεσματικό θα είναι και το μοντέλο πρόβλεψης. Η μηχανική μάθηση εξορύσσει από τα ιστορικά δεδομένα τις τροχιές με αποτέλεσμα το μοντέλο πρόβλεψης να μπορεί να λύσει ευκολότερα το πρόβλημα τις πρόβλεψης και να τονίσει την ζωτικής σημασίας ύπαρξη της αποθήκης δεδομένων. Οι δύο πιο γνωστοί μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μηχανική μάθηση είναι regression και τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks).

1.3 Στόχοι της διπλωματικής

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι να αποδείξει μέσω της έρευνας την αναγκαιότητα χρήσης των αποθηκών δεδομένων τροχιάς – Trajectory Data Warehouse για την βελτίωση των υπηρεσιών εναέριας κυκλοφορίας. Στόχος είναι η υλοποίηση μιας αποθήκης δεδομένων τροχιάς αεροσκαφών η οποία θα περιλαμβάνει ιστορικά δεδομένα τροχιάς πτήσεων που θα διευκολύνουν στην κατανόηση των προβλημάτων της υφιστάμενης δομής στο πεδίο των αερομεταφορών. Η τροχιά ενός αντικειμένου γενικά αποτελείται από μία λίστα σημείων στο χώρο που όταν ενωθούν μεταξύ τους διαγράφουν την κίνηση που ακολούθησε. Η πηγή των δεδομένων που βασίστηκε η παρούσα διπλωματική είναι οι πληροφορίες αυτόματης εξαρτώμενης επίβλεψης ή με τον αγγλικό όρο ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast). Το ADS-B είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας που διαδίδεται με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και μεταδίδει ζωτικές πληροφορίες από τα ηλεκτρονικά των αεροσκαφών οι οποίες είναι απαραίτητες για την σύνθεση της τροχιάς που ακολούθησε. Μέσω της ανάλυσης αυτών των δεδομένων θέλουμε να θέσουμε τις προϋποθέσεις για την μελλοντική κατασκευή ενός συστήματος πρόβλεψης τροχιάς που θα είναι αντάξιο των αυξημένων απαιτήσεων στην

αεροναυτιλία. Στόχος επίσης της παρούσας εκτός της υλοποίησης της αποθήκης δεδομένων είναι η ανάπτυξη ενός λογισμικού μέσω του οποίου θα γίνει σύνδεση με την αποθήκη δεδομένων για οπτικοποίηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

2 Εναέρια Κυκλοφορία

Ο Έλεγχος Εναέριας Κυκλοφορίας (EEK) είναι υπηρεσία η οποία παρέχεται στους αεροναυτιλομένους με στόχο την πρόληψη των συγκρούσεων μεταξύ αεροσκαφών, την πρόληψη των συγκρούσεων μεταξύ αεροσκαφών και εμποδίων στην περιοχή ελιγμών ενός αεροδρομίου και την επιτάχυνση και διατήρηση τακτικής ροής της εναέριας κυκλοφορίας [9]. Ο διεθνής όρος που χρησιμοποιείται γι' αυτήν την υπηρεσία είναι *ATC* (Air Traffic Control).

Η υπηρεσία EEK (ATC) ανήκει σε ένα σύνολο υπηρεσιών που δρουν παράλληλα και που ορίζονται ως *ATS* (Air Traffic Services) και στην ελληνική γλώσσα αποδίδονται με τον όρο *υπηρεσίες εναέριας κυκλοφορίας*. Σε αυτές τις υπηρεσίες ανήκουν, εκτός από τον EEK, οι υπηρεσίες πληροφοριών πτήσης, οι υπηρεσίες συναγερμού και οι συμβουλευτικές υπηρεσίες στον τομέα της εναέριας κυκλοφορίας. Οι υπηρεσίες εναέριας κυκλοφορίας μαζί με τις υπηρεσίες επικοινωνιών, πλοήγησης, επιτήρησης, τις υπηρεσίες αεροναυτικών πληροφοριών και τις μετεωρολογικές υπηρεσίες που προορίζονται για την αεροναυτιλία αποτελούν τις υπηρεσίες αεροναυτιλίας [10].

Οι υπηρεσίες εναέριας κυκλοφορίας είναι λοιπόν υπεύθυνες για τον ασφαλή διαχωρισμό των αεροσκαφών στον αέρα και στο έδαφος (στη περιοχή ελιγμών ενός αεροδρομίου). Τη στοιχειοθέτηση και διανομή των πολλαπλών πληροφοριών που είναι αναγκαίες να διατίθενται προς τους πιλότους σε μόνιμη, εποχιακή ή παροδική βάση και για τη συνέγερση όλων των απαραίτητων φορέων και μέσων σε περιπτώσεις που απειλείται ή ενδέχεται να απειληθεί η ασφάλεια πτήσεων. Στο έργο τους οι υπηρεσίες εναέριας κυκλοφορίας υποστηρίζονται από τις υπόλοιπες υπηρεσίες αεροναυτιλίας οι οποίες είναι υπεύθυνες μεταξύ άλλων και για την κατασκευή, συντήρηση και εφαρμογή πολύπλοκων και εντελώς εξειδικευμένων ηλεκτρονικών συστημάτων. Όσοι φορείς παρέχουν όλες τις παραπάνω υπηρεσίες οφείλουν να τηρούν ειδικούς κανονισμούς ασφαλείας.

Λειτουργούν επίσης υπηρεσίες που ασχολούνται με τον σχεδιασμό και τη διαχείριση του εναέριου χώρου και τη διαχείριση της ροής της εναέριας κυκλοφορίας. Αυτές οι υπηρεσίες μαζί με τις υπηρεσίες εναέριας κυκλοφορίας αποτελούν τμήμα της διαχείρισης της εναέριας κυκλοφορίας (Air Traffic Management - **ATM**) [11]. Με γνώμονα την αποτελεσματικότερη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός για

την Ασφάλεια της Αεροναυτιλίας - **Eurocontrol** [12] έχει θεσπίσει έναν φορέα ο οποίος προαποφασίζει για την ώρα αναχώρησης κάθε πτήσης εντός του ευρωπαϊκού εναέριου χώρου με σκοπό να περιορίσει σε όρια ασφαλείας τον αριθμό πτήσεων σε κάθε περιοχή που ασκείται ΕΕΚ. Η υπηρεσία αυτή είναι γνωστή με τον αγγλικό όρο **CFMU (Central Flow Control Management Unit)** η οποία έκτοτε δρα ως αναπόσπαστο κομμάτι του ευρωπαϊκού συστήματος ΕΕΚ.

2.1 Ιστορία και εξέλιξη της Εναέριας Κυκλοφορίας

Η ανάγκη παροχής πληροφοριών καιρού, πλοήγησης και αποφυγής εναέριων συγκρούσεων για τους αεροναυτιλομένους ξεκίνησε στην Ευρώπη, κυρίως μεταξύ Αγγλίας και Γαλλίας, το 1921, μετά από ένα εναέριο ατύχημα. Εντούτοις δεν υπήρξε επίσημη έναρξη μιας οργανωμένης υπηρεσίας. Μετά το 1930 ωστόσο στις ΗΠΑ, η ύπαρξη πολλών πτήσεων αεροταχυδρομείων που πετούσαν καθημερινά μεταξύ των διαφόρων πολιτειών προκάλεσε επικίνδυνες προσεγγίσεις αεροπλάνων όπως επίσης απαίτησε και την οργάνωση δικτύου επιγείων βοηθημάτων αεροναυτιλίας και παροχής πληροφοριών για τη συνεχή και κατά το δυνατόν καθημερινή εκτέλεση των πτήσεων. Το 1932 οι αεροπορικές εταιρείες αποφάσισαν να εκπονήσουν ένα σύστημα για τη δική τους ασφάλεια στον χώρο των Νοτιοανατολικών ΗΠΑ. Ο Ερλ Γουώρντ (Earl Ward), πιλότος αεροταχυδρομείων, εργάστηκε προς αυτήν την κατεύθυνση και επινόησε πρώτος ένα σύστημα παροχής πληροφοριών μέσω ασυρμάτου και ορατών σημάτων εδάφους ενώ προώθησε ένα δίκτυο φωτεινών φάρων που καθοδηγούσαν οπτικά τους πιλότους στη διαδρομή τους σε συνδυασμό με αναφορές όταν περνούσαν από πάνω τους για τον έλεγχο της προόδου κάθε πτήσης και υπολογισμού της θέσης της. Έτσι ιδρύθηκε το πρώτο δίκτυο μέσω «αεροδιαδρόμων» και διατυπώθηκαν οι πρώτοι βασικοί κανονισμοί εναέριας κυκλοφορίας με έδρα το αεροδρόμιο του Κλήβελαντ. Το 1934 υπήρχαν τουλάχιστον 20 παρόμοια κέντρα παρακολούθησης των πτήσεων με πλήρη τηλεφωνική επικοινωνία μεταξύ τους και σχεδόν όλα τα αεροπλάνα εφοδιάστηκαν με ασύρματο.

Επίσης υιοθετήθηκε σύστημα καταγραφής των αναφορών σε λωρίδες χαρτιού ενώ σε ένα μεγάλο χάρτη κινούσαν ειδικά σημάδια που έδειχναν τη θέση κάθε πτήσης όπως εκτιμιούνταν από τις αναφορές των πιλότων, τις αποστάσεις την ώρα και τις ταχύτητες. Ο άμεσος βοηθός του Ward, ονόματι Γκλέν Γκίλμπερτ (Glen Gilbert) ανέλαβε να κωδικοποιήσει όλο το σύνολο των κανόνων μεταξύ των πιλότων και των ανθρώπων που παρακολουθούσαν τις πτήσεις στα κέντρα αυτά εκδίδοντας ειδικά εγχειρίδια. Χάρης στον

Γκίλμπερτ δόθηκε και μια άλλη διάσταση στο έργο αυτών των ανθρώπων. Αναγνωρίστηκε ότι την ασφαλή καθοδήγηση των πτήσεων θα αναλάμβαναν πλέον τα κέντρα εκδίδοντας εντολές στις οποίες θα υπάκουαν όλοι οι πιλότοι που πετούσαν μέσα στην ίδια περιοχή αναλαμβάνοντας εκείνα την ευθύνη διαχωρισμού των πτήσεων κι όχι οι πιλότοι μεταξύ τους. Έκτοτε καθιερώθηκε ο όρος «έλεγχος» στο ήδη υπάρχον σύστημα «εναέριας κυκλοφορίας» κι από το 1934-35 ο όρος εμφανίζεται επίσημα για πρώτη φορά με την πλήρη του μορφή ως Έλεγχος Εναέριας Κυκλοφορίας (EEK)

Διαπιστώθηκε όμως ότι όλοι αυτοί οι κανονισμοί δεν θα είχαν αξία παρά μόνο αν όλοι ανεξαιρέτως οι αεροναυτιλόμενοι υπάκουαν σε αυτούς και παράλληλα έγινε αντιληπτό ότι επρόκειτο για ένα δαπανηρό σύστημα που ξεπερνούσε τα όρια των εταιρειών ενώ επρόκειτο στην ουσία για μια δημόσια κοινωφελή υπηρεσία. Η κυβέρνηση των ΗΠΑ (Φ.Ν. Ρούσβελτ) που αντιλήφθηκε την οικονομική σημασία της ανάπτυξης των αερομεταφορών αποφάσισε να αναλάβει το σύστημα υπό την κρατική κηδεμονία. Το 1936 η συντήρηση των φάρων διαδρομής και το σύστημα των αεροδιαδρόμων σε όλη τη χώρα περιήλθε στον προϋπολογισμό του κράτους αν και η λειτουργία των αεροδρομίων παρέμεινε υπό το παλιό καθεστώς. Μεταξύ όμως 1941-44 η νεοϊδρυθείσα Αμερικανική Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (CAA - Civil Aviation Authority) ανέλαβε και τα αεροδρόμια και τους πύργους ελέγχου μέσα σε αυτά, κάπου 115 ως τότε. Η βασική διάρθρωση αυτή του EEK μέσω των υπηρεσιών πολιτικής αεροπορίας χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο που υιοθετήθηκε αργότερα από όλες τις χώρες. Αξίζει να αναφέρουμε ότι το 2011-12 η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί προς ψήφιση κάτι παρόμοιο για όλες τις χώρες μέλη της αναλαμβάνοντας την επιθεώρηση ενός συστήματος Πανευρωπαϊκού EEK, που φέρει το όνομα SES (Single European Sky).

2.2 Οι πρώτοι διεθνείς αεροδιάδρομοι

Μεταπολεμικά η Αγγλία ήταν η πρώτη Ευρωπαϊκή χώρα στην οποία οι υπηρεσίες EEK ξεκίνησαν μια συστηματική οργάνωση και τυποποίηση. Ιδρύθηκε κέντρο EEK, καθιερώθηκαν τοπικοί κανονισμοί, παρόμοιοι αν κι όχι πάντα ταυτόσημοι με εκείνους στις ΗΠΑ, και ιδρύθηκαν οι πρώτοι Ευρωπαϊκοί αεροδιάδρομοι. Η χάραξή τους πάνω στον χάρτη έγινε με έγχρωμα μολύβια (σαν μαρκαδόροι) κι ονομάστηκαν με βάση το πρώτο γράμμα του χρώματος κι έναν αριθμό μετά, π.χ. B1 από το Blue και το 1, G12 από το Green και το 12 κ.ο.κ. Σχεδόν όλοι που χαράχτηκαν τότε επιζούν ως τις μέρες μας κι εκτείνονται πολύ πέραν της Ευρώπης με χαρακτηριστικό τον A1 (Amber + 1), ο πρώτος

που δημιουργήθηκε, που φτάνει από την Αγγλία ως την ...Ινδία. Την Ελλάδα διασχίζουν μερικοί από αυτούς τους πολύ πρώτους διαδρόμους, όπως ο:

- [1].B1: Διατρέχει την Αγγλία, Ολλανδία, Γερμανία φτάνοντας στα βόρεια σύνορά μας και μετά ακολουθεί τη διαδρομή Θεσσαλονίκης, Σκοπέλου, Αθήνας, Μεθάνων, Παλαιοχώρας Κρήτης και καταλήγει στη Λιβύη
- [2].A14: Ξεκινάει από το Μιλάνο, φτάνει στο Μπρίντεζι κι ακολουθεί τη διαδρομή Κέρκυρα, Άραξο, Τρίπολη, Μήλο, Σητεία και καταλήγει στη Μέση Ανατολή

Από τότε η προσθήκη πολύ περισσότερων διαδρόμων σε μεγάλη αφθονία επέβαλε τη χρήση γραμμών πολύ πέρα των αρχικών των χρωμάτων οπότε το χρώμα δεν αναφέρεται πλέον καθόλου στην ονομασία τους. Επίσης ο εναέριος χώρος χαρακτηρίστηκε σε Κατώτερο κι Ανώτερο επίπεδο με διαχωριστική γραμμή το ύψος των 20.000-24.000 ποδιών στην Ευρώπη και 18.000 στις ΗΠΑ, διαχωρίζοντας θεωρητικά τον χώρο των αργών κι ελαφρών πτήσεων και τον Ανώτερο, που επρόκειτο να κυριαρχηθεί από τα ταχύτερα νέα αεριοθούμενα επιβατηγά αεροπλάνα.

2.3 Διαίρεση Υπηρεσιών ΕΕΚ

Στην Αγγλία ακόμα δημιουργήθηκε η πρώτη σχολή εκπαίδευσης των Ελεγκτών Εναέριας Κυκλοφορίας, κατά τους Άγγλους: Air Traffic Control Officers (ATCO), αρκετοί δε από τους οποίους είχαν πρότερη εμπειρία από το σύστημα εναέριας αναχαίτησης που εφαρμόσε η Αγγλία το 1939-45 στον 2ο ΠΠ. Οι Άγγλοι επίσης με λεπτομερή τρόπο άρχισαν να αναπτύσσουν σύστημα σχεδίασης και καταγραφής ελιγμών απογείωσης και προσγείωσης εκπονώντας ένα σύστημα διαδικασιών, δηλαδή τρισδιάστατων τροχιών, τις οποίες ακολουθούσαν σταθερά οι πιλότοι όταν έφευγαν από ένα αεροδρόμιο και μέχρι να βρεθούν μέσα στους αεροδιάδρομους, και αντιστρόφως. Με βάση πάντα τη ράδιο-επαφή πιλότου-ΕΕΚ και με οδηγίες που αντανakλούσαν στις σταθερές αυτές διαδικασίες με καταγεγραμμένα ονόματα και περιγραφή σε εγχειρίδια, η Εναέρια Κυκλοφορία πήρε μια σημαντική εξέλιξη, με την ίδρυση του αποκαλούμενου Διαδικαστικού Ελέγχου, ο οποίος επέτρεψε την κωδικοποίηση του τρόπου εργασίας και την υποστήριξη της συστηματικής ανάπτυξης των εμπορικο-επιβατικών μεταφορών στην Ευρώπη. Έκτοτε η πλειονότητα των διεθνών κανονισμών ακολούθησε το αγγλικό σύστημα υιοθέτησης διαδικασιών πολλοί εκ των οποίων παραμένουν αναλλοίωτοι στα σχετικά θεμελιώδη εγχειρίδια. Μοιραία από τότε και η διεθνής φρασεολογία υιοθέτησε λόγω διαδικασιών την αγγλική γλώσσα

ως παγκόσμια γλώσσα της ΕΕΚ. Τον καιρό εκείνο ο ΕΕΚ χωρίζεται επίσημα σε 3 υπηρεσίες οι οποίες σήμερα εκτελούν διαφορετικό έργο και απαιτούν ξεχωριστή ειδίκευση:

- [1]. Τον Έλεγχο Διαδρομής ή Περιοχής: της κυκλοφορίας που λαμβάνει χώρα μέσα σε διαδρόμους
- [2]. Τον Έλεγχο Τερματικής Περιοχής ή Προσέγγισης: της κυκλοφορίας που λαμβάνει χώρα σε μια περιοχή ελιγμών προς και από το αεροδρόμιο (ή κοντινά μεταξύ τους αεροδρόμια)
- [3]. Τον Έλεγχο Αεροδρομίου ή Πύργου: της κυκλοφορίας που λαμβάνει χώρα επί του εδάφους του αεροδρομίου και σε μια περιοχή γύρω από αυτό που εκτελούνται οι φάσεις της τελικής προσέγγισης ή ελιγμών αμέσως μετά την απογείωση.

Κάθε αεροδρόμιο διαθέτει μέσα σε αυτό Πύργο Ελέγχου Αεροδρομίου. Ο Έλεγχος Τερματικής Περιοχής ή Προσέγγισης μπορεί να γίνεται μόνο για ένα αεροδρόμιο ή για περισσότερα γειτονικά μέσα σε μια περιοχή 60-80 ναυτικών μιλίων. Ο Έλεγχος Διαδρομής ή Περιοχής γίνεται σε όλο τον υπόλοιπο 3διάστατο χώρο. Συνήθως ο Έλεγχος Τερματικής Περιοχής ή Προσέγγισης που γίνεται για ένα μόνο αεροδρόμιο συστεγάζεται με τον Πύργο Αεροδρομίου. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση τα κτίρια του Ελέγχου Τερματικής Περιοχής ή Προσέγγισης και Διαδρομής ή Περιοχής μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε αλλού. Στην Ελλάδα ο Έλεγχος Διαδρομής ή Περιοχής και ο Έλεγχος Τερματικής Περιοχής ή Προσέγγισης Αθηνών στεγάζονται στο παλαιό αεροδρόμιο του Ελληνικού. Το αεροδρόμιο των Σπάτων (Βενιζέλος) διαθέτει συνεπώς μόνο έλεγχο Πύργου – Αεροδρομίου. Στα περισσότερα περιφερειακά αεροδρόμια οι μονάδες Προσέγγισης και Πύργου συστεγάζονται στα τοπικά αεροδρόμια.

Στη δεκαετία 1950-60 η τεχνολογία του πολέμου που μεταφέρθηκε εξελιγμένη στην ΕΕΚ και την αεροπορία συνετέλεσε πολύ, μαζί με την ύπαρξη του Διαδικαστικού Ελέγχου, στην ανάπτυξη τακτικών πτήσεων με αεριοθούμενα πολιτικά αεροπλάνα. (το πρόβαδισμα στα αεριοθούμενα επιβατικά αεροπλάνα παγκόσμια έχει η Ευρώπη, με το Αγγλικό De Havilland Comet DH6 και το Γαλλικό Caravelle SA210 - αεροπλάνα που πέταγαν στους Ελληνικούς τουριστικούς τόπους ως το 1980 περίπου).

Χάρης στην ανάπτυξη των ραδιοεντοπιστών οι άλλοτε φωτεινοί φάροι αντικαταστάθηκαν από ραδιο-εκπομπούς στα σημεία ορισμού των αεροδιαδρόμων – και ονομάστηκαν Ραδιοφάροι - ενώ η ραδιο-εντοπιστική συσκευή εγκαταστάθηκε στο αεροπλάνο. Έτσι οι πιλότοι έβρισκαν τον δρόμο τους με ραδιο-εντόπιση των ραδιοφάρων χωρίς να

έχουν καμία ανάγκη ορατής επαφής με το έδαφος αδιαφορώντας για την ορατότητα, τη μέρα ή τη νύκτα. Αυτή η ναυτιλία ονομάστηκε Ραδιο-ναυτιλία ή Ενόργανη Αεροναυτιλία κι επρόκειτο για μια επανάσταση στην εξέλιξη της πολιτικής αεροπορίας που επέτρεψε τις τακτικές προγραμματισμένες πτήσεις μεταξύ χωρών σε όλον τον πλανήτη και την εξέλιξη των αερομεταφορών σε σημαντικότερο παγκόσμιο οικονομικό παράγοντα.

2.4 Η 1η και η 2η γενιά συστημάτων ΕΕΚ

Το γνωστό ραντάρ από το 2^ο ΠΠ(Παγκόσμιο πόλεμο) ή ραδιοεντοπιστής που προέρχεται από σύντμηση των αγγλικών λέξεων Radio Detection And Ranging και σημαίνει ανίχνευση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μέτρηση αποστάσεως. Τα πρώτα ραντάρ που αναπτύχθηκαν την δεκαετία του 1950, ήταν του τύπου GCA (Ground Control Approach) και εξυπηρετούσαν κυρίως τις προσγειώσεις κάτω από πολύ άσχημες συνθήκες ορατότητας. Αν και διαδεδομένο στη στρατιωτική αεροπορία χρησιμοποιήθηκε και στην πολιτική κυρίως σε χώρες τις βόρειας Ευρώπης. Παρόλα τα πλεονεκτήματά του για επιβοήθηση των πιλότων σε αντίξοες συνθήκες, το GCA απαιτεί έναν Ελεγκτή ΕΚ αποκλειστικά για μόνο ένα αεροσκάφος τη φορά και σε απόσταση πολύ κοντά στο αεροδρόμιο.

Αντιθέτως την δεκαετία του 60, αναπτύχθηκαν ραντάρ προσέγγισης (Approach Radar) ή Τερματικής Περιοχής (TAR - Terminal Area Radar) που ήταν σε θέση να καθοδηγήσουν κινήσεις προς τα αεροδρόμια από απόσταση 60 ως 80 ναυτικά μίλια και μέχρι μια ικανοποιητική απόσταση από τον διάδρομο προσγείωσης. Η εμβέλεια τους όμως δεν μπορούσε να επεκταθεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις και είχαν αρκετά μειονεκτήματα στη χρήση, την απεικόνιση των στόχων και την ευκρίνεια. Η απεικόνιση της ταυτότητας της πτήσης στην οθόνη ήταν αδύνατη και το ύψος του αεροπλάνου γινόταν γνωστό κυρίως με τον διάλογο Ελεγκτών και πιλότων. Αυτού του τύπου τα ραντάρ παρέμειναν γνωστά με τον όρο 'πρωτεύοντα' ή **Primary Radar** αλλά παρέμειναν σίγουρα τα καλύτερα μέσα άσκησης ΕΕΚ για την εποχή. Εντούτοις μόνο τα μεγάλα αεροδρόμια εξοπλίστηκαν με αυτά ενώ στα μικρότερα επικρατούσε ακόμα ο Διαδικαστικός Έλεγχος. Στα τέλη του 60 ένα δεύτερο είδος ραντάρ προστέθηκε στην τότε τεχνολογία που πρόσθεσε την ταυτότητα των πτήσεων και την αυτόματη ανάγνωση του ύψους από την ΕΕΚ: ονομάστηκαν 'Δευτερεύοντα Ραντάρ' ή **Secondary Radar**. Η παράλληλη χρήση και των δύο ενίσχυσε σε μεγάλο βαθμό τη χωρητικότητα στις Τερματικές Περιοχές. Διαπιστώθηκε μάλιστα ότι τα 'Δευτερεύοντα Ραντάρ' είχαν μεγαλύτερη κάλυψη και σχετικά μικρότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης, πράγμα που σε ένα βαθμό προσέφερε ένα πολύτιμο μέσο και

στον Έλεγχο Περιοχής αν και όχι σε όλη την έκταση του εναερίου χώρου πέρα από το γεγονός ότι οι μεγάλες θαλάσσιες εκτάσεις δεν προσέφεραν πάντα τόπους όπου ήταν δυνατή η εγκατάστασή τους.

Με τεχνολογία παρόμοια σχεδόν του ραντάρ το 1959 χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα οι ραδιοφάροι. Ένα είδος αυτόματου αποστασιόμετρου που έγινε γνωστό με το όνομα **DME (Distance Measuring Equipment)**, προσέφερε την αυτόματη ανάγνωση της απόστασης από ένα σημείο στον πιλότο. Με την εξέλιξη και νέων τύπων ραδιοφάρων, που δούλευαν σε πλέον αξιόπιστο φάσμα συχνοτήτων (VHF), το **VOR (VHF Omni Range)** προσέφερε δυνατότητα πλοήγησης των πιλότων προς συγκεκριμένα σημεία με ακρίβεια μέχρι και 1 μοίρα στην πορεία των πτήσεων. Ο συνδυασμός των δύο αυτών ραδιοφάρων, έδωσε αρχικά ένα νέο μέσο μέτρησης των διαχωρισμών ασφαλείας μεταξύ των αεροπλάνων και βοήθησε, στην αεροναυτιλία, πέραν της περιορισμένης εμβέλειας του ραντάρ από 150 μέχρι και 200 ναυτικά μίλια όπου δεν υπήρχαν διαθέσιμα ραντάρ. Αυτό πολλαπλασίασε τη δημιουργία των αεροδιαδρόμων και έδωσε μια ικανοποιητική λύση στην αύξηση της κυκλοφορίας στον Έλεγχο Περιοχής. Τέλος, βασισμένο στην τεχνολογία του VOR, αναπτύχθηκε και ένα ειδικό σύστημα αποκλειστικά ως βοήθημα των προσγειώσεων σε αεροδρόμια, το **ILS (Instrument Landing System)** που εξασφάλιζε στον πιλότο αυτόματη καθοδήγηση στην προσγείωση εξυπηρετώντας την ίδια στιγμή μεγάλο αριθμό σχεδόν ταυτόχρονων αφίξεων.

Τα συστήματα της 1ης γενιάς βοήθησαν σε τεράστιο βαθμό την αύξηση των πτήσεων, οι οποίες γίνονταν ολοένα και πιο προσιτές στο εύρη κοινό. Η αύξηση των πτήσεων δημιούργησε ένα νέο πρόβλημα χωρητικότητας των συστημάτων ΕΕΚ, όπου στα τέλη της δεκαετίας του 70, αντιμετώπιζαν ήδη ένα σταθερό ετήσιο ποσοστό αύξησης γύρω στα 15-20%. Σύντομα έγινε ορατό ότι ο ανθρώπινος παράγοντας και τα υπάρχοντα τότε συστήματα δεν είχαν τη δυνατότητα να ανταπεξέλθουν σε μια αύξηση διπλασιασμού της κυκλοφορίας μέσα σε μια 5ετία, εάν μέρος της εργασίας δεν γίνονταν αυτοματοποιημένα. Έτσι άρχισε μια φάση αυτοματοποίησης με σκοπό να αντιμετωπισθεί η συνεχής αύξηση για την οποία υπήρχε πρόβλεψη να φτάσει σε αδιέξοδο μετά το 1990 με καταστροφικές επιπτώσεις στην οικονομία του εμπορίου και του τουρισμού. Η εποχή μεταξύ 1975-1990 έγινε γνωστή ως η 2η γενιά των συστημάτων ΕΕΚ, που στην πραγματικότητα δεν ήταν παρά η απαρχή μιας συστηματικής και συνεχούς τεχνολογικής εξέλιξης με α-

ντικείμενο την ικανοποίηση ολοένα και μεγαλύτερων χωρητικοτήτων πτήσεων στα συστήματα ΕΕΚ. Είναι χαρακτηριστικό ότι από τη δεκαετία του 70, που ο ημερήσιος αριθμός εμπορικών πτήσεων σε όλη την Ευρώπη έφτανε τις 5000-7.000, το 2008, ο αριθμός αυτός είχε ξεπεράσει τις 25.000 (που σε περιόδους τουριστικής αιχμής φτάνουν και τις 30.000) - ένας ρυθμός που προσεγγίζει τον διπλασιασμό (αύξηση 100%) ανά 10ετία.

Τα χαρακτηριστικά του Αυτοματισμού αυτού στηρίχτηκαν κυρίως στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οι οποίοι έκαναν την εμφάνισή τους στους παρακάτω τομείς:

- [1]. Απεικόνιση οθόνης ραντάρ με Συνθετική Εικόνα: Αντί για την απλή εμφάνιση ανακλάσεων των αεροπλάνων με τη μορφή ‘στιγμάτων’ καθιερώθηκε η χρήση χαρακτήρων / συμβόλων και η προσθήκη σε ειδική ‘ετικέτα’ που ακολουθεί αυτά τα σύμβολα που αναγράφει με χαρακτήρες τα στοιχεία της πτήσης. Μέσα στην οθόνη μπορούν να παραστούν ψηφιακοί χαρακτήρες με χρήσιμες λίστες και να εκτελεστούν ειδικές ρουτίνες, όπως αυτόματοι υπολογισμοί αποστάσεων, πορειών, αλλαγή διαστάσεων οθόνης κλπ.
- [2]. Ανάλυση σημάτων που συλλαμβάνουν τα ραντάρ με σκοπό την απόρριψη ανεπιθύμητων φαινομένων και σωστότερου υπολογισμού θέσεων αεροσκαφών, πράγμα που εξασφαλίζει καθαρή και βελτιωμένη απεικόνιση της κυκλοφορίας
- [3]. Ηλεκτρονική επεξεργασία των σχεδίων πτήσεων για καταχώρηση, ενεργοποίηση και γεωγραφική διανομή με έτοιμους προϋπολογισμούς θέσης και χρόνου για σχεδιασμό και ανάλυση διαχωρισμών
- [4]. Ηλεκτρονικό έλεγχο των επιγείων και εναερίων επικοινωνιών
- [5]. Σύνδεση πολλών απομακρυσμένων και μεμονωμένων κεραιών ραντάρ για συνάθροιση της κάλυψης περιοχής πέραν της φυσικής εμβέλειας μιας και μόνο κεραίας ραντάρ. Το χαρακτηριστικό αυτό επέτρεψε την καθιέρωση ελέγχου με ραντάρ και στον Έλεγχο Περιοχής οπότε ήρθε η στιγμή της εγκατάλειψης του Διαδικαστικού Ελέγχου στις μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις με εξαίρεση τις μακρινές υπερθαλάσσιες περιοχές που η κάλυψη των κεραιών ραντάρ δεν ήταν ακόμα δυνατή λόγω απόστασης. (ΣΗΜ: Σήμερα στον Ευρωπαϊκό χώρο υπάρχει κάλυψη ραντάρ κοντά στο 80% του συνόλου των πτήσεων)
- [6]. Υπολογισμό και διέγερση για επικείμενη απώλεια διαχωρισμού πτήσεων στα επόμενα 2 λεπτά

Το 1990 ήταν μια στιγμή επανεξέτασης της κατάστασης. Η κυκλοφορία συνέχιζε πάντα την ίδια ετήσια αύξησή της με ένα ρυθμό που παρά τον αυτοματισμό κρατούσε την ΕΕΚ σε μόνιμη κατάσταση κορεσμού. Η κατάσταση πλησίασε τα όρια κρίσης περισσότερο στον μικρό Ευρωπαϊκό χώρο. Εξ άλλου οι στατιστικές προέβλεπαν ένα διπλασιασμό της εναέριας κυκλοφορίας στην Ευρώπη κοντά στο 2010. Τότε οι κυριότερες Ευρωπαϊκές χώρες ανέλαβαν την πρωτοβουλία να αναθέσουν στον οργανισμό του [12] την ευθύνη σχεδιασμού νέων συστημάτων που θα έδιναν την ικανότητα στην ΕΕΚ να συνεχίσει την ανάπτυξή της στην εποχή του 2000+ με πρόσθετο σκοπό τη συνολική εναρμόνιση όλων των μεθόδων, συστημάτων και κανονισμών ομοιόμορφα σε όλη την Ευρωπαϊκή έκταση. Το αρχικό σχέδιο το οποίο προέβλεπε όλη αυτή την αναδόμηση ονομάστηκε EATCHIP (European ATC Harmonization Programme). Μεταξύ 1990 και 2000 οι ερευνητές και επιχειρησιακοί της Ευρώπης άρχισαν να σχεδιάζουν τα συστήματα 3ης γενιάς. Παρόμοια βήματα έγιναν και στις ΗΠΑ, αλλά η Ευρώπη εν τω μεταξύ είχε ήδη αναλάβει την πρωτοβουλία και σε πολλά σημεία κέρδισε χρονικά το προβάδισμα.

2.5 Η 3^η γενιά συστημάτων ΕΕΚ

Τα συστήματα αυτά βασίστηκαν στη φιλοσοφία ότι η επίτευξη περισσότερης χωρητικότητας στην εναέρια κυκλοφορία δεν στηρίζονταν στην πρόοδο ορισμένων τεχνικών τομέων μόνο. Χρειάζονταν η παράλληλη ανάπτυξη έστω και σε μικρά ποσοστά όλων ανεξαιρέτως των τομέων. Παράλληλα ερευνήθηκε ο τομέας κόστους και εκεί διαπιστώθηκε ότι η μικρή Ευρώπη, που έχει μάλιστα και μικρά κρατίδια που με μια πτήση διατρέχετε σε λίγα λεπτά, δεν μπορούσε να είναι αποτελεσματική οικονομικά με το να επιτρέπει την ανεξάρτητη και παράλληλη εγκατάσταση συστημάτων ΕΕΚ στο το καθένα από αυτά. Μοιραία λοιπόν συζητήθηκε και η συλλογική αποδοχή κοινών λύσεων και ο διαμοιρασμός του κόστους. Η παρουσία της Ευρωπαϊκής Κοινότητας (ΕΕ) απέτέλεσε παράγοντα-κλειδί τουλάχιστον στη διοικητική προώθηση όλων αυτών των εξελίξεων η οποία ανέλαβε τον ρόλο του νομοθέτη. Έτσι η σε Ευρωπαϊκό επίπεδο ανάπτυξη της ΕΕΚ στην εποχή του 2000 προκάλεσε τη θέσπιση νομοθεσίας της ΕΕ (Single European Sky) η οποία άμεσα επέβαλλε αυτόματες νομοθετικές ρυθμίσεις και στα κράτη μέλη της ενώ ταυτόχρονα προτάθηκε και στα άλλα μη μέλη κράτη που υπάγονταν όμως στο Eurocontrol να ακολουθήσουν τους ίδιους όρους, πράγμα που πρακτικά υιοθετήθηκε.

Εξαίρεση στην ανάπτυξη παρουσίασε μόνο η κατασκευή νέων αεροδρομίων. Λόγω περιβαλλοντικών αναγκών και ελλείψει χώρων, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, η Ευρώπη αποφάσισε να μην κατασκευάσει νέα αεροδρόμια. Αλλά η πτώση του 'τείχους του Βερολίνου, επέτρεψε ειδικά στην Κεντρική Ευρώπη να απαλλαγεί από ένα σοβαρό αριθμό στρατιωτικών βάσεων ή ακόμα και από τη συχνή επιχειρησιακή τους χρήση προσφέροντας έτσι τις εγκαταστάσεις τους και για την πολιτική αεροπορία. Με αυτό τον τρόπο αυξήθηκαν οι αριθμοί των πτήσεων μεταξύ μικρότερων περιφερειακών ή δευτερευόντων στρατιωτικών αεροδρομίων αποσυμφορίζοντας τα μεγαλύτερα κλασσικά μεγάλα αεροδρόμια που έφταναν ήδη τα όρια κορεσμού. Ένας σοβαρός αριθμός 'εταιρειών μικρού κόστους' (low-cost air companies) εκμεταλλεύτηκε σοβαρά αυτήν τη δυνατότητα αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την ΕΕΚ στην Ευρώπη υπερκαλύπτοντας μάλιστα την απουσία μερικών άλλων γνωστών εταιρειών που στο διάστημα αυτό άρχιζαν να εξαφανίζονται.

Τα συστήματα 3ης γενιάς άρχισαν να εμφανίζονται πειραματικά μεταξύ 1996-98 αλλά η ανάπτυξή τους που υποχρεώθηκε να ακολουθεί τους γοργούς τεχνολογικούς ρυθμούς βρέθηκε σε φάση αναθεωρήσεων αρκετά συχνά κερδίζοντας όμως τελικά από τα νέα επιτεύγματα της τεχνολογίας. Στην πρώτη 5ετία του 2000+, τα περισσότερα από αυτά είναι αποκρυσταλλωμένα αναμένοντας τις τελικές αποφάσεις και κονδύλια για την τελική εφαρμογή τους η οποία προβλέπεται μεταξύ 2010-2020 ενώ οι περισσότεροι πρόδρομοί τους έχουν ήδη κάνει την εμφάνισή τους σε μερικά κέντρα ελέγχου.

2.6 Τεχνολογίες της 3^{ης} γενιάς

Σύνδεση Μεταφοράς Δεδομένων μέσω δορυφόρου (DATA Link)

Είναι με απλά λόγια ένα σύστημα SMS σαν κι αυτό που διαθέτει η κινητή τηλεφωνία αλλά ειδικευμένο για την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ ΕΕΚ και πιλότων. Η τεχνολογία δεν είναι διαφορετική κι είναι μάλιστα είναι από τις βασικότερες επικοινωνίες έως σήμερα. Επί χρόνια η μόνη δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας μεταξύ ΕΕΚ-πιλότων ήταν η ραδιοσυχνότητα. Όμως, σε ένα ουρανό γεμάτο από πτήσεις η απλή ανταλλαγή μιας απλής τυπικής φωνητικής επικοινωνίας που επιβεβαιώνει π.χ. την είσοδο σε ένα χώρο θα αρκούσε για να 'μπλοκάρει' για λίγα δευτερόλεπτα την οποιαδήποτε άλλη αναγκαία εκπομπή για κάτι σοβαρότερο. Έτσι, οι ραδιοσυχνότητες θα διατηρηθούν μεν ως μέσο ανταλλαγής άμεσων οδηγιών για μια σοβαρότερη περίπτωση αλλά θα απαλλαγούν από τη συμφόρηση με το να διοχετευτούν οι λιγότερο άμεσες αλλά παρόλα αυτά μεγαλύτερες σε

όγκο και διάρκεια σε ένα άλλο ‘κανάλι’ που ουσιαστικά λειτουργεί ως αποστολέας / δέκτης μηνυμάτων σε κείμενο.

Οι ειδικές διαφορές με τα απλά γνωστά SMS είναι ότι:

- [1]. Η λήψη τους θα ενεργοποιεί ορισμένες λειτουργίες στα συστήματα των ΕΕΚ και στο κόμπιτ των αεροσκαφών ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή δράση των εντολών που περιέχει το σχετικό μήνυμα
- [2]. Θα δίνει τη δυνατότητα ευρύτερης σύνδεσης με ειδικές **βάσεις δεδομένων** και θα μπορεί να λειτουργεί και ως είδος δικτύου ώστε για δευτερεύοντα θέματα πληροφόρησης, ο ΕΕΚ ή ο πιλότος να μην χρειάζεται καθόλου να επικοινωνούν οι ίδιοι (π.χ. για να πληροφορηθεί ένας πιλότος το μέγεθος της ορατότητας στο αεροδρόμιο προορισμού, να ειδοποιηθεί για περιορισμούς διαδρομής κλπ.)

Υπολογίζεται ότι το Data Link θα προσφέρει κάπου 40-60% περισσότερη χωρητικότητα στον τομέα της διάρκειας των επικοινωνιών μεταξύ ΕΕΚ-πιλοτηρίου αλλά δεν είναι όλα τα αεροσκάφη εξοπλισμένα με την συγκεκριμένη τεχνολογία.

Δίκτυο Ραντάρ (RAD-NET Radar Network) και ARTAS (Air Traffic Tracker and Server)

Ένα ειδικευμένο δίκτυο που θα ενώνει όλες τις διαθέσιμες κεραίες ραντάρ στον Ευρωπαϊκό χώρο θα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στον χρήστη. Πολλές φορές τα ραντάρ έχουν περιορισμούς όπως την μειωμένη κάλυψη λόγω φυσικών εμποδίων (βουνά, νεκρούς τομείς) και τη διακοπή της συνεχούς παρακολούθησης των στόχων, με συνέπεια την έλλειψη ακρίβειας στον υπολογισμό θέσης των αεροπλάνων. Με την διασύνδεση πολλών ραντάρ, ακόμα και ραντάρ γειτονικών χωρών, αφενός μεν τα χάσματα κάλυψης μικραίνουν, αφετέρου δε η ακρίβεια υπολογισμού θέσης των στόχων, επιβεβαιωμένη από περισσότερα ραντάρ, γίνεται συνεχής και ακριβέστερη. Το δίκτυο δεν είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει την εικόνα ραντάρ μόνο μιας γειτονικής χώρας αλλά και το ραντάρ μιας άλλης μονάδας (π.χ. στρατιωτικής που καλύπτει τον ίδιο χώρο) ή και το ραντάρ ενός μικρού αεροδρομίου που, αν και δεν ελέγχει, καλύπτει ωστόσο και υψηλότερους στόχους, ή και το αντίστροφο. Το δίκτυο αυτό παρέχει δυνατότητα plug-in για τον χρήστη, δηλαδή να βλέπει οτιδήποτε καλύπτεται από όλους με μια απλή σύνδεση και άρα να διαλέγει να δει τους στόχους της περιοχής που τον ενδιαφέρουν χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η εικόνα αυτή σχηματίζεται από τα δικά του αποκλειστικά ραντάρ.

Φυσικά το σύστημα EEK, όταν πρόκειται για υπολογισμούς πολλαπλών στόχων που αλληλεπικαλύπτονται, υπόκειται να κάνει ένα μεγάλο όγκο υπολογισμών ώστε να φιλτράρει αρχικά τους στόχους που ανήκουν στην ίδια πτήση (επίσημα η διαδικασία αυτή ονομάζεται ‘ιχνηλάτιση’ ή tracking) και στη συνέχεια στην εκτίμηση μιας συνιστώσας μέσης θέσης για το αεροπλάνο. Κανονικά ή διαδικασία αυτή πρέπει να γίνεται από το κάθε σύστημα EEK ξεχωριστά και το ίδιο να επαναλαμβάνεται και τα γειτονικά συστήματα. Για να αποφεύγονται οι καθυστερήσεις αλλά και η αλλαγή ακρίβειας από τα διάφορα λογισμικά που χρησιμοποιούνται εδώ κι εκεί, κατά διαστήματα σε αυτό το δίκτυο τοποθετούνται υπολογιστές (servers) οι οποίοι κάνουν αυτή τη δουλειά για ορισμένες ευρύτερες περιοχές κι από εκεί ο χρήστης παίρνει έτοιμο το αποτέλεσμα. Τα συστήματα αυτά ονομάστηκαν ARTAS δηλαδή είναι ‘ιχνηλάτες’ (Trackers) – **υπολογιστές τροχιών** που τις παρέχουν σε όσους είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο (Servers) αυτό.

Mode-S (Mode Selective)

Στην παραπάνω λειτουργία του tracking τα λογισμικά αναγκάζονται να κάνουν ορισμένες υποθέσεις - παραδοχές για να υπολογίζουν τα περιθώρια λάθους αναφορικά με την θέση ενός αεροπλάνου. Η δυσκολότερη παράμετρος σε αυτό είναι οι επιταχύνσεις στις 3 διαστάσεις και οι ελιγμοί τους οποίους τα λογισμικά αντιλαμβάνονται έμμεσα υπολογίζοντάς τις διαφορές στις απεικονίσεις των θέσεων μεταξύ διαδοχικών ανανεώσεων της εικόνας του ραντάρ. Εντούτοις όλες αυτές οι παράμετροι εμφανίζονται άμεσα στα όργανα ενός πιλότου. Με σκοπό την μετάδοση ορισμένων τέτοιων ειδικών πληροφοριών από το αεροπλάνο απευθείας στο λογισμικό, γίνεται χρήση ενός εκτεταμένου σήματος στα αεροπλάνα μέσω μιας ειδικής συσκευής που λέγεται ερωτο-απαντητής ή αναμεταδότης (transponder) που απαντά με κωδικοποιημένα σήματα σε ορισμένες πληροφορίες που ερωτά το ραντάρ.

Στην στρατιωτική αεροπορία είχε από παλιά υιοθετηθεί με τον όρο IFF (Identification Friend or Foe) η συσκευή αυτή ενώ οι υπηρεσίες EEK ονόμασαν Mode-A και Mode-C αυτές τις ερωτήσεις-απαντήσεις που αφορούσαν αποκλειστικά την ταυτότητα (Mode-A) και το ύψος (Mode-C) μιας πτήσης. Ενώ στις μέρες νομικά δεν υπάρχει αεροπλάνο χωρίς Mode-A και Mode-C, το πρόβλημα με την ταυτότητα (Mode-A), λόγω της παλαιότητας του, είναι η χρήση μόνο 4 ψηφίων(digit) στο οχταδικό αριθμητικό σύστημα για την αναπαράσταση της (από 0000 - 7777) δηλαδή μόνο 4096 ταυτότητες. Μια επέκταση του παρόντος σήματος του για να περιλάβει τα σήματα των νέων πρόσθετων

πληροφοριών έδωσε την ονομασία στον όρο του Mode-S υπό την έννοια ότι οι πληροφορίες μεταβιβάζονται επιλεκτικά (selectively) μεταξύ ερωτητή – απαντητή.

Το σύστημα αυτό μελετήθηκε ήδη από το 1970 αλλά με κύριο σκοπό τη δημιουργία ενός είδους data-link. Στην εποχή του 1990+ κρίθηκε ότι είναι πολύ πιο ακριβό και περίπλοκο από ότι τα αντίστοιχα σήματα μέσω δορυφόρων και τελικά διατηρήθηκε και αναπτύχθηκε για ορισμένες λειτουργίες μόνο. Μια δευτερεύουσα εφαρμογή του είναι η ικανότητα να ξεπεράσει τον μέγιστο αριθμό διαφορετικών ταυτοτήτων των σημερινών Mode-A IFF που φτάνει τις 4096 και που δεν αρκούν για τις σημερινές ανάγκες. Το Mode-S μπορεί να προσφέρει πάνω από 16 εκατομμύρια διαφορετικούς κώδικες οι οποίοι αρκούν ώστε κάθε αεροσκάφος να διαθέτει έναν και μόνο, τον ίδιο συγκεκριμένα, σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Πλέον στις μέρες μας κάθε αεροσκάφος που ίπταται άνω των 10000' ποδιών υποχρεούται να φέρει συσκευή ερωτο-απαντητή (transponder).

Automatic Dependent Surveillance-Broadcast ADS-B

Η αυτόματη εξαρτώμενη Επίβλεψη (ADS-B Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) είναι ένα τεχνολογικό επίτευγμα που κατάφερε να καλύψει τα κενά στα παραπάνω. Ακόμα και τα δίκτυα ραντάρ δεν μπορούν να καλύψουν 100% τον εναέριο χώρο. Οι μεταβλητές που χρειάζονται τα συστήματα EEK βρίσκονται στα συστήματα του αεροπλάνου. Συγκεκριμένα η θέση του αεροπλάνου, είτε αυτή προσδιορίζεται από δορυφορικά συστήματα (GPS) είτε από άλλους αισθητήρες, αναμεταδίδετε περιοδικά σε επίγειους σταθμούς EEK, από το ίδιο το αεροπλάνο βελτιώνοντας την ιχνηλάτισή του. Το ADS-B είναι ένας ράδιο-πομπός που βρίσκεται στο αεροπλάνο και μεταδίδει κάθε δευτερόλεπτο την θέση του, το ύψος και την ταχύτητα. Παρέχει στα συστήματα EEK σε πραγματικό χρόνο την θέση και όλες τις υπόλοιπες πληροφορίες, με περισσότερη ακρίβεια από ότι τα συστήματα ραντάρ, δίνοντας την δυνατότητα για καλύτερο διαχωρισμό των αεροπλάνων. Επιπλέον τα αεροπλάνα έχουν την δυνατότητα λήψης των στοιχείων αυτών και από άλλα κοντινά αεροπλάνα αυξάνοντας την ασφάλεια και τους διαχωρισμούς πιο έγκυρα.

Λόγω του χαμηλού κόστους η εγκατάσταση πολλών επίγειων σταθμών τείνει να αντικαταστήσει τα δευτερεύοντα ραντάρ (**Secondary Radar**). Το μόνο πρόβλημα είναι το νομικό και με τον όρο αυτό εννοούμε ότι η EEK εξαρτάται από ένα σύστημα πτήσης του αεροπλάνου για να της δώσει την ακρίβεια των στοιχείων που της απαιτούνται, εξ ου και ο όρος Εξαρτώμενη Επίβλεψη. Προφανώς θα υπάρξουν ειδικές νομικές ρυθμίσεις για τη

χρήση ενός τέτοιου συστήματος. Παρόλα αυτά ήδη χρησιμοποιείται προαιρετικά και υποχρεωτικά από το 2007 σε όλους τους τύπους αεροσκαφών που ίπτανται στον ανώτερο εναέριο χώρο. Κάποιες χώρες το θεωρούν υποχρεωτικό ειδικά για την είσοδο στον εναέριο χώρο τους όπως η Αυστραλία.

Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS Global Navigation Satellite System)

Το GPS (Global Position System) [13] σήμερα είναι πασίγνωστο κι έχει φτάσει στα χέρια του καθημερινού χρήστη. Η αρχή του στηρίζεται στο γεγονός ότι για να εντοπιστεί μια θέση στον 3διάστατο χώρο χρειάζεται απλά να δοθούν οι αποστάσεις από 3 γνωστά σημεία (αρχή Τριγωνισμού). Φανταστείτε ότι τα 3 σημεία αυτά είναι δορυφόροι και η μέτρηση της απόστασης γίνεται με τη χρονομέτρηση της διαδρομής σημάτων που ξεκινάνε από τους δορυφόρους και φτάνουν στον χρήστη. Αυτό και μόνο αρκεί για τον υπολογισμό της θέσης. Φυσικά ο χρήστης διαθέτει ένα δέκτη εφοδιασμένο με έναν μικρό υπολογιστή που ασχολείται με τη λήψη και τους μαθηματικούς υπολογισμούς πράγμα που κάνει τη χρήση πολύ εύκολη. Υπάρχουν βέβαια και σφάλματα από τη διάδοση των κυμάτων στην ατμόσφαιρα αλλά τελικά η λήψη περισσότερων δορυφόρων προσφέρει, με τους κατάλληλους υπολογισμούς, μια ακόμα πιο ακριβή μέση θέση. Η ακρίβεια ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να κυμανθεί από 100 ως 3-5 μέτρα.

Οι κύριες λειτουργικές προϋποθέσεις για τον χρήστη είναι: α) η δυνατότητα να μπορεί να πιάνει από παντού τουλάχιστον 3 δορυφόρους (Overlay Principle) και β) να του διατίθεται ελεύθερα το σήμα τους μαζί με τυχόν διορθώσεις (Integrity Principle) που προκύπτουν από σφάλματα λόγω ατμόσφαιρας. (ΣΗΜ Αρκετοί εμπορικοί δέκτες GPS για το ευρύ κοινό, μετά περίπου το έτος 2005, έχουν ήδη δυνατότητα λήψης διορθώσεων μέσω του συστήματος WAAS - Wide Area Augmentation System)

Τα δύο προϋπάρχοντα τέτοια συστήματα είχαν όμως εγκατασταθεί για στρατιωτικούς σκοπούς, το GPSS από τις ΗΠΑ και το GLONASS από τη Ρωσία και οι πολίτες είχαν επίτηδες αποστερηθεί από το να έχουν στη διάθεσή τους πάντοτε τη δυνατότητα της ελεύθερης λήψης των σημάτων και της διόρθωσής τους, όσο δε για την κάλυψη, είχε περιοριστεί γύρω από μια ζώνη που κάλυπτε τα «στρατιωτικά ενδιαφέροντα» των κατόχων των συστημάτων. Για αυτό το λόγο, δεν είναι σύστημα που χρησιμοποιείσαι επίσημα από την Πολιτική Αεροναυτιλία και την ΕΕΚ - Ο λόγος δηλαδή είναι κυρίως πολιτικός και διπλωματικός.

Η απόφαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) να κατασκευάσει το πρώτο *Πολιτικό* Σύστημα Παγκόσμιου Δορυφορικού Εντοπισμού - ονομάζεται **GALILEO** - έβαλε τα θεμέλια για τη γενίκευση της χρήσης του από τον απλό πολίτη ως και τον πιλότο, ανοίγοντας μια νέα εποχή. Αν και βέβαια ξεκίνησε από επιθυμία της Πολιτικής Αεροπορίας, εντούτοις η ΕΕ θεωρεί ως κύριο πελάτη της κατά 95% τον καθημερινό πολίτη, ενώ τελικά η Πολιτική Αεροπορία αποτελεί αριθμητικά πολύ μικρό ποσοστό αυτής της πελατείας. Εντούτοις το GALILEO θα αποτελέσει σίγουρα ένα σύστημα που θα ενταχθεί ως απαραίτητη συνιστώσα σε πολλά συστήματα της ΕΕΚ και θα αποτελέσει μόνιμα ένα εξάρτημά της πέραν του 2010+ εποχής. Προς το παρόν (2008) υπάρχουν στο διάστημα 3 δορυφόροι του GALILEO που ασχολούνται με μετρήσεις και διορθώσεις. Όλος ο 'αστερισμός' των 30 δορυφόρων του GALILEO υπολογίζεται να βρίσκεται σε τροχιά το 2009 (ΣΗΜ: πολιτικο-οικονομικοί λόγοι έχουν προς το παρόν αναβάλει τις επόμενες εκτοξεύσεις). Το κόστος του έργου, βασισμένο στη νέα τεχνολογία, είναι σχετικά μικρό και η ΕΕ έχει ήδη προκαταβάλει το ¼ της συνολικής του τιμής, το οποίο ισοδυναμεί μόνο με κάπου 100-150 χιλιόμετρα σιδηροδρομικής γραμμής των νέων ταχέων τρενών τύπου TGV

Παρόλο που τα GPSS - GALILEO, δεν είναι παρά συστήματα ναυτιλίας για τον υπολογισμό θέσης η ύπαρξή τους θα επιτρέψει επίσης και τη σχεδίαση νέων ειδικών διαδρομών και ελιγμών που θα διευκολύνουν τους ανθρώπινους χειρισμούς αλλά θα συμβάλλουν και σε παράλληλη μείωση στην κατανάλωση καυσίμων και εν μέρει του θορύβου στη γειτονία των αεροδρομίων

2.7 Συστήματα Προειδοποίησης ΕΕΚ

Λόγω της αύξησης της κυκλοφορίας αλλά και κυρίως επανασχεδίασης πολλών νέων αεροδιαδρόμων που καλύπτουν πολλές κατευθύνσεις και δεν περνάνε πλέον πάνω από ορισμένα ραδιοβοηθήματα, ο ΕΕΚ έχει δυσκολία στο να προβλέψει νωρίς την πιθανή μελλοντική εμπλοκή της κυκλοφορίας. Στα σημερινά προχωρημένα συστήματα που οι υπολογιστές κυριαρχούν προστέθηκαν σταδιακά ειδικές λειτουργίες που στοχεύουν στο να υποδείξουν έγκαιρα στον ΕΕΚ τον κίνδυνο απώλειας ελέγχου. Ο όρος με τον οποίο περιγράφονται όλα αυτά τα συστήματα στην αγγλική είναι ο Safety Nets (Δίκτυα Διάσωσης) που περιγράφουν εύγλωττα τον λόγο για τον οποίο κατασκευάστηκαν. Μια σύντομη περιγραφή στα κυριότερα από αυτά, θα γίνει στα παρακάτω κεφάλαια.

Ειδοποίηση Εμπλοκής σε Άμεσο Χρόνο (Short Term Conflict Alert)

Είναι ένα ειδικό λογισμικό που σε πραγματικό χρόνο υπολογίζει τη μελλοντική 3διάστατη θέση όλης της κυκλοφορίας, σε διαστήματα των 2 ως 3 επομένων λεπτών και δημιουργεί οπτικό και ακουστικό σήμα υπόδειξης των πτήσεων που βρίσκονται υπό απειλή – μερικά συστήματα προσφέρουν και υπόδειξη ελιγμού αποφυγής. Το σύστημα αυτό το διαθέτουν σήμερα τα 70-80% των Ευρωπαϊκών Κέντρων Ελέγχου.

Ειδοποίηση Εμπλοκής σε Ενδιάμεσο Χρόνο (Medium Term Conflict Detection)

Είναι ένα άλλο λογισμικό που δρα παράλληλα αλλά υπολογίζει την πιθανότητα δημιουργίας εμπλοκής με βάσει τα δεδομένα των πτήσεων που βρίσκονται μακριά ακόμα από τον τομέα ελέγχου και θέλουν κάπου 30 λεπτά για να εισέλθουν σε αυτόν. Ο στόχος αυτού του συστήματος είναι να βοηθήσει το προηγούμενο σύστημα ώστε να μετριαστεί ο αριθμός των συνεγέρσεων αμέσου χρόνου γιατί πέραν ενός σημείου δεν φτάνει ο χρόνος των 2-3 λεπτών για να γίνουν καν ελιγμοί αποφυγής πολλών πτήσεων ταυτόχρονα. Ειδικά σε συνδυασμό με συνεννόηση με τους γειτονικούς τομείς, το σύστημα αυτό επιτρέπει και να αποφευχθούν εντελώς επικίνδυνες συγκλίσεις πολύ προτού οι πτήσεις βρεθούν κοντά στο σημείο επικίνδυνης προσέγγισης. Το σύστημα αυτό το διαθέτουν σήμερα τα 30-40% των Ευρωπαϊκών Κέντρων Ελέγχου

Ειδοποίηση Εμπλοκής σε Απώτερο Χρόνο (Long Term Conflict Detection)

Είναι η παραλλαγή του προηγούμενου συστήματος αλλά για προβλέψεις που φτάνουν τα 60-120 λεπτά πριν τη σύγκλιση. Το σύστημα είναι καθαρά μελλοντικό και σκοπεύει να παίζει ρόλο σε μια εποχή που θα μπορεί να συγκεντρωθεί κάτω από μια σύνθετη εικόνα ραντάρ μια περιοχή έκτασης της τάξης τουλάχιστον των 1000 x 1000 ναυτικών μιλίων. Παρόλο που η λογική είναι πολύ γνωστή το κύριο πρόβλημα βρίσκεται στην παροχή σε πραγματικό χρόνο των πραγματικών, κι όχι προβλεπόμενων, μετεωρολογικών δεδομένων σε όλα τα ύψη, επειδή αυτό, σε 1-2 ώρες, προκαλεί αποκλίσεις στους υπολογισμούς πολύ πέρα του όσο είναι ανεκτές. Έτσι ενώ μια αλλαγή π.χ. κατά 3% στην ταχύτητα ενός σύγχρονου τζετ (μέγιστο ποσοστό ανοχής στην αλλαγή ταχύτητας σε πτήση διαδρομής) σε 1 ώρα δίνει σφάλμα υπολογισμού θέσης κατά 100-140 ναυτικά μίλια, η ανοχή λάθους για την ΕΕΚ είναι της τάξης του 10-20 ναυτικά μίλια. Τα σημερινά συστήματα με τις παραμέτρους που διαθέτουν δεν μπορούν να δώσουν ακόμα ανεκτές ακρίβειες.

Ειδοποίηση Παραβίασης Περιοχής (Area Penetration Warning) και Ειδοποίηση Παραβίασης Ελαχίστων Ύψους Ασφαλείας (Safety Minimum Altitude Warning)

Πολύ παρόμοια λογισμικά σχετικά απλής σχεδίασης. Με τον ορισμό μιας πολυγωνικής περιοχής μαζί με τα ύψη που την ορίζουν, σε πραγματικό χρόνο ελέγχεται η προσέγγιση και προβλεπόμενη διείσδυση πτήσεων που παρακολουθεί ραντάρ σε μια περιοχή που πρέπει να αποφευχθεί οριζόντια είτε/και κατακόρυφα. Όμως σε πολλές περιοχές δεν υπάρχει κάλυψη σε χαμηλά ύψη που πετούν μικρά ιδιωτικά αεροπλάνα εκτός ελέγχου. Τα περισσότερα από αυτά δεν φέρουν συσκευές που να δείχνουν το ύψος τους στο ραντάρ, ενώ σε άλλα σημεία, λόγω λόφων και εμποδίων είναι το ραντάρ που δεν μπορεί να τα παρακολουθήσει. Το σύστημα αυτό το διαθέτουν σήμερα τα 40-60% των Ευρωπαϊκών Κέντρων Ελέγχου

3 Βασικές Εννοιές

Ο ορισμός της τροχιάς ενός κινούμενου αντικειμένου γενικά είναι πολύπλοκος, όπως επίσης και η συλλογή των στοιχείων για την σύνθεσή του. Στην περίπτωση της σύνθεσης τροχιάς ενός αεροσκάφους, οι τεχνολογίες των συστημάτων της 3^{ης} γενιάς των ΕΕΚ μπορούν να αποτελέσουν την πηγή των πρωτογενών πληροφοριών για την αποτύπωση ενός μονοπατιού τροχιάς αεροσκάφους (flight path trajectory). Πληροφορίες, όπως αυτές που προέρχονται από το ADSB, MODE-S σε συνδυασμό με τις συσκευές των GPS των αεροσκαφών, οι οποίες είναι μεν εξαρτώμενες από το αεροσκάφος, εκπέμπουν όμως την θέση του στιγμιαία ανά τακτά χρονικά διαστήματα με μεγάλη ακρίβεια. Τα δίκτυα RADAR και τα συστήματα ARTAS που εκμεταλλεύονται τις πληροφορίες των RADAR και δεν είναι εξαρτώμενες από τα αεροσκάφη, μπορούν επίσης να αποτελέσουν την βάση για την σύνθεση των flight trajectories. Οι πληροφορίες αυτές, ανάλογα με την προέλευση τους παρέχουν επίσης και σημασιολογικά στοιχεία (semantic data) χρήσιμα για τον σχεδιασμό της αποθήκης δεδομένων. Τα σημασιολογικά δεδομένα μπορεί να είναι από τον τύπο του αεροσκάφους μέχρι την εταιρία διαχείρισής του. Πριν την κατασκευή της ΑΔΤ θα πρέπει να οριστούν οι αρχές που διέπουν την έννοια της τροχιάς.

3.1 Ορισμός της τροχιάς πτήσης – Flight Trajectory

Πολλοί είναι οι ορισμοί που αποδίδονται στον προσδιορισμό της τροχιάς. Οι ορισμοί αυτοί πολλές φορές είναι αφηρημένοι (abstract) προσπαθώντας έτσι να αποδοθούν σε κάθε κινούμενο αντικείμενο. Γενικά ένα trajectory ορίζεται ως μία χρονικά διατεταγμένη ακολουθία από γεωγραφικά σημεία. Σύμφωνα με τον Bogorny [14] ένα trajectory T ορίζεται ως $T_i = \langle p_1, p_2, p_3, \dots, p_n \rangle$ όπου κάθε p_i αντιπροσωπεύει ένα σημείο του T . Επιπλέον κάθε σημείο του T ορίζεται αρχικά ως μία πλειάδα τριών γνωρισμάτων όπου το $p = \langle x_i, y_i, t_i \rangle$ και:

- [1]. x_i και y_i είναι οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου
- [2]. t_i αντιπροσωπεύει τον στιγμιαίο χρόνο της θέσης του αντικειμένου
- [3]. Πρέπει να ισχύει ότι $t_1 < t_2 < t_3 \dots < t_n$

Τα δεδομένα τροχιάς που περιέχουν μόνο χώρο – χρονικά δεδομένα ενός κινούμενου αντικειμένου όπως παραπάνω συνήθως ονομάζονται ακατέργαστα (raw trajectories). Συνήθως στο διάνυσμα του κάθε σημείου p_i προστίθεται ένα αναγνωριστικό με το p να ισούται με $\langle id, x_i, y_i, t_i \rangle$. Η προσθήκη του χαρακτηριστικού αυτού, επιτρέπει στις εφαρμογές να αναγνωρίζουν διαφορετικά κινούμενα αντικείμενα μεταξύ τους, προσδίδοντας σε αυτά κάποιο είδος ταυτότητας.

Συνήθως η επεξεργασία ορισμένων τμημάτων στα δεδομένα τροχιάς είναι αρκετή για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα τμήματα ενδιαφέροντος ονομάζονται επεισόδια – episodes (επίσης γνωστά και ως segments ή sub-trajectories). Τα κριτήρια για τον διαχωρισμό των trajectories σε επεισόδια είναι χρονικά διαστήματα, περιοχές ενδιαφέροντος (χωρικά σχήματα) ή σημασιολογικές έννοιες [15]. Για παράδειγμα τα τμήματα, αναλόγως το αντικείμενο μελέτης θα ήταν το μονοπάτι που διαγράφουν κάποια ζώα ημερησίως (χωρικά σχήματα), οι κινήσεις των υπαλλήλων μιας εταιρίας μεταξύ 8:00πμ και 6:00μμ (χρονικά διαστήματα). Ένα τμήμα (segment) μίας τροχιάς πτήσης θα μπορούσε να είναι η άφιξη ενός αεροπλάνου στον προορισμό του ή το διάστημα που ήταν σταθερό ως προς τον ρυθμό ανόδου/καθόδου. Παρόλα αυτά, η τροχιά μιας ολόκληρης πτήσης, από την απογείωση μέχρι την προσγείωση, περιλαμβάνει υπερβολικά μεγάλο αριθμό σημείων p_i αφού μπορεί να διαρκέσει και πάνω από τέσσερις ώρες, καθώς διανύει αποστάσεις που καλύπτουν τεράστιες γεωγραφικές περιοχές. Σε σύγκριση με ένα segment από μετακινήσεις ενός ατόμου εντός μιας αστικής περιοχής ενδιαφέροντος, οι αποστάσεις που διαγράφονται μεταξύ δύο σημείων είναι συγκριτικά τεράστιες. Δύο σημεία μίας τροχιάς που διέγραψε ένας άνθρωπος μπορεί να είναι της τάξεως των 2 έως 5 μέτρων ενώ του αεροσκάφους είναι κάμποσες εκατοντάδες ή και χιλιάδες μέτρα. Ο ορισμός του τμήματος ή επεισοδίου σύμφωνα με [15] είναι πλειάδα τεσσάρων γνωρισμάτων (traj_id, ep_id, type, Sub-trajectory LISTOF position $\langle p_i, \dots, p_j \rangle$) όπου:

- [1]. traj_id: Το αναγνωριστικό της τροχιάς
- [2]. ep_id: Αναγνωριστικό του επεισοδίου (ή τμήματος)
- [3]. type: Ο τύπος του επεισοδίου, ο οποίος είναι και το κριτήριο για τον διαχωρισμό των τμημάτων
- [4]. Sub-trajectory: Το τμήμα της ακατέργαστης τροχιάς που ικανοποιεί το συγκεκριμένο επεισόδιο δηλαδή μία υπό – λίστα των σημείων της αρχικής τροχιάς.

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς θα γίνει η αναλυτική σχεδίαση των αποθηκών δεδομένων τροχιάς ΑΔΤ. Ο παραπάνω ορισμός αποτελεί ένα γενικό πλαίσιο της τροχιάς

βάση του οποίου θα αναλυθεί η κατασκευή τριών μοντέλων ΑΔΤ για την αποθήκευση δεδομένων τροχιάς αεροσκαφών στα επόμενα κεφάλαια.

3.2 Πηγές Δεδομένων

Πηγή δεδομένων της εργασίας αποτέλεσε το δίκτυο OpenSky Network [16]. Το OpenSky Network είναι ένας, μη κερδοσκοπικός οργανισμός με έδρα την Ελβετία, με σκοπό την βελτίωση της διαχείρισης του εναέριου χώρου στους τομείς της ασφάλειας, αποδοτικότητας και τις αξιοπιστίας, προσφέροντας στο κοινό δεδομένα ΕΚ (εναέριας κυκλοφορίας) σε πραγματικό χρόνο, αλλά και ιστορικά. Ο οργανισμός διαθέτει ένα δίκτυο που αποτελείται από χιλιάδες αισθητήρες (ADS-B και MODE-S) οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μέσω του κοινού Internet, από εθελοντές, εταιρίες και ακαδημαϊκές ή κυβερνητικές οργανώσεις προσφέροντας μεγάλο όγκο δεδομένων σε ερευνητές και εταιρίες. Ο μεγάλος αριθμός από ακατέργαστα δεδομένα (raw data) που παράγεται από το σύνολο των αισθητήρων, παρέχει σε πραγματικό χρόνο εναέρια κυκλοφορία. Εν συνεχεία τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται σε τεράστιες βάσεις δεδομένων δημιουργώντας μεγάλο όγκο ιστορικών δεδομένων. Η χρήση των ιστορικών δεδομένων προσφέρεται προς όφελος της βελτίωσης και ανάλυσης των τεχνολογιών της ΕΚΚ, κυρίως σε ερευνητικές κοινότητες.

Το OpenSky ξεκίνησε ως ερευνητικό πρότζεκτ το 2012 μεταξύ της πολεμικής αεροπορίας της Ελβετίας, του πανεπιστημίου του Kaiserslautern (Γερμανία) και του πανεπιστημίου της Οξφόρδης (Ηνωμένο Βασίλειο). Από το 2015 και έπειτα είναι ένα ανεξάρτητο σωματείο με συνεχής ανάπτυξη και διασύνδεση με αυξανόμενο ρυθμό χιλιάδων αισθητήρων έχοντας παγκόσμια εμβέλεια κάλυψης.

Το OpenSky θα αποτελέσει και την πηγή των δεδομένων την κατασκευή των αποθηκών δεδομένων. Τα δεδομένα στα οποία βασίστηκε η κατασκευή των αποθηκών δεδομένων αφορούν 335 πτήσεις από Φρανκφούρτη προς Αθήνα από το 2017 έως το 2022. Ο μέσος όρος των καταγεγραμμένων σημείων για την κάθε πτήση είναι περίπου 7000 σημεία τα οποία συνθέτουν τις τροχιές τους.

MODE-S και ADSB

Το ADS-B (Εικόνα 3-1) είναι ένα σύστημα παρακολούθησης της εναέριας κυκλοφορίας που επιτρέπει στα αεροσκάφη να εκπέμπουν πληροφορίες σχετικά με τη θέση, την ταχύτητα, και το ύψος τους, καθώς και άλλες πληροφορίες πτήσης, σε πραγματικό χρόνο.

Τα χαρακτηριστικά του ADS-B είναι:

- [1]. **Automatic:** Οι πληροφορίες μεταδίδονται αυτόματα χωρίς παρέμβαση του πιλότου.
- [2]. **Dependent:** Το σύστημα βασίζεται στο **GNSS** (Global Navigation Satellite System) για τον υπολογισμό της θέσης.
- [3]. **Surveillance:** Χρησιμοποιείται για την επιτήρηση της εναέριας κυκλοφορίας.
- [4]. **Broadcast:** Οι πληροφορίες μεταδίδονται δημόσια και μπορούν να γίνουν λήψη από άλλα αεροσκάφη, σταθμούς στο έδαφος και δορυφόρους.

Το **ADS-B Out** εκπέμπει δεδομένα σε άλλους σταθμούς, ενώ το **ADS-B In** λαμβάνει δεδομένα από άλλα αεροσκάφη και σταθμούς, επιτρέποντας την ενημέρωση του πληρώματος για την κυκλοφορία γύρω από το αεροσκάφος.

Το **Mode-S (Mode Selective)** είναι ένα ραντάρ δευτερογενούς επιτήρησης που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ των αεροσκαφών και των σταθμών στο έδαφος. Είναι πιο εξελιγμένο από τα παλαιότερα συστήματα (Mode-A/C), καθώς επιτρέπει την ανταλλαγή περισσότερων πληροφοριών και την αποφυγή παρεμβολών. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- [1]. **Επιλογή Αεροσκάφους:** Το Mode-S επιτρέπει την επιλεκτική επικοινωνία με συγκεκριμένα αεροσκάφη μέσω ενός μοναδικού **ICAO 24-bit** κωδικού, που έχει κάθε αεροσκάφος.
- [2]. **Μετάδοση Δεδομένων:** Μεταδίδει πληροφορίες όπως το ύψος, την ταχύτητα και την ταυτότητα του αεροσκάφους.
- [3]. **Ενσωμάτωση με ADS-B:** Το Mode-S χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με το ADS-B για την παροχή ακριβών και αξιόπιστων δεδομένων παρακολούθησης.

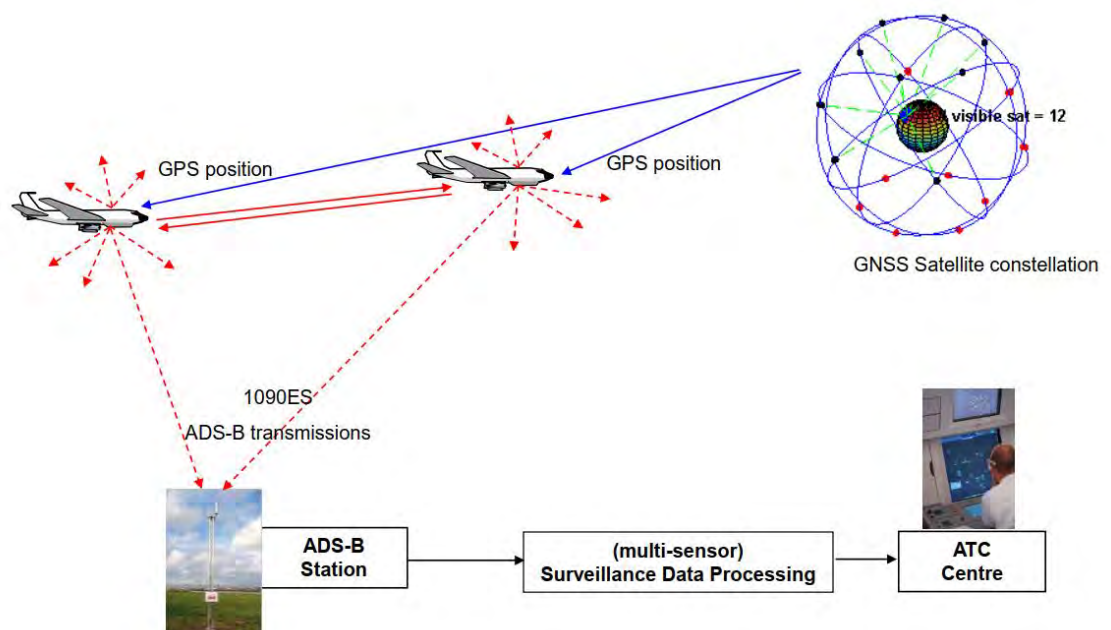
Βασικές Διαφορές

Το **ADS-B** εκπέμπει συνεχώς τη θέση του αεροσκάφους και άλλες πληροφορίες σε όλους, συμπεριλαμβανομένων άλλων αεροσκαφών και επίγειων σταθμών. Από την άλλη το **Mode-S** χρησιμοποιείται κυρίως από ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας για την επικοινωνία και την αναγνώριση συγκεκριμένων αεροσκαφών μέσω ενός ραντάρ. Και τα δύο συστήματα αποτελούν βασικά κομμάτια της σύγχρονης εναέριας κυκλοφορίας, εξασφαλίζοντας ασφαλέστερες και πιο αποτελεσματικές πτήσεις. Τα δεδομένα από το δίκτυο

OpenSky που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τις πληροφορίες ADS-B, από τους διάφορους αισθητήρες που διαθέτει αυτό το δίκτυο.

Οι συσκευές που είναι τοποθετημένες στο αεροπλάνο όπως αυτές των MODE-S και ADS-B μπορούν να διαθέσουν δεδομένα για την σύνθεση τροχιών πτήσεων. Οι συσκευές αυτές εκπέμπουν την ταυτότητα του αεροσκάφους **ICAO-24**, τον στιγμιαίο χρόνο, το ύψος, την θέση, την πορεία (σε μοίρες) και τον ρυθμό ανόδου/καθόδου. Η εκπομπές αναμεταδίδονται broadcast μόνο από τα πολιτικά αεροσκάφη. Η λήψη των εκπομπών γίνεται εκτός από επίγειους, και από δορυφορικούς δέκτες. Η ακρίβεια των δεδομένων στηρίζεται στο ότι το αεροσκάφος θα πρέπει να είναι εξοπλισμένο με το συγκεκριμένο σύστημα. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται αυτόματα από τα ηλεκτρονικά συστήματα του αεροσκάφους σχεδόν χωρίς να παρέχουν αναληθείς στοιχεία τροφοδότησης. Οι τελικές πληροφορίες αποτελούνται από μία πλειάδα εφτά γνωρισμάτων που διαμορφώνουν το σημείο $p = \langle \text{timestamp, aircraft_id, alt, spd, hdg, lat, long} \rangle$ όπου:

- [1]. timestamp: ο στιγμιαίος χρόνος που έγινε εκπομπή του σημείου
- [2]. alt: Ύψος του σημείου την συγκεκριμένη θέση
- [3]. spd: Ταχύτητα στο συγκεκριμένο σημείο
- [4]. hdg: Πορεία που είχε το αεροσκάφος στο συγκεκριμένο σημείο σε μοίρες σε σχέση με τον μαγνητικό βορρά
- [5]. lat/long: Γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου



Εικόνα 3-1: ADS-B Surveillance Principle

Εξαγωγή, Μετασχηματισμός, Καθάρισμα και φόρτωση των δεδομένων

Για την εξαγωγή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη της python με το όνομα Traffic [17]. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη παρέχει πρόσβαση σε διάφορες πηγές του OpenSky network καθιστώντας την μία χρήσιμη διεπαφή. Με την χρήση της βιβλιοθήκης Traffic έγινε το κατέβασμα των δεδομένων από το δίκτυο OpenSky. Η αξιοποίηση των μεθόδων επεξεργασίας που διαθέτει δύναται για καθαρισμό (clean), φιλτράρισμα(filter) κόψιμο(clip) ή και ομαλοποίηση (resample).

Η βιβλιοθήκη traffic είναι ανοιχτού λογισμικού (open source) και προσφέρει τις παρακάτω δυνατότητες:

- [1].Αναλυτές (parsers) σε πηγές δεδομένων που σχετίζονται με τη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας (ATM), συμπεριλαμβανομένων του εργαλείου λήψης ιστορικών δεδομένων από το κέλυφος OpenSky Impala.
- [2].Περιλαμβάνει μια δηλωτική γραμματική για την επεξεργασία τροχιών, συμπεριλαμβανομένης της επαναδειγματοληψίας (resample), του φιλτραρίσματος ελαττωματικών δεδομένων(filtering), προβολή, αναζήτηση, διασταύρωση με βάση διάφορα κριτήρια.
- [3].Εξαγωγή αποτελεσμάτων σε κοινά εργαλεία οπτικοποίησης όπως το Matplotlib και το Altair [24], ή Cartopy, Google Earth, Leaflet και Cesium για γεωχωρικά δεδομένα (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**).



Εικόνα 3-2: Τροχιές Αεροσκαφών ενός μήνα

4 Αποθήκες Δεδομένων Τροχιάς

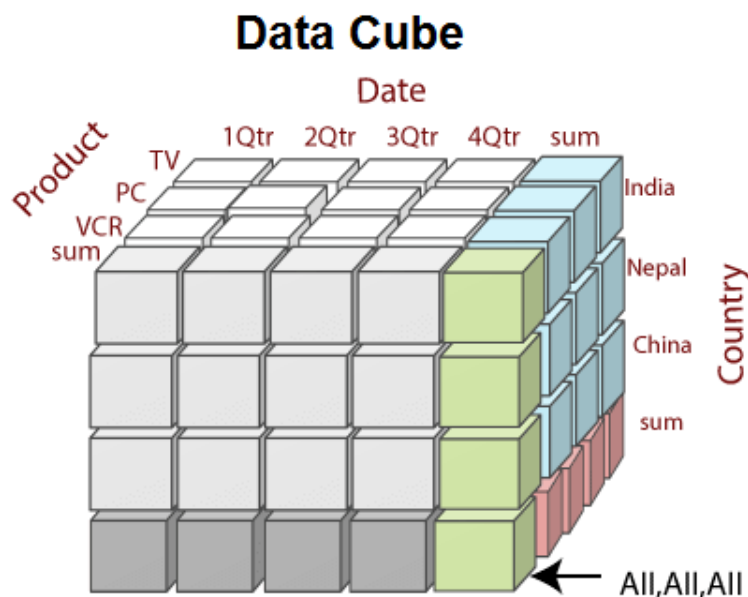
Η αποθήκη δεδομένων ΑΔ (Data Warehouse, DW) είναι μια βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται για εξαγωγή αναφορών (reports) και για ανάλυση των δεδομένων προς όφελος λήψης επιχειρησιακών κρίσιμων αποφάσεων. Ο σκοπός της ανάπτυξής τους ήταν η ανεπάρκεια των μεθόδων επεξεργασίας συναλλαγών με άμεση επικοινωνία (OLTP ή Online Transactional Processing) των βάσεων δεδομένων στην ανάλυση του συνόλου των δεδομένων και εξαγωγή επιχειρησιακών αποφάσεων. Οι αποθήκες δεδομένων, οι ανάγκες των οποίων προέκυψαν την δεκαετία του 90, σε σχέση με τις βάσεις δεδομένων είναι προσανατολισμένες σε ένα θέμα – γεγονός (fact), παρουσιάζουν ολοκλήρωση και διατηρούν ιστορικά στοιχεία. Τα δεδομένα στην ΑΔ αναλύονται με διαδικασίες όπως η Online Analytical Process (OLAP) που σε σχέση με την OLTP αποτελούν πρακτικά μεθόδους εξόρυξης δεδομένων.

Η ανάγκη για αποθήκευση και διαχείριση χώρο - χρονικών δεδομένων που σχετίζονται με την τροχιά που διένυσε ένα κινούμενο αντικείμενο, οδήγησε στην δημιουργία των αποθηκών δεδομένων τροχιάς ΑΔΤ ή **Trajectory Data Warehouse**. Η λήψη πληροφοριών από αισθητήρες αεροσκαφών όπως του ADS-B και MODE-S θα μπορούσαν να αποτελέσουν κομμάτι των δεδομένων για την σύνθεση μίας τροχιάς (trajectory) σε μία αποθήκη δεδομένων. Η σύνθεση των trajectories μπορεί επίσης να δομηθεί από τα δίκτυα RADAR καθώς και τα συστήματα ARTAS (Air Traffic Tracker and Server). Οι αποθήκες δεδομένων τροχιάς μπορούν να βοηθήσουν τις υπηρεσίες ΕΕΚ να προβλέψουν ή να αναλύσουν τις επιχειρησιακές τους απαιτήσεις καλύτερα. Προβλέψεις όπως, η ποσοστιαία στελέχωση, οπτικοποίηση και ομαδοποίηση (clustering) χρήσης των αεροδιαδρόμων και πολλά άλλα θα μπορούσαν να επιτευχθούν με διαδικασίες όπως της OLAP και της εξόρυξης των δεδομένων. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει προσπάθειά διατύπωσης των κανόνων που διέπουν μία αποθήκη δεδομένων τροχιάς καθώς και η θεωρητική πρόταση τριών λογικών μοντέλων, για το σχεδιασμό μιας τέτοιας αποθήκης με προσανατολισμό στην αποθήκευση ιστορικών δεδομένων από τροχιές αεροσκαφών πολιτικής αεροπορίας.

4.1 Πολυδιάστατα μοντέλα δεδομένων

Οι αποθήκες δεδομένων βασίζονται στο πολυδιάστατο μοντέλο δεδομένων (multidimensional data model) που αναπαριστά τα δεδομένα με τη μορφή ενός κύβου δεδομένων (data cube) Εικόνα 4-1. Ο κύβος δεδομένων (data cube) επιτρέπει τη μοντελοποίηση και τη θεώρηση των δεδομένων από πολλές οπτικές γωνίες – διαστάσεις (dimensions). Τα πολυδιάστατα μοντέλα δεδομένων είναι οι δομές δεδομένων που είναι διαθέσιμες στους τελικούς χρήστες για αναζήτηση και ανάλυση των δεδομένων. Η φόρτωσή των δεδομένων γίνεται μέσω της διαδικασίας – ροής ETL (Extract Transform Load). Η διαδικασία ETL καταλήγει με τη φόρτωση δεδομένων στα μοντέλα διαστάσεων δεδομένων του στόχου. Κάθε μοντέλο δεδομένων διαστάσεων είναι κατασκευασμένο με έναν πίνακα πληροφοριών (γεγονός) που περιβάλλεται από πίνακες πολλαπλών διαστάσεων. Τα παρακάτω βήματα περιγράφουν με απόλυτη σειρά το σχεδιασμό ενός πολυδιάστατου μοντέλου δεδομένων.

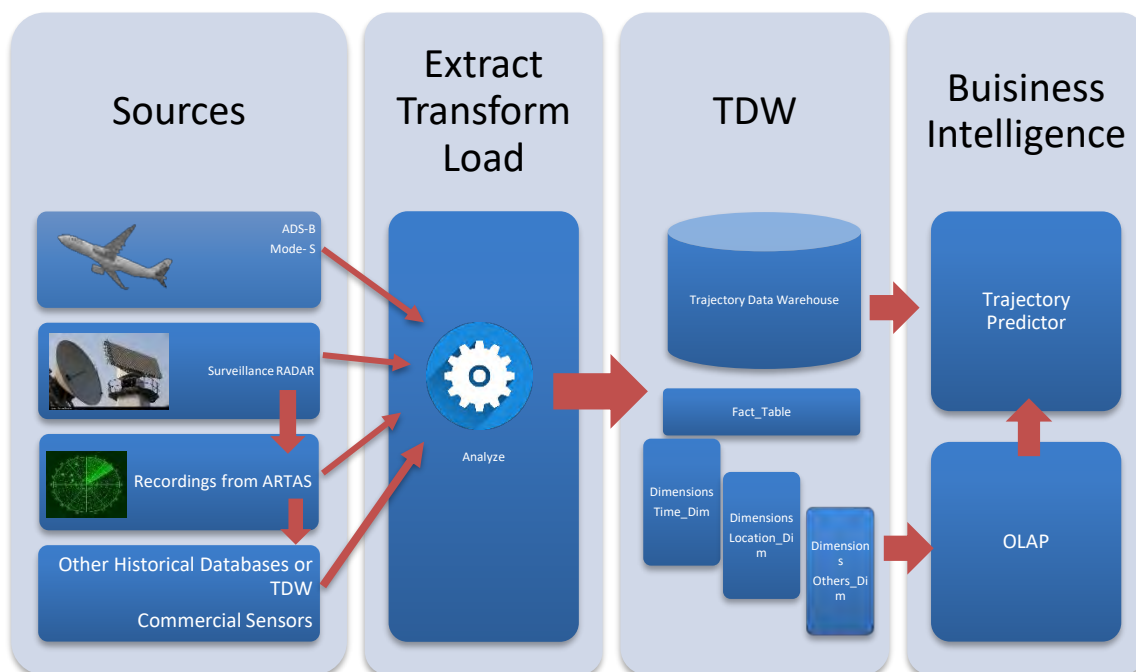
- [1]. Συγκέντρωση και Ανάλυση επιχειρησιακών απαιτήσεων (Business requirements Gathering and Analysis)
- [2]. Προσδιορισμός του επιπέδου διαβάθμισης (Granularity)
- [3]. Εύρεση των διαστάσεων – τους τύπους, τα γνωρίσματα και τις ιεραρχίες τους.
- [4]. Προσδιορισμός του πίνακα γεγονότων των γνωρισμάτων και των μετρήσεων τους.



Εικόνα 4-1: Κύβος OLAP Αποθήκης Δεδομένων [18]

Για συγκεκριμένες τιμές στις διαστάσεις μια Μέτρηση (Measure) βοηθά στην διεξαγωγή συμπερασμάτων του στόχου.

Τα παραπάνω βήματα εξυπηρετούν στην δημιουργία της δομής της αποθήκης δεδομένων και των περιφερειακών πινάκων, πίνακες μιας βάσης δηλαδή, οι οποίοι αποκαλούνται διαστάσεις (dimensions) και του πίνακα των γεγονότων (fact table). Οι διαστάσεις, όπως αναλύονται και παρακάτω, μας δίνουν τα στοιχεία ενός γεγονότος που αποτυπώνεται στον πίνακα γεγονότων (Fact Table). Τα στοιχεία των διαστάσεων μπορούν να περιγράψουν το πότε και που έγινε ένα γεγονός. Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα αποτυπώνεται στην Εικόνα 4-2 η διαδικασία σχεδίασης ενός πολυδιάστατου μοντέλου για την ανάπτυξη του συστήματος πρόβλεψης της τροχιάς των αεροσκαφών.



Εικόνα 4-2: Τα 4 βασικά βήματα για την σχεδίαση της αποθήκης δεδομένων

4.2 Πίνακες διαστάσεων

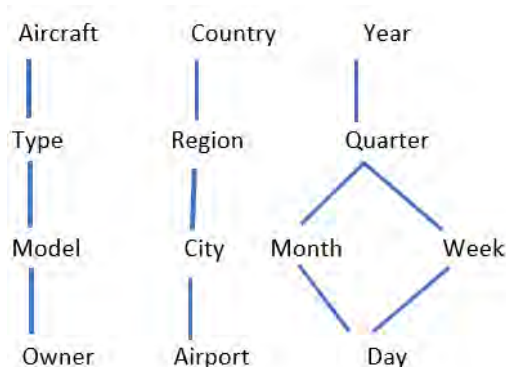
Οι πίνακες διαστάσεων αποτελούν τον πυρήνα της μοντελοποίησης παρέχοντας δομημένες πληροφορίες σε διαφορετικές μετρικές. Κάθε γεγονός περιλαμβάνει ένα σύνολο από διαστάσεις, που ορίζουν το βαθμό λεπτομέρειας του γεγονότος. Το μεγαλύτερο επίπεδο λεπτομέρειας για τα δεδομένα που αναπαρίστανται το συναντάμε στα πρατήρια δεδομένων (Data-Marts). Κάθε ένα πρατήριο δεδομένων αποτελεί ένα υποσύνολο της ΑΔ.

Οι διαστάσεις είναι τα χαρακτηριστικά των γεγονότων ή πιο απλά τα κριτήρια με τα οποία θέλουμε να αναλυθεί η πληροφορία. Ο χρόνος για παράδειγμα αποτελεί μία διάσταση – χαρακτηριστικό που δηλώνει το πότε συνέβη ένα γεγονός, όπως για παράδειγμα η χρονική στιγμή που καταγράφηκε ένα σημείο μιας τροχιάς. Με την ανάκληση μιας τροχιάς ενός κινούμενου αντικειμένου, από μία αποθήκη δεδομένων, θα θέλαμε να γνωρίζουμε κάποια χαρακτηριστικά όπως τον τύπο του αεροσκάφους και τη γεωγραφική περιοχή. Αυτά τα χαρακτηριστικά που συνοδεύουν την περιγραφή του θέματος στην αποθήκη δεδομένων λέγονται διαστάσεις. Για παράδειγμα τα χαρακτηριστικά ενός αεροπλάνου είναι ο τύπος του, η ταυτότητά του, ο αριθμός των κινητήρων.

Οι διαστάσεις είναι συλλογές πληροφοριών αναφοράς σχετικά με τα γεγονότα σε μια αποθήκη δεδομένων. Οι διαστάσεις κατηγοριοποιούν και περιγράφουν τα γεγονότα που καταγράφονται σε μια αποθήκη δεδομένων για να παρέχουν ουσιαστικές, κατηγοριοποιημένες και περιγραφικές απαντήσεις σε επιχειρηματικές ερωτήσεις. Στο σχεδιασμό μιας αποθήκης δεδομένων, είναι σύνηθες να δημιουργούνται πρώτα πίνακες διαστάσεων και στη συνέχεια να δημιουργούνται πίνακες γεγονότων συνδέοντάς τους με τους πίνακες διαστάσεων μέσω ξένων κλειδιών.

4.2.1 Ιεραρχία Διαστάσεων

Οι διαστάσεις παίρνουν τιμές από διαφορετικά επίπεδα που ονομάζονται ιεραρχίες και έχουν δένδροειδείς μορφή. Η εννοιολογική Ιεραρχία εκφράζει διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας. Στην Εικόνα 4-3 απεικονίζεται μία εννοιολογική ιεραρχία (Concept Hierarchy) για κατηγοριοποίησή της τοποθεσίας, αεροσκάφους, αεροδρομίου και μία ιεραρχία χρονική.



Εικόνα 4-3: Εννοιολογικές Ιεραρχίες

Συνήθως, οι διαστάσεις σε μια αποθήκη δεδομένων οργανώνονται εσωτερικά σε μία ή περισσότερες ιεραρχίες. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω παράδειγμα οι Ημέρες (ομαδοποιούνται) σε Μήνες ή Εβδομάδες (οι οποίοι ομαδοποιούνται) σε Έτη κ.ο.κ.

4.2.2 Διαστάσεις της αποθήκης δεδομένων

Για την δημιουργία των κατάλληλων πινάκων διαστάσεων θα πρέπει να ορίσουμε τον κατάλληλο βαθμό λεπτομέρειας. Η κάθε καταγραφή στον πίνακα γεγονότων θα πρέπει να συνδέεται με τις διαστάσεις. Οι διαστάσεις και των τριών μοντέλων θα είναι ο χρόνος, το αεροδρόμιο αναχώρησης και προορισμού, ο εναέριος χώρος, ο τύπος του αεροσκάφους και μια ειδική διάσταση της ταυτότητας της τροχιάς. Με γνώμονα αυτά τα κριτήρια θα σχεδιαστούν οι διαστάσεις της αποθήκης δεδομένων.

4.2.3 Η διάσταση του Χρόνου

Η διάσταση του χρόνου είναι ο πίνακας στον οποίο αποτυπώνεται ο χρόνος και οι ημερομηνίες. Η κάθε εγγραφή στον πίνακα είναι μοναδική. Τα γνωρίσματα που περιγράφουν τον χρόνο είναι, πέραν της μοναδικής χρονοσφραγίδας (timestamp: πλήρης αποτύπωση της ημερομηνίας και της ώρας π.χ 28-07-25 16:01:34), τα παρακάτω:

- [1]. **Time_Id**: (bigint) -> Το πρωτεύον κλειδί του πίνακα της διάστασης του χρόνου
- [2]. **Full_Date**: (timestamp) -> Μοναδική χρονοσφραγίδα της ημερομηνίας και ώρας της συγκεκριμένης εγγραφής στον πίνακα
- [3]. **Year**: (integer) -> Έτος
- [4]. **Quarter**: (integer) -> Το τετράμηνο του χρονολογικού έτους
- [5]. **Month**: (integer) -> Ο μήνας του έτους
- [6]. **Day**: (integer) -> Η ημέρα του μήνα
- [7]. **Hour**: (integer) -> Η ώρα της ημέρας
- [8]. **Minute**: (integer) -> Τα λεπτά της ώρας
- [9]. **Second**: (integer) -> Τα δευτερόλεπτα της ώρας

Στον Πίνακα 4-1. φαίνεται η διάσταση του χρόνου και αντίστοιχα στον Κώδικα 4-1, σε γλώσσα SQL, την δημιουργία του πίνακα της διάστασης. Ο Κώδικας 4-2 είναι μία βοηθητική ακολουθία sequence, όπως ονομάζονται τέτοιου είδους ερωτήματα, για την εισαγωγή ή και επέκταση νέων εγγραφών στην διάσταση του Χρόνου.

```
CREATE TABLE time_dimension (
  time_key NUMBER(10) primary key,
  date_value date,
  year NUMBER(4),
  quarter NUMBER(1),
  month_of_year NUMBER(2),
  day_of_month NUMBER(2),
  day_of_week VARCHAR2(10),
  week_of_year NUMBER(2),
  hour NUMBER(2),
  minute NUMBER(2),
  second NUMBER(2)
);
```

Κώδικας 4-1: Δημιουργία της διάστασης του χρόνου

```
INSERT INTO time_dimension (full_date, year, quarter, month, day, hour, minute, second)
WITH dates AS (
  SELECT
    '2017-03-01 00:00:00'::timestamp + (i || ' second')::interval AS full_date
  FROM generate_series(0, (extract(epoch from timestamp '2017-06-30 23:59:59') - ex-
    tract(epoch from timestamp '2017-03-01 00:00:00'))) AS i
)
SELECT
  full_date,
  date_part('year', full_date) AS year,
  date_part('quarter', full_date) AS quarter,
  date_part('month', full_date) AS month,
  date_part('day', full_date) AS day,
  date_part('hour', full_date) AS hour,
  date_part('minute', full_date) AS minute,
  date_part('second', full_date) AS second
FROM dates;
```

Κώδικας 4-2: Εισαγωγή εγγραφών στην διάσταση του χρόνου.

Time Dim
Time_Id
Full_date
Year
Quarter
Month
Day
Hour
Minute
Second

Πίνακας 4-1: Διάσταση του χρόνου

Πίνακας 4-2: Στιγμιότυπο της διάστασης του χρόνου στην αποθήκη δεδομένων

Time_id	Full_date	Year	Quarter	Month	Day	Hour	Minute	Second
1	1/1/2017 0:00:00	2017	1	1	1	0	0	0
2	1/1/2017 0:00:01	2017	1	1	1	0	0	1
3	1/1/2017 0:00:02	2017	1	1	1	0	0	2
4	1/1/2017 0:00:03	2017	1	1	1	0	0	3
5	1/1/2017 0:00:04	2017	1	1	1	0	0	4
6	1/1/2017 0:00:05	2017	1	1	1	0	0	5
7	1/1/2017 0:00:06	2017	1	1	1	0	0	6
8	1/1/2017 0:00:07	2017	1	1	1	0	0	7
9	1/1/2017 0:00:08	2017	1	1	1	0	0	8
10	1/1/2017 0:00:09	2017	1	1	1	0	0	9
11	1/1/2017 0:00:10	2017	1	1	1	0	0	10
12	1/1/2017 0:00:11	2017	1	1	1	0	0	11
13	1/1/2017 0:00:12	2017	1	1	1	0	0	12
14	1/1/2017 0:00:13	2017	1	1	1	0	0	13
15	1/1/2017 0:00:14	2017	1	1	1	0	0	14

4.2.4 Η διάσταση των Αεροδρομίων

Τα αεροδρόμια είναι οι βάσεις των επιβατικών και μη αεροσκαφών, συνεπώς και όλων των αερογραμμών. Αποτελούν τις αφετηρίες και τους τερματικούς σταθμούς για όλες τις πτήσεις. Όταν θέλουμε να περιγράψουμε μία πτήση δεν γίνεται να μην γίνει αναφορά στο αεροδρόμιο αναχώρησης και προορισμού. Η διάσταση των αεροδρομίων αποσκοπεί στην αποτύπωση ενός γεωχωρικού δεδομένου, τύπου σημείου Point, που θα καθορίζει την αρχή και το τέλος ενός trajectory. Η διάσταση των Αεροδρομίων περιέχει 74448 εγγραφές, με όλα τα καταγεγραμμένα αεροδρόμια παγκοσμίως. Τα δεδομένα των αεροδρομίων είναι από την πλατφόρμα OpenSky και η αρχική τους μορφή ήταν ένα αρχείο τύπου csv (comma separated value). Το αρχείο έπειτα μετατράπηκε σε εγγραφές στην διάσταση των Αεροδρομίων στην ΑΔ. Το βασικό χαρακτηριστικό κάθε Αεροδρομίου είναι ο μοναδικός κωδικός icao-code αποτελούμενος από τέσσερις χαρακτήρες από γράμματα του αγγλικού αλφάβητου. Η ανάθεση τους έχει γίνει από τον παγκόσμιο οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας στο σχετικό έντυπο [19] “ICAO (International Civil Air Organization) Doc 7910”. Κατά τον ICAO ο πρώτος και ο δεύτερος χαρακτήρας κάθε κωδικού υποδηλώνει την χώρα, με βάση κάποια αντιστοιχία, ενώ οι υπόλοιποι χαρακτήρες αντιστοιχούνται από την κάθε χώρα, ανάλογα τα γεωγραφικά της σύνορα, σε μοναδικό αεροδρόμιο. Το αεροδρόμιο της Αθήνας για παράδειγμα έχει όνομα Ελευθέριος Βενιζέλος και μοναδικό κωδικό LGAV όπου ο κωδικός LG κατά αντιστοιχία έχει εκχωρηθεί στην χώρα Ελλάδα,

καθώς και σε όλα τα αεροδρόμια εντός της επικράτειας της Ελλάδος περιέχουν στα αρχικά τους τα γράμματα [LG]. Ο κωδικός κάθε αεροδρομίου συμπληρώνεται κατά την διάρκεια της υποβολής των σχεδίων πτήσεων στα πεδία αεροδρόμιο αναχώρησης και αεροδρόμιο προορισμού. Με αυτόν τον τρόπο οι ΕΕΚ ξέρουν τον προορισμό του κάθε αεροπλάνου. Βασικό χαρακτηριστικό είναι επίσης και οι συντεταγμένες του κάθε αεροδρομίου. Τα πλήρη χαρακτηριστικά των Αεροδρομίων αναγράφονται παρακάτω:

[1].Airport_Id -> Το πρωτεύον κλειδί του πίνακα

[2].IATA -> Κωδικός αναφοράς αεροδρομίου (Όχι βάση ICAO).

[3].ICAO – 4ψήφιος κωδικός αεροδρομίου – Μοναδικός κωδικός που έχει ανατεθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας.

[4].Airport_position -> Γνώρισμα τύπου Geometry Point. Αποτελείται από ένα σημείο στο χώρο το οποίο περιλαμβάνει γεωγραφικό μήκος και πλάτος του αεροδρομίου

[5].Country ->Χώρα στην οποία βρίσκεται το αεροδρόμιο

[6].Altitude -> Υψόμετρο του αεροδρομίου

[7].Name – Όνομα Α/Δ – Το όνομα του αεροδρομίου σε απλό κείμενο (π.χ Ελευθέριος Βενιζέλος)

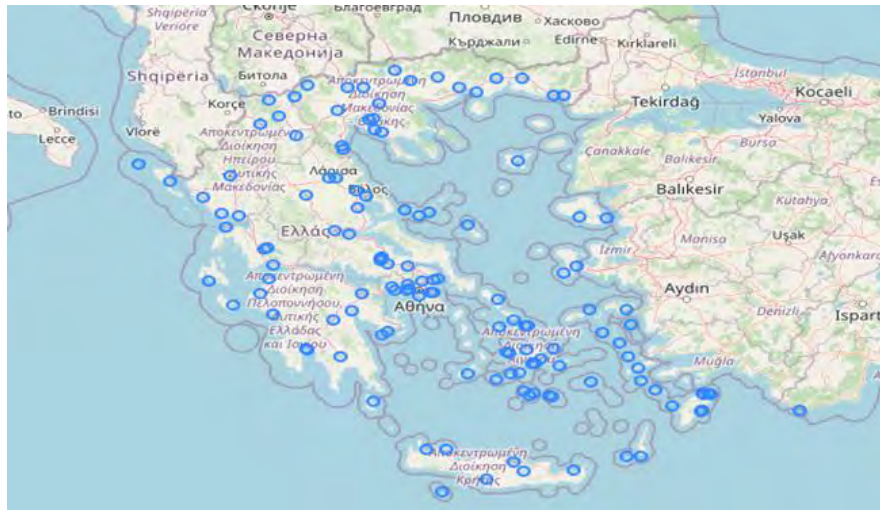
[8].Type – Τύπος Α/Δ (Heliport or Aerodrome)

Municipality -> – Ευρύτερη περιφέρεια που εξυπηρετεί, πόλη στην οποία βρίσκεται κοντά το αεροδρόμιο

Πίνακας 4-3: Στιγμιότυπο της διάστασης των αεροδρομίων

Airport_Id	Name	IATA	ICAO	Country	Altitude	Municipality	Type
63343	Olimboi Airport	NULL	LG56	Greece	656	Chios Island;	small_airport
63344	Andravida Air Base	PYR	LGAD	Greece	55	Andravida;	medium_airport
63345	Agrinion Air Base	NULL	LGAG	Greece	154	Agrinion;	closed
63346	Alexandroupoli Democritus Airport	AXD	LGAL	Greece	24	Alexandroupolis;	medium_airport
63347	Amphiali Heliport	NULL	LGAM	Greece	43	Salamis Island;	heliport
63348	Athens Hellenikon International Airport	NULL	LGAT	Greece	69	Athens;	closed
63349	Athens Eleftherios Venizelos International Airport	ATH	LGAV	Greece	308	Athens;	large_airport
63350	Alexandria Airport	NULL	LGAX	Greece	27	Alexandria;	small_airport
63351	Nea Anchialos National Airport	VOL	LGBL	Greece	83	Nea Anchialos;	medium_airport

Ο Πίνακας 4-3 είναι ένα στιγμιότυπο των εγγραφών (με φίλτρο where country='Greece') των Ελληνικών αεροδρομίων. Η Εικόνα 4-4 αποτυπώνει σε χάρτη το γνώρισμα τύπου Point Airport_position, των Ελληνικών αεροδρομίων. Η αποτύπωση έγινε με το σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων PostgreSQL.



Εικόνα 4-4: Απεικόνιση των αεροδρομίων σε χάρτη

Airport
Airport_Id
Name
IATA
ICAO
Airport_position
Country
Altitude
Municipality
Type

Πίνακας 4-4: Διάσταση των αεροδρομίων

4.2.5 Η διάσταση των Αεροσκαφών

Η διάσταση των αεροσκαφών είναι το σύνολο των δεδομένων για πάνω από 469.000 διαφορετικά αεροσκάφη, με τα στοιχεία που τα περιγράφουν. Τα δεδομένα των αεροσκαφών προέρχονται από την βιβλιοθήκη του OpenSky. Όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, μοναδικό χαρακτηριστικό των αεροσκαφών είναι ή ταυτότητα που αποδίδεται στα αεροπλάνα που πολλές φορές αποκαλείται και ICAO24. Η ταυτότητα αυτή ανατίθεται σε κάθε μέσω ή όχημα (όχι απαραίτητα μόνο σε αεροσκάφη) που είναι εφοδιασμένα με πομπό-δέκτες ADS-B, αποτελείται από 24-bit και είναι μοναδική για

κάθε ένα. Με τον συνδυασμό των 24-bit μπορούν να αποδοθούν σχεδόν 16 εκατομμύρια διαφορετικοί κωδικοί. Ο χαρακτηρισμός ICAO24 προκύπτει από την δυαδική αναπαράσταση της ταυτότητας των 24-bit. Το γνώρισμα αυτό είναι και το βασικότερο του πίνακα εφόσον κάθε αεροπλάνο πλέον έχει μία και μόνο ταυτότητα καθ' όλη την διάρκεια ζωής του. Μερικά από τα γνωρίσματα της διάστασης είναι ο τύπος του αεροσκάφους (πχ. AIR BUS 320, Boeing 747), η κατάσταση του αεροπλάνου σε σχέση με το πότε επισκευάστηκε τελευταία φορά και μέχρι πότε έχει άδεια να πετάει (πεδία: status, registered, reguntil). Στον πίνακα αναγράφεται σε κάθε εγγραφή η αεροπορική εταιρία στην οποία ανήκει το αεροπλάνο. Τα πεδία του πίνακα φαίνονται στον Πίνακα 4-5 ενώ ενδεικτικά ένα στιγμιότυπο της διάστασης των αεροσκαφών φαίνεται στον Πίνακα 4-6.

Aircraft
Aircraft_id
Icao24
Registration
Manufacture_icao
Manufacture_name
Model_name
Model
Typecode
Serialnumber
Linenumber
Icao_aircraft_type
Operator
Operator_callsign
Operator_icao
Operator_iata
Owner
Registered
Reguntil
Status
Built
First_flight
Engines

Πίνακας 4-5: Διάσταση των αεροσκαφών

Air-craft Id	Icao24	Registratio n	Manufactu re icao	Manufactu re name	Model	Typecode	Serialnum ber
90	06a0d6	A7-MHH	AIRBUS	Airbus	ACJ319 115X	A319	3994
215	728618	YI-APX	AIRBUS	Airbus	A300 B4- 203	A30B	239
224	0d042b	XA-VOK	AIRBUS	Airbus	A319 133	A319	3450
344	38ed18	F-WTTN	AIRBUS	Airbus	A330 941N	A339	1795
430	400d90	G-EZAF	AIRBUS	Airbus Sas	AIRBUS A319-111	A319	2715

Πίνακας 4-6: Στιγμιότυπο της διάστασης των αεροσκαφών

4.2.6 Η διάσταση του Εναέριου Χώρου - Airspace

Ο Εθνικός Εναέριος Χώρος ΕΕΧ, όπως ορίζεται, είναι το τμήμα της ατμόσφαιρας ενός κράτους που εκτείνεται πάνω από την επικράτεια της. Ο εθνικός εναέριος χώρος ως όρος του Διεθνούς Δικαίου καθιερώθηκε (αναγνωρίστηκε) επίσημα από την διεθνή πολυμερή σύμβαση για τη ρύθμιση της εναέριας κυκλοφορίας που υπογράφηκε στο Παρίσι στις 13 Οκτωβρίου του 1919 μετά το τέλος του Α' Παγκοσμίου Πολέμου. Στην συνέχεια το 1944 στην διεθνή συνδιάσκεψη του Σικάγο θεσπίστηκαν τα κυριαρχικά δικαιώματα, οι δικαιοδοσίες των κρατών στον εθνικό εναέριο χώρο τους και οι ευθύνες των «Περιοχών Πληροφόρησης Πτήσεων», γνωστότερες εκ του αγγλικού όρου ως FIR (Flight Information Region), καθώς και το δικαίωμα εκ μέρους του κάθε συμβαλλόμενου σ' αυτή κράτους έκδοσης νομοθετικών και διοικητικών πράξεων που αφορούν θέματα ελέγχου εναερίου κυκλοφορίας.

Ο εναέριος χώρος αποτελείται από τρεις διαστάσεις. Τα οριζόντια όρια θεσπίζονται όπου υπάρχει στεριά ενώ πάνω από θάλασσα εκτείνεται μέχρι τα 12 ναυτικά μίλια από την κοντινότερη στεριά. Στα κάθετα όρια γενικά δεν υπάρχει συγκεκριμένος κανονισμός και τα όρια ποικίλουν από χώρα σε χώρα. Σε κάποιες περιπτώσεις δεν υπάρχουν όρια (unlimited) ενώ συνήθως σε μερικές χώρες είναι τα 45000 πόδια ή 15χλμ ενώ το παγκόσμιο καθιερωμένο σύνορο της ατμόσφαιρας με το διάστημα είναι τα 160χλμ.

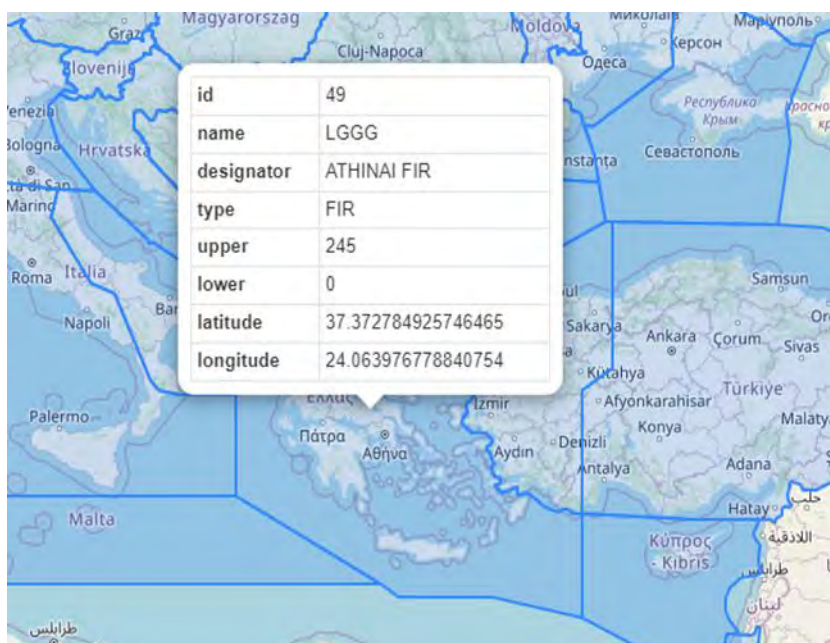
Η διάσταση του εναέριου χώρου είναι γεωχωρική, εφόσον ο εναέριος χώρος είναι ένα τρισδιάστατο πολύγωνο, και επιλέχθηκε για να κατηγοριοποιήσουμε σε ποια χώρα καταγράφηκε ένα σημείο (point) ενός trajectory. Τα γνωρίσματα του πίνακα Airspace είναι:

- [1]. **Airspace_Id** -> Το πρωτεύον κλειδί του πίνακα
- [2]. **Geometry** -> Γνώρισμα της PostGIS κατηγορίας geometry τύπου Polygon
- [3]. **Name** -> Το όνομα του εναέριου χώρου.
- [4]. **Designator** -> Η συντομογραφία που έχει αποδοθεί στον εναέριο χώρο από τον ICAO
- [5]. **Type** -> Ο τύπος του εναέριου χώρου – FIR (Flight Information Region)
- [6]. **Upper** -> Τα ανώτερα όρια – ένας τριψήφιος αριθμός που πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί 1000 για να μας δώσει τα όρια
- [7]. **Lower** -> Τα ελάχιστα όρια - ένας τριψήφιος αριθμός που πρέπει να πολλαπλασιαστεί επί 1000 για να μας δώσει τα όρια ή συνήθως μηδέν εφόσον ξεκινάει από το επίπεδο της θάλασσας

- [8]. **Latitude** -> Γεωγραφικό μήκος ενός σημείου στο κέντρο του χώρου
- [9]. **Longitude** -> Γεωγραφικό πλάτος ενός σημείου στο κέντρο του χώρου

Airspace
Airspace_id
Geometry
Name
Designator
Type
Upper
Lower
Latitude
Longitude

Πίνακας 4-7: Διάσταση του εναέριου χώρου



Εικόνα 4-5: Απεικόνιση του Ελληνικού FIR στο χάρτη

Ο Πίνακας 4-7 απεικονίζει την διάστασης Airspace ενώ στην Εικόνα 4-5 απεικονίζεται το Ελληνικό FIR με τα γειτονικά του. Όπως φαίνεται ο εναέριος χώρος είναι μία γεωμετρία τύπου πολύγωνου (Polygon).

4.2.7 Η διάσταση της ταυτότητας της Τροχιάς - Trajectories

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια λίστα με τις τροχιές (Trajectories) των αεροσκαφών έστω $L = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n\}$ όπου το T_i είναι το i -οστό trajectory. Το κάθε trajectory περιλαμβάνει ένα σύνολο από σημεία τότε το T_i ισούται με $T_i = \{m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_n\}$

όπου το m_j είναι το J-οστό σημείο του trajectory T_i αποτελούμενο τουλάχιστον από τα γνωρίσματα $m_j = \{\text{altitude, geoaltitude, latitude, longitude, onground, vertical_rate, groundspeed}\}$. Τα γνωρίσματα αυτά υποδηλώνουν την ακριβή θέση, ύψος και ταχύτητα της τροχιάς που διέγραψε το αεροσκάφος στο χώρο σε συγκεκριμένο χρόνο. Η κάθε τροχιά “T” από την λίστα “L”, αντιπροσωπεύει κάποιο αεροσκάφος από την διάσταση των αεροσκαφών που διένυσε μία τροχιά από ένα αεροδρόμιο σε ένα άλλο. Η διάσταση της ταυτότητας της τροχιάς χρησιμοποιείται ως βοηθητική για την αναπαράσταση όλων των T. Πολλά διαφορετικά T μπορούν να ανήκουν στο ίδιο αεροσκάφος. Το σύνολο των σημείων που συνθέτουν την τετραδιάστατη (4D) τροχιά του αεροπλάνου αποτελούν κομμάτι του πίνακα των γεγονότων και αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαια ενώ αυτή η διάσταση περιλαμβάνει όλα τα Trajectories (T) αποδίδοντας μια ταυτότητα στο κάθε ένα. Τα χαρακτηριστικά του πίνακα είναι:

- [1]. **Trajectory_Id: (bigint)** -> Το πρωτεύον κλειδί του πίνακα
- [2]. **Callsign: (text)** -> Το χαρακτηριστικό κλήσης του αεροσκάφος όπως του είχε αποδοθεί από τις αρχές ΕΕΚ (Ελέγχου Εναέριας Κυκλοφορίας)
- [3]. **Firstseen:(timestamp)** -> Η χρονοσφραγίδα του πρώτου σημείου που καταγράφηκε από το δίκτυο των αισθητήρων ADS-B του OpenSky
- [4]. **LastSeen:(timestamp)** -> Η χρονοσφραγίδα του τελευταίου σημείου που καταγράφηκε από το δίκτυο των αισθητήρων ADS-B του OpenSky.

Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν στοιχεία για το αεροδρόμιο αναχώρησης και προορισμού για ένα trajectory, οι τιμές των *Firstseen* και *Lastseen* μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση του πλησιέστερου αεροδρομίου, σε σχέση με την θέση του σημείου (point) την δεδομένη χρονική στιγμή που καταγράφηκε. Στον Πίνακα 4-8 φαίνεται η διάσταση των trajectories.

Trajectories
Trajectory_id
Callsign
Firstseen
Lastseen

Πίνακας 4-8: Η Διάσταση των Trajectories

4.3 Πίνακες Γεγονότων

Οι πίνακες γεγονότων αποθηκεύουν μετρήσεις ή μετρικές που προκύπτουν από γεγονότα επιχειρηματικών διαδικασιών ενός οργανισμού όπως για παράδειγμα οι πτήσεις ενός αεροδρομίου. Κάθε εγγραφή σε ένα πίνακα γεγονότων αντιστοιχεί σε ένα συμβάν μέτρησης. Μπορεί να αποτυπώσει τις μετρήσεις για παράδειγμα όπως τις ποσότητες των αναχωρήσεων και αφίξεων διαφορετικών τύπων αεροσκαφών σε ένα αεροδρόμιο προς διαφορετικούς προορισμούς σε σχέση με τον χρόνο. Το επίπεδο διαβάθμισής ή λεπτομέρειας (granularity) καθορίζεται από τις επιχειρηματικές ανάγκες, για παράδειγμα μπορεί να καθοριστεί αν θα αποτυπώνονται οι πτήσεις ωριαία, ημερησία ή εβδομαδιαία. Το επίπεδο διαβάθμισης θα καθορίσει την αξία και την σαφήνεια των μετρήσεων. Υπάρχουν δύο τύποι χαρακτηριστικών στους πίνακες γεγονότων τα ποιοτικά και τα ποσοτικά. Ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό καθορίζει τα χαρακτηριστικά ενός γεγονότος και ορίζεται ως ξένο κλειδί σε έναν πίνακα διαστάσεων. Ένα ποσοτικό χαρακτηριστικό ορίζει μία μέτρηση ενός γεγονότος όπως ποσό, ποσότητα, χρονικό διάστημα ή χρονική διάρκεια ή οποιαδήποτε άλλη μετρήσιμη (αριθμητική) τιμή στην οποία μπορούν να εφαρμοστούν στατιστικοί υπολογισμοί όπως άθροισμα, μέσος όρος και η διακύμανση. Οι μετρήσεις μπορεί να είναι προσθετικές ή μη ανάλογα με το αν μπορούν ή όχι να αθροιστούν σε οποιαδήποτε διάσταση. Μπορεί επίσης να είναι ημί-προσθετικές, που σημαίνει ότι μπορούν να αθροιστούν σε ορισμένες από τις διαστάσεις της αποθήκης δεδομένων.

4.3.1 Δεδομένα κινούμενων αντικειμένων

Οι δομές δεδομένων που αποτυπώνουν την κίνηση ενός αντικειμένου στο χρόνο και στο χώρο ονομάζονται τροχιές (trajectories). Τα δεδομένα τροχιάς μπορούν να αποτυπώσουν την κίνηση που ακολούθησε ένα αυτοκίνητο, ζώο, αεροπλάνο ή ακόμη και ένας πεζοπόρος γύρω από ένα σημείο ενδιαφέροντος (POI – Point of Interest). Στις μέρες μας συσκευές όπως το κινητό ή το GPS και άλλα μπορούν να καταγράψουν κάθε δευτερόλεπτο μεγάλο όγκο δεδομένων συνθέτοντας από τις πιο απλές μέχρι και τις πιο σύνθετες τροχιές. Η ανάλυση που προκύπτει από τις αποθήκες δεδομένων τροχιάς - trajectories data warehouse έχει σχεδόν άπειρες χρήσεις και εφαρμογές, όπως από την εύρεση μοτίβων (pattern) σε ορισμένα αντικείμενα ή και ανθρώπους μέχρι την πρόβλεψη και αποφυγή ενός αεροπορικού δυστυχήματος. Οι ΑΔΤ μπορούν να αποτυπώσουν τις τάσεις γύρω από ένα σημείο ενδιαφέροντος, στην προκειμένη περίπτωση τα σημεία ενδιαφέροντος της ΑΔΤ είναι τα Αεροδρόμια.

4.3.2 Δομή Δεδομένων Τροχιάς – Trajectory Data Structure

Η κατασκευή του πίνακα γεγονότων σε ΑΔΤ είναι αρκετά δύσκολη και εξαρτάται από τον τρόπο και το είδος των μετρήσεων που θέλουμε να εφαρμόσουμε. Γενικά έχουνε προταθεί πολλά μοντέλα αποθήκευσης κινούμενων αντικειμένων σε λογικό, εννοιολογικό και φυσικό επίπεδο (logical, conceptual, physical) σύμφωνα με [15] [20] .

Το πιο απλό μοντέλο είναι το επίπεδο (flat model) το οποίο απλά αποτυπώνει στον πίνακα γεγονότων για κάθε εγγραφή ένα γεωγραφικό σημείο τύπου point της μορφής $p_i(x,y)$ ή $p_i(x,y,z)$ που ανήκει σε κάποιο trajectory T και t_i (time) είναι η χρονοσφραγίδα (timestamp) του p_i . Συνήθως η κάθε εγγραφή μπορεί να συνοδεύεται και από έναν αριθμό ποσοτικών γνωρισμάτων $a_{i1}, \dots, a_{in}$. Το επίπεδο μοντέλο αποκαλείται επίσης και ακατέργαστο διότι περιλαμβάνει ολόκληρη την πληροφορία της κίνησης.

Με βάση το επίπεδο μοντέλο προέκυψαν δύο νέα σύμφωνα με [15] [21], το μοντέλο των κυψελών ή κελιών (cell model) και το τμηματικό μοντέλο (segment model). Η εξέλιξη του επίπεδου μοντέλου προέκυψε από την ανάγκη για μείωση του όγκου δεδομένων προς αποθήκευση, ταχεία επεξεργασία και πιο αποτελεσματική ανάλυση, των χωροχρονικών δεδομένων. Το **segment model** χρησιμοποιείται για την αποθήκευση τροχιάς με βάση τμήματα γραμμών (segments). Κάθε τροχιά διασπάται σε μικρότερα τμήματα και κάθε τμήμα αναπαρίσταται από μία γραμμή (segment). Στο segment model, έχουμε μείωση του όγκου των δεδομένων, σε αντίθεση με την αποθήκευση κάθε σημείου ξεχωριστά και πιο αποδοτική επεξεργασία όταν αναλύουμε συνεχόμενες κινήσεις. Το **cell model** από την άλλη βασίζεται στην διαίρεση του χώρου σε κελιά (cells) και την αποθήκευση της τροχιάς με βάση τα κελιά που διασχίζει το αντικείμενο. Η χρήση των κελιών διευκολύνει τη δημιουργία χωρικών ευρετηρίων, τα οποία επιτρέπουν ταχύτερη εκτέλεση ερωτημάτων που αφορούν όμως συγκεκριμένες περιοχές του χώρου.

Όσον αφορά την αποθήκευση τροχιάς αεροσκαφών, το cell model παρουσιάζει κάποια αρνητικά στοιχεία. Η απώλεια ακρίβειας είναι ένα από αυτά, καθώς βασίζεται σε κελιά η πραγματική θέση του αεροσκάφους μπορεί να αναπαρασταθεί μόνο από το κελί. Η δυσκολία καταγραφής μικρό ελιγμών είναι επίσης στα αρνητικά και είναι αδύνατον να καταγραφούν εφόσον συμβαίνουν εντός του ίδιου κελιού. Η υψηλές ταχύτητες των αεροσκαφών, μιας και διανύουν τεράστιες αποστάσεις γρήγορα, σημαίνει ότι θα διασχίζει πολλά κελιά (cells) γρήγορα. Αυτό φέρνει δυσκολία στην αναπαράστασή της τροχιάς καθιστώντας το cell model μη αποδεκτό για την συγκεκριμένη εφαρμογή, δηλαδή αποθήκευση τροχιάς όπως των αεροσκαφών.

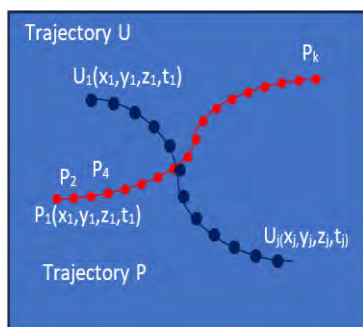
Μία εξελιγμένη παραλλαγή του επίπεδου μοντέλου, για την αποθήκευση τροχιάς αεροσκαφών, προτείνεται στην τρέχουσα εργασία. Πρόκειται για ένα περίπλοκο συγκεντρωτικό επίπεδο μοντέλο. Το μοντέλο αυτό αποθηκεύει όλα τα σημεία της τροχιάς σε ένα πίνακα (array). Ο τύπος του πίνακα αυτού αποτελεί μέρος μίας προκαθορισμένης δομής δεδομένων. Μέσα στην συγκεκριμένη δομή ενθυλακώνεται το γνώρισμα του σημείου (point), ο χρόνος και τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά (numerical attributes). Επί της ουσίας γίνεται αποθήκευση ολόκληρης της τροχιάς σε μία εγγραφή στον πίνακα των γεγονότων. Η ανάκτηση και προβολή της κάθε τροχιάς επιτυγχάνεται με ερωτήματα μίας γραμμής. Το όνομα που αποδίδεται στο μοντέλο αυτό είναι **TrajMat** επειδή συνδυάζει την έννοια της αποθήκευσης ολόκληρης της τροχιάς σε μία δομημένη μορφή, όπως μια μήτρα.

Η αποθήκευση της 4D τροχιάς των αεροσκαφών θα είναι διαφορετική για κάθε μοντέλο. Στο επίπεδο μοντέλο η αποθήκευση των δεδομένων (Πίνακας 4-9) γίνεται με την καταγραφή του κάθε σημείου (γεωγραφική θέση, ύψος) και χρόνου ανά γραμμή. Για την κάθε εγγραφή δύναται να αποθηκεύσουμε και μια σειρά από αποδιδόμενες αριθμητικές (numerical attributes), όπως η πορεία, ο ρυθμός ανόδου καθόδου, η ποσότητα καυσίμου και άλλες. Η δυνατότητα αυτή δεν είναι εφικτή σε όλα τα μοντέλα. Επίσης για κάθε εγγραφή αποθηκεύονται και οι ποσοτικές μετρήσεις (Measurements) αλλά μέχρι τον συγκεκριμένο χρόνο t , που σημαίνει εάν θέλουμε να βρούμε την μέση ταχύτητα όλης της πτήσης θα πρέπει να ανατρέξουμε στη τελευταία εγγραφή. Σε αντίθεση με το επίπεδο μοντέλο το segment model αποθηκεύει τμήματα. Στον Πίνακα 4-10 παρατηρούμε ότι για κάθε τμήμα αποθηκεύεται το πρώτο και το τελευταίο σημείο (γεωγραφική θέση, ύψος) και χρόνος. Στο τμηματικό μοντέλο υπάρχει μεγάλη μείωση του όγκου των δεδομένων αλλά δεν δύναται να αποθηκεύσουμε μετρήσιμα χαρακτηριστικά όπως στο επίπεδο μοντέλο. Επίσης οι ποσοτικές μετρήσεις καταγράφονται τμηματικά και όχι σειριακά όπως στο προηγούμενο μοντέλο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ακρίβειας των μετρικών πληροφοριών (Measurements). Το cell model (Πίνακας 4-11) αποθηκεύει σε κάθε εγγραφή το κελί (cell) στο οποίο βρίσκεται το καταγεγραμμένο σημείο, το σημείο (γεωγραφική θέση, ύψος) και ο χρόνος. Στο μοντέλο των κελίων δύναται να αποθηκεύσουμε αποδιδόμενες μετρήσεις (numerical attributes) και ποσοτικές μετρήσεις (measurements). Τέλος το μοντέλο TrajMat αποθηκεύει συνολικά την τροχιά σε μία εγγραφή, ενθυλακώνοντας όλες τις εγγραφές για μία τροχιά από το επίπεδο μοντέλο σε μία.

Συνοψίζοντας θα παραθέσουμε μερικές συγκρίσεις για τα μοντέλα με παραδείγματα. Εάν θέλαμε να καταγράψουμε την τροχιά που ακολούθησε κάποιος για να επισκεφτεί μια

σειρά από εμπορικά καταστήματα θα ήταν καλύτερο να αποθηκεύαμε τα αρχικά και τα τελικά σημεία (start end point) με τους χρόνους τους παρά την τροχιά ολόκληρη. Αυτά τα τμήματα μας δίνουν την δυνατότητα να παράγουμε σημασιολογικά δεδομένα (semantic data). Τα segment και cell model μας δίνουν την δυνατότητα να αποθηκεύσουμε αθροιστικά δεδομένα (aggregated data). Το μοντέλο cell θα μπορούσε να έχει άψογη εφαρμογή εάν θέλαμε να μετρήσουμε την ποσοστιαία επίσκεψη υπαλλήλων σε συγκεκριμένους χώρους μέσα σε ένα εργοστάσιο ή γραφείο. Το μοντέλο cell μας δίνει την δυνατότητα να χωρίσουμε τον χώρο σε ίσα γεωγραφικά κελιά και να αποθηκεύουμε τις κινήσεις στον πίνακα των γεγονότων βάζοντας ως ξένο κλειδί το κελί με το καταγεγραμμένο σημείο με την χρονοσφραγίδα του. Οι δυνατότητες αυτού του μοντέλου είναι ότι μπορούμε να πάρουμε στατιστικά σχετικά με τις κινήσεις αλλά θα πρέπει ο χώρος να είναι προκαθορισμένος και γνωστός από την αρχή. Στην περίπτωση που θέλουμε να καταγράψουμε κινήσεις ζώων μέσα σε ένα μη δεδομένο γεωγραφικό περιβάλλον το μοντέλο segment εφαρμόζει καλύτερα.

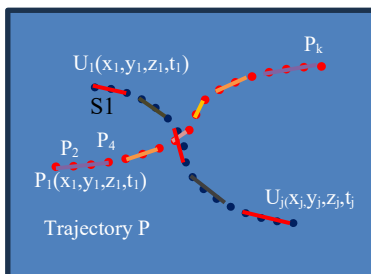
Επίπεδο Μοτέλο



Trajectory Id	Point	Time	Numerical Attributes	Measurements
Traj. P	Px ₁ ,Py ₁ ,Pz ₁	Pt ₁	{Pa ₁ ,...,Pa _n }	Max speed, Total Distance etc
Traj. P	Px ₂ ,Py ₂ ,Pz ₂	Pt ₂	{Pb ₁ ,...,Pb _n }	->-
Traj. U	Ux ₁ ,Uy ₁ ,Uz ₁	Ut ₁	{Uc ₁ ,...,Uc _n }	->-
Traj. P	Px _k ,Py _k ,Pz _k	Pt _k	{Pi ₁ ,...,Pi _n }	->-

Πίνακας 4-9: Αποθήκευση δεδομένων στο επίπεδο μοντέλο

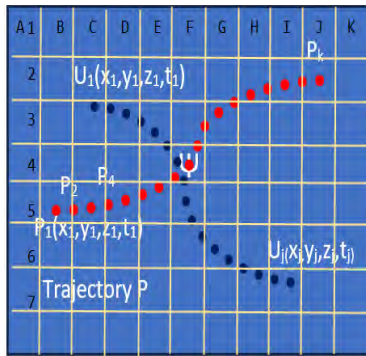
Μοντέλο τμημάτων – Segment Model



Trajectory Id	Segment			Start Time	End Time	Measurements
	ID	StartPoint	End Point			
Traj. P	Ps ₁	Px ₁ ,Py ₁ ,Pz ₁	Px ₄ ,Py ₄ ,Pz ₄	Pt ₁	Pt ₄	Max speed, Total Distance etc.
Traj. P	Ps ₂	Px ₄ ,Py ₄ ,Pz ₄	Px ₆ ,Py ₆ ,Pz ₆	Pt ₄	Pt ₆	->-
Traj. U	Us ₁	Ux ₁ ,Uy ₁ ,Uz ₁	Ux ₃ ,Uy ₃ ,Uz ₃	Ut ₁	Ut ₃	->-

Πίνακας 4-10: Αποθήκευση δεδομένων στο τμηματικό μοντέλο

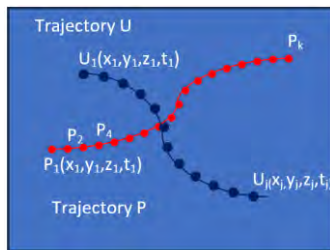
Μοντέλο Κελιών – Cell Model



Trajectory Id	Cell	Point	Time	Numerical Attributes	Measurements
Traj. P	Cell(B,5)	$P_{x_1}, P_{y_1}, P_{z_1}$	P_{t_1}	$\{P_{a_1}, \dots, P_{a_n}\}$	Max speed, Total Distance etc.
Traj. P	Cell(C,5)	$P_{x_2}, P_{y_2}, P_{z_2}$	P_{t_2}	$\{P_{b_1}, \dots, P_{b_n}\}$	Max speed, Total Distance etc.
Traj. U	Cell(C,3)	$U_{x_1}, U_{y_1}, U_{z_1}$	U_{t_1}	$\{U_{c_1}, \dots, U_{c_n}\}$	Max speed, Total Distance etc.
Traj. P	Cell(J,2)	$P_{x_k}, P_{y_k}, P_{z_k}$	U_{t_k}	$\{P_{i_1}, \dots, P_{i_n}\}$	Max speed, Total Distance etc.

Πίνακας 4-11: Αποθήκευση δεδομένων στο μοντέλο κελιών

Περίπλοκο Επίπεδο Μοντέλο - TrajMat



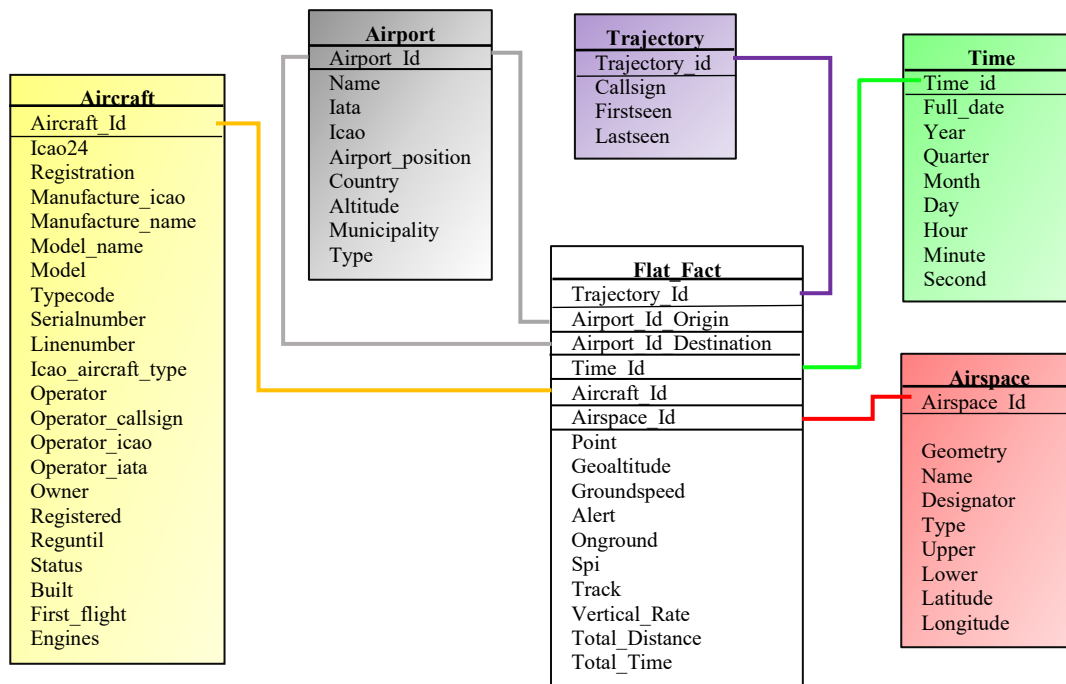
Trajectory	Custom Data Structure Type Array
Traj. P	$\{(P_{x_1}, P_{y_1}, P_{z_1}, P_{t_1}, \{P_{a_1}, \dots, P_{a_n}\}), (P_{x_2}, P_{y_2}, P_{z_2}, P_{t_2}, \{P_{b_1}, \dots, P_{b_n}\}), \dots, (P_{x_k}, P_{y_k}, P_{z_k}, P_{t_k}, \{P_{i_1}, \dots, P_{i_n}\})\}$
Traj. U	$\{(U_{x_1}, U_{y_1}, U_{z_1}, U_{t_1}, \{U_{a_1}, \dots, U_{a_n}\}), (U_{x_2}, U_{y_2}, U_{z_2}, U_{t_2}, \{U_{b_1}, \dots, U_{b_n}\}), \dots, (U_{x_j}, U_{y_j}, U_{z_j}, U_{t_j}, \{U_{i_1}, \dots, U_{i_n}\})\}$

Πίνακας 4-12: Αποθήκευση δεδομένων στο μοντέλο TrajMat

4.4 Σχεδίαση Αποθήκης Δεδομένων

Για την δημιουργία της αποθήκης δεδομένων, υλοποιήσαμε το επίπεδο μοντέλο (Εικόνα 4-6), το τμηματικό μοντέλο (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**) και το πολύπλοκο TrajMat μοντέλο (Εικόνα 4-12). Τα τμήματα, για την υλοποίηση του τμηματικού μοντέλου, προέκυψαν βάση των αλλαγών των τιμών της μεταβλητής του ρυθμού ανόδου καθόδου (vertical rate).

4.4.1 Το επίπεδο μοντέλο -“Flat Model”

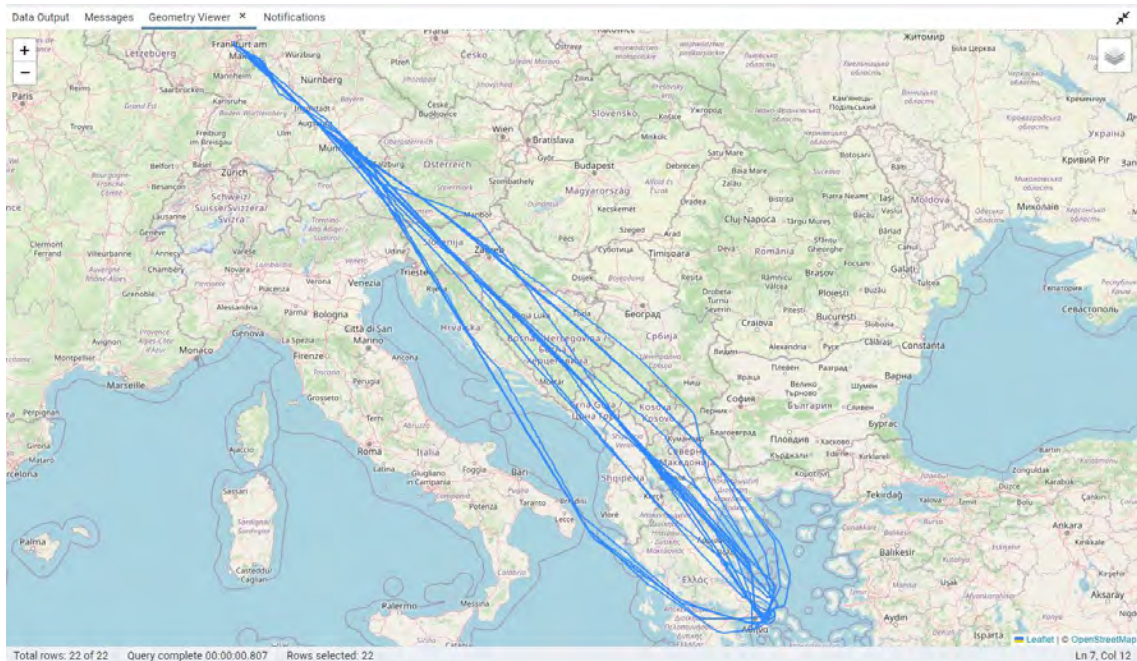


Εικόνα 4-6: Flat Model

Για την τροχιά της κάθε πτήσης αποθηκεύετε το σύνολο των σημείων που καταγράφθηκαν από τους αισθητήρες συνδέοντας τα με τις διαστάσεις (μέσω ξένων κλειδιών) του χρόνου, τον τύπο του αεροσκάφους, τα αεροδρόμια αναχώρησης (origin) και προορισμού (destination) και τον εναέριο χώρο που καταγράφηκε το σημείο. Πέραν των διαστάσεων για το κάθε σημείο καταγράφουμε το ύψος, την πορεία, τον βαθμό ανόδου καθόδου και μεταβλητές τύπου boolean που υποδεικνύουν εάν στο συγκεκριμένο σημείο υπήρξε ή άρχισε να υφίσταται κάποιο πρόβλημα (alert) στο αεροσκάφος. Η δήλωση κατάστασης εκτάκτου ανάγκης από ένα αεροσκάφος γίνεται θέτοντας σε true την μεταβλητή alert από τα όργανα του αεροσκάφους.

Οι μετρήσεις που αποθηκεύονται στον πίνακα των γεγονότων είναι η συνολική απόσταση “total_distance” που έχει διανύσει το αεροσκάφος μέχρι το δεδομένο σημείο και ο συνολικός χρόνος “total_time” της πτήσης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο αποτυπώνεται με μεγάλη λεπτομέρεια η συνολική τροχιά που διένυσε το αεροσκάφος. Στα αρνητικά του μοντέλου κατατάσσετε ο μεγάλος όγκος των εγγραφών στον πίνακα των γεγονότων. Οι μετρήσεις του συνολικού χρόνου και τις συνολικής απόστασης της πτήσης, χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων σε σχέση ποια πτήση διήρκτησε λιγότερο σε σχέση με την συνολική απόσταση που διένυσε. Στην **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** αποτυπώνονται οι τροχιές 22 πτήσεων από το αεροδρόμιο

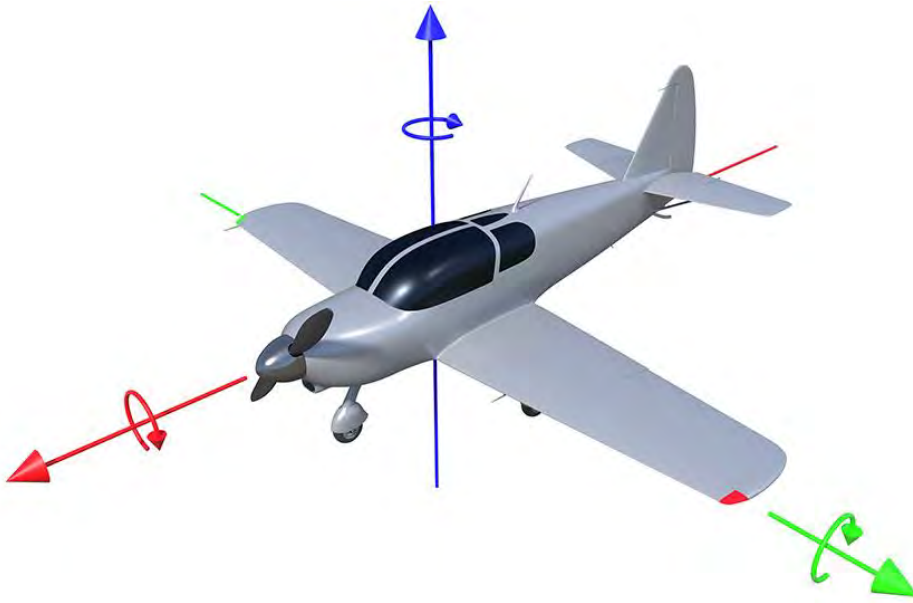
της Φρανκφούρτης προς την Αθήνα. Για την ένωση όλων των σημείων της κάθε τροχιάς χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση της PostGIS `ST_MakeLine(Point[] array of points)`, η οποία δέχεται σαν παράμετρο έναν πίνακα από σημεία και αποτυπώνει μία ενιαία γραμμή “linestring” όπως ορίζεται από την ορολογία του GIS. Το σύνολο των καταγεγραμμένων σημείων κάθε πτήσης απεικονίζεται στο χάρτη σχηματίζοντας την τροχιά του.



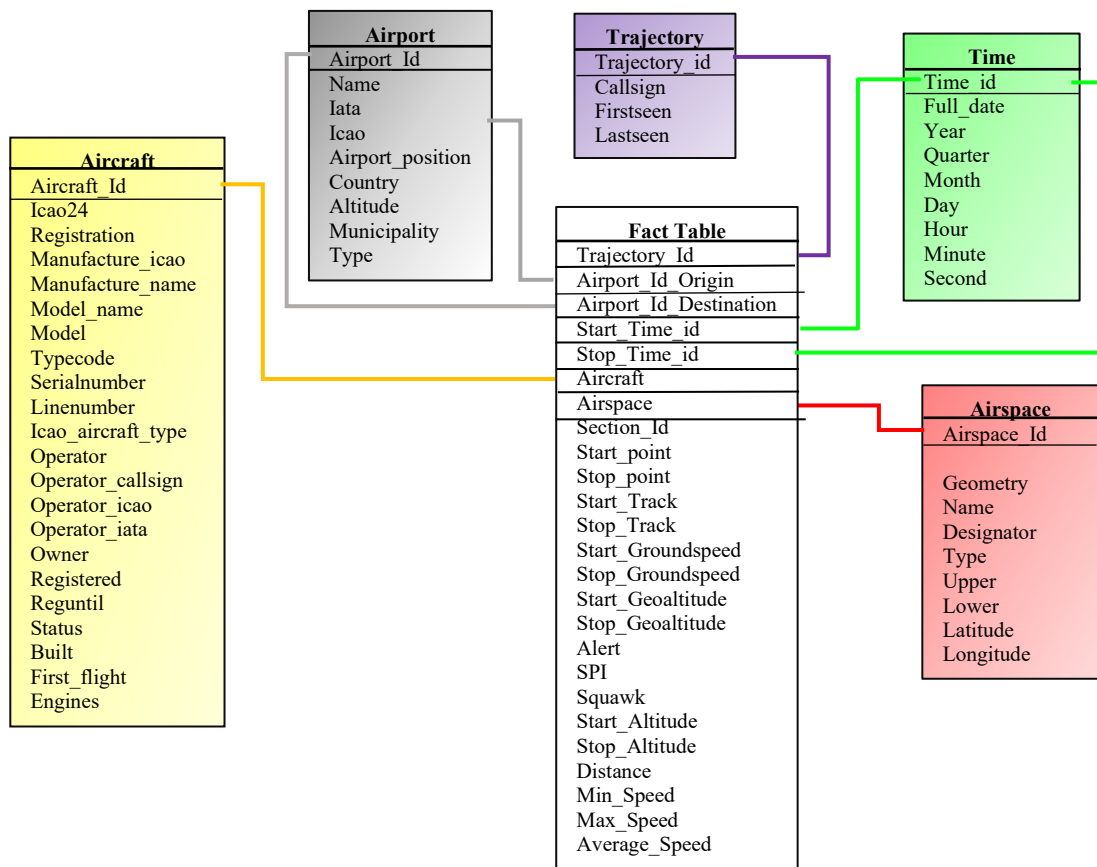
Εικόνα 4-7: Αποτύπωση τροχιών από την Φρανκφούρτη προς την Αθήνα

4.4.2 Το μοντέλο Segment

Το μοντέλο segment με βάση τον ρυθμό ανόδου καθόδου (segment by vertical rate) Εικόνα 4-8 αποθηκεύει χωρίς απώλειες πληροφορίες με μικρότερο όγκο εγγραφών ένα trajectory. Στο μοντέλο ομαδοποιούμε την τροχιά σε τμήματα - segments. Τα τμήματα προκύπτουν με βάση την μεταβολή του ρυθμού ανόδου/καθόδου (vertical rate). Στο κάθε τμήμα ο ρυθμός ανόδου/καθόδου είναι σταθερός. Η κίνηση των αεροπλάνων βασίζεται κυρίως σε τρεις άξονες x,y,z (Εικόνα 4-9), η μεταβλητή vertical rate υποδηλώνει αλλαγές μέσω του Pitch (Green) (Εικόνα 4-9) κυρίως στον άξονα z (πράσινο) και παίρνει θετικές ή αρνητικές τιμές. Ο ρυθμός ανόδου/καθόδου μεταφράζεται σε πόδια ανά λεπτό (ft/min) και εκφράζει την άνοδο ή κάθοδο του αεροσκάφους ή την οριζοντίωση του όταν έχει την τιμή 0. Για παράδειγμα η τιμή 1000 δηλώνει ότι το αεροσκάφος βρίσκεται σε τέτοια θέση έτσι ώστε κάθε λεπτό να ανεβαίνει 1000 πόδια ή 300 μέτρα (3 πόδια = 1 μέτρο).



Εικόνα 4-9: Άξονες κίνησης αεροσκάφους – Pitch (Green), Yaw (Blue), Roll (Red) [22]



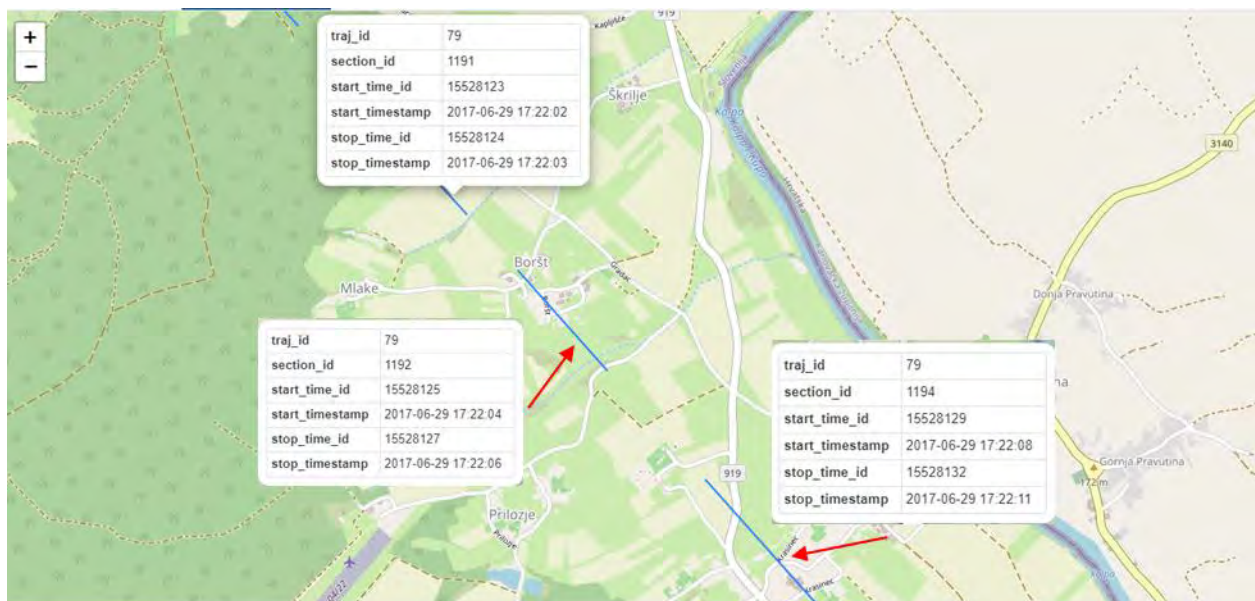
Εικόνα 4-8: Μοντέλο Segment

Σε σχέση με το μοντέλο flat, σε αυτό το μοντέλο υπάρχει μια διαφοροποίηση στον πίνακα των γεγονότων. Αντί για την καταγραφή όλων των σημείων προτείνεται η αποθήκευση τμημάτων όπου ο ρυθμός ανόδου-καθόδου του αεροσκάφους ήταν σταθερός. Κάθε φορά που παρατηρείται αλλαγή στον ρυθμό ανόδου καθόδου τότε δημιουργείται ένα νέο τμήμα. Όπως και στο flat model οι διαστάσεις παραμένουν ίδιες με την διαφορά ότι χρησιμοποιούμε δύο φορές την διάσταση του χρόνου μία για την καταγραφή της έναρξης του τμήματος και μία για το πέρας του τμήματος. Τα γνωρίσματα επίσης της κάθε εγγραφής αλλάζουν. Τα γνωρίσματα στο πίνακα γεγονότων είναι η αρχική και τελική πορεία του αεροσκάφους “start_track”, “stop_track”. Το αρχικό και τελικό ύψος “start_altitude” και “stop_altitude” του τμήματος. Η αρχική και η τελική ταχύτητα του τμήματος “start_airspeed” “stop_airspeed”. Οι μετρήσεις στον πίνακα των γεγονότων είναι η απόσταση “distance” του τμήματος, η μέγιστη - ελάχιστη ταχύτητα του τμήματος καθώς και ο μέσος όρος της ταχύτητας που είχε στο συγκεκριμένο σκέλος.

Αρχικά αυτή η πρόταση αποθήκευσης των τροχιών μειώνει τον όγκο των δεδομένων. Στον Πίνακα 4-13 φαίνονται συγκριτικά οι μετρήσεις των αποθηκευμένων δεδομένων για την ίδια πτήση στο 1^ο μοντέλο (flat) και στο 2^ο μοντέλο (segment), συγκρίνοντας την διαφορά τους (count_difference).

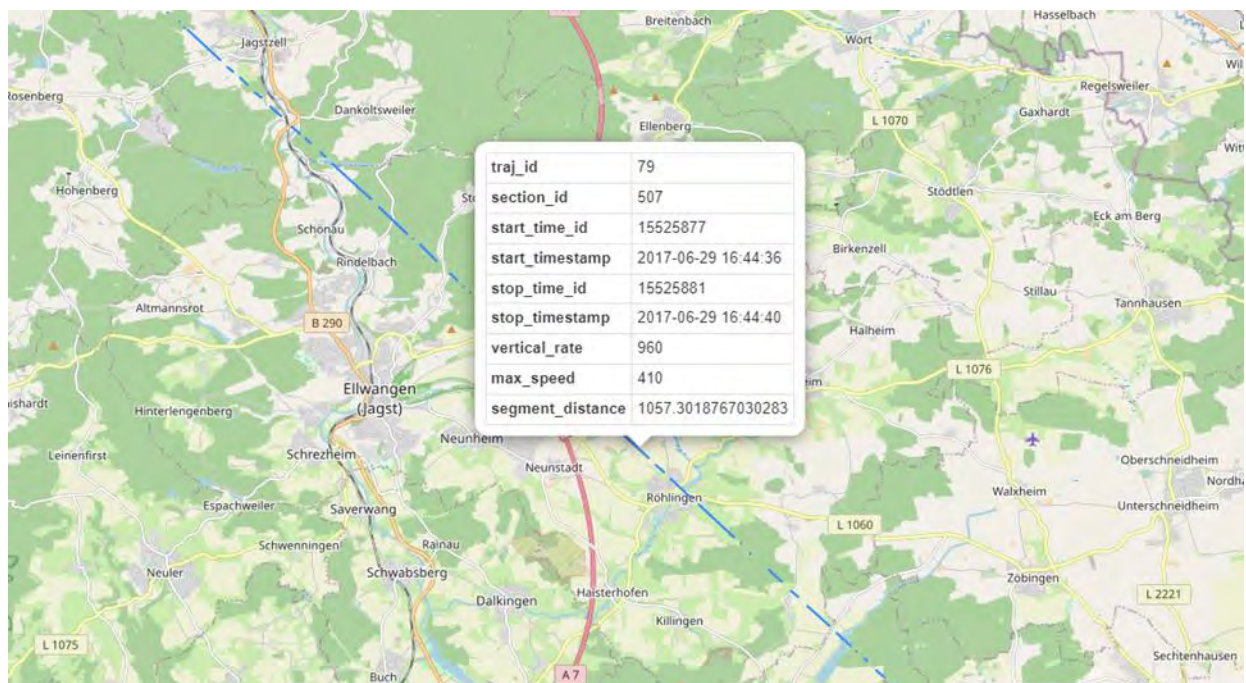
A/A	Trajectory Id	Εγγραφές στο Flat Model	Εγγραφές στο Segment Model	Διαφορά	Ποσοστό Συμπίεσης Όγκου Δεδομένων
1	79	7970	2025	5945	74%
2	80	7476	1258	6218	83%
3	81	7708	1080	6628	85%
4	82	7826	1042	6784	87%
5	83	7949	1037	6912	86%
6	84	8195	1554	6641	81%
7	85	7335	1483	5852	79%
8	86	7653	2128	5525	72%
9	87	7238	867	6371	88%
10	88	8526	1245	7281	85%
11	89	5225	858	4367	83%
12	90	7832	1734	6098	77%
13	91	6016	736	5280	87%

Πίνακας 4-13: Σύγκριση πληθικότητας πινάκων γεγονότων Flat και Segment μοντέλων



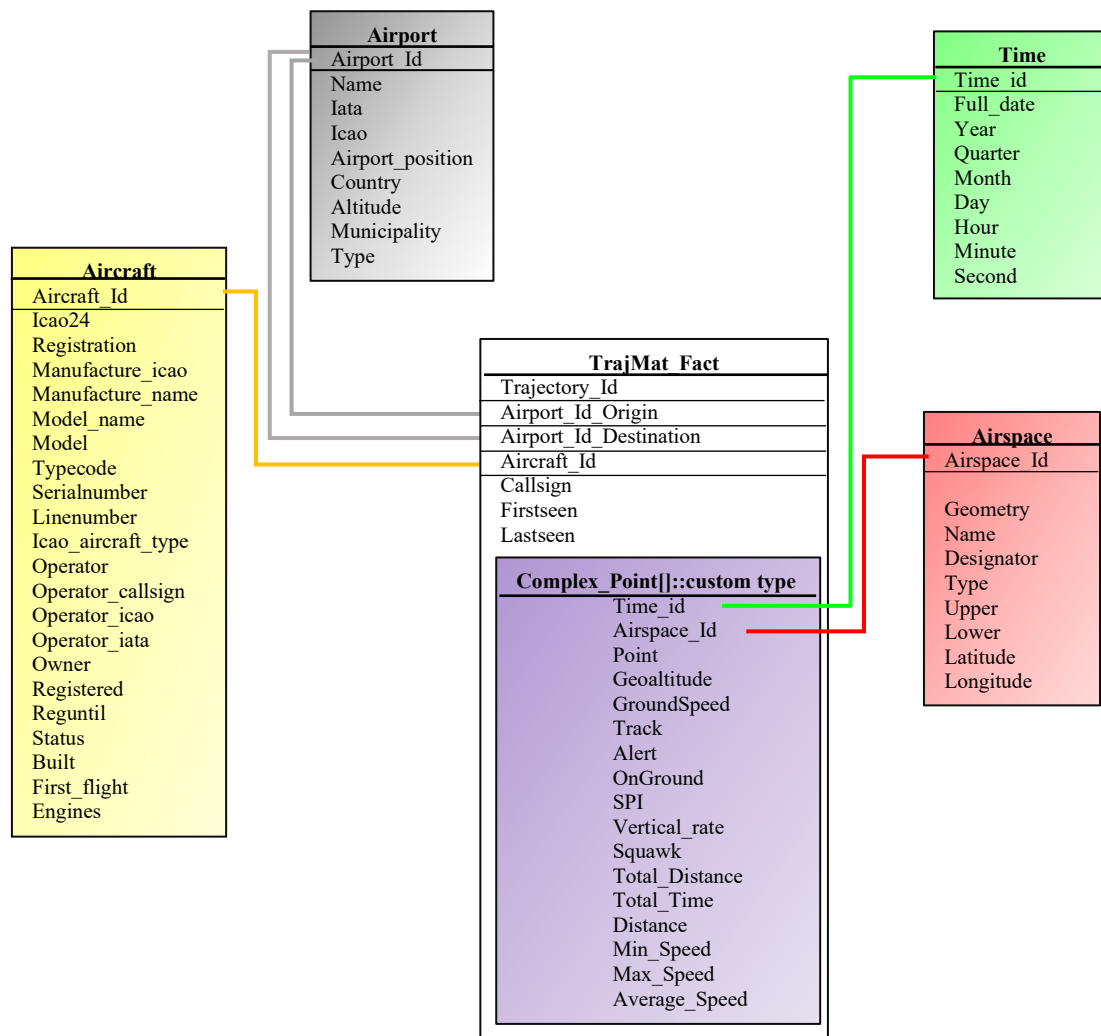
Εικόνα 4-10: Απεικόνιση των τμημάτων της τροχιάς 79 στο χάρτη

Στην Εικόνα 4-10 φαίνονται ενδεικτικά 3 διαφορετικά τμήματα της τροχιάς της πτήσης με αναγνωριστικό «79». Από την απεικόνιση στο χάρτη μέσω του ερωτήματος SQL στην αποθήκη δεδομένων φαίνεται η διάρκεια του κάθε τμήματος, αν αφαιρέσουμε τους χρόνους “stop_timestamp” και “start_timestamp”. Κατά την διάρκεια του κάθε τμήματος ο ρυθμός ανόδου καθόδου ήταν σταθερός.



Εικόνα 4-11: Απεικόνιση τμήματος με ρυθμό ανόδου/καθόδου 960 ft/min και απόσταση τμήματος 1057 μέτρα

4.4.3 Το μοντέλο TrajMat



Εικόνα 4-12: Μοντέλο TrajMat

Ο πίνακας γεγονότων του TrajMat model (Εικόνα 4-12) δεν συνδέεται άμεσα με τις διαστάσεις του χρόνου(Time) και του εναέριου χώρου (Airspace). Συνδέεται όμως με αυτές τις διαστάσεις μέσω τις δομής δεδομένων (complex_point). Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα το complex point δεν αποτελεί πίνακα ή διάσταση της αποθήκης δεδομένων αλλά ένα προκαθορισμένο τύπο δεδομένων. Η αποθήκευση του κάθε σημείου γίνεται με βάση αυτό τον τύπο. Σε αυτό το μοντέλο, η τροχιά αποτυπώνεται σε ένα πίνακα (array) του complex_point σε μία μόνο εγγραφή. Η διάσταση του trajectory επίσης δεν υπάρχει εδώ αφού έχει γίνει προσάρτηση της στον πίνακα των γεγονότων.

5 Συγκρίσεις και διεξαγωγή συμπε- ρασμάτων

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να συγκρίνουμε τα μοντέλα ως προς την ταχύτητα αναζήτησης και την εγγύτητα των αποτελεσμάτων. Οι συγκρίσεις των μοντέλων στηρίχθηκαν σε τρεις κατηγορίες, κατανεμημένες αναζητήσεις (distributive min, max speed, altitude για κάθε τροχιά), αλγεβρικές αναζητήσεις (average speed), ολιστικές (holistic median). Μέσω των συγκρίσεων θα προκύψουν τα συμπεράσματα και πρέπει να αποδειχθεί η ικανότητα των μοντέλων να εξάγουν τα ίδια αποτελέσματα.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα μοντέλα flat, segment και TrajMat. Τα δεδομένα στα οποία βασίστηκαν οι δοκιμές αφορούν 335 πτήσεις από Φρανκφούρτη προς Αθήνα από το 2017 έως το 2022. Ο μέσος όρος των καταγεγραμμένων σημείων για την κάθε πτήση είναι περίπου 7000 σημεία τα οποία συνθέτουν τις τροχιές τους. Τα συνολικά αποθηκευμένα σημεία για όλες τις τροχιές είναι 1.592.440. Η πραγματοποίηση δοκιμών σε τροχιές αντικειμένων που κινούνται στον τρισδιάστατο χώρο είναι πιο απαιτητική σε σχέση με αντικείμενα που κινούνται σε λιγότερους άξονες όπως ένα αυτοκίνητο. Όλα τα αποτελέσματα των δοκιμών, συνοδεύονται από τον κώδικα, σε γλώσσα SQL, με το οποίο προέκυψαν τα αποτελέσματα, στο κάθε μοντέλο συνοδευόμενο από την επεξήγηση του ερωτήματος και τον πίνακα με τους χρόνους απόκρισης των αποτελεσμάτων. Από τις μετρήσεις του μέσου χρόνου απόκρισης του κάθε ερωτήματος θα βρεθεί το γρηγορότερο και πιο αξιόπιστο μοντέλο. Όλα τα ερωτήματα θα εκτελεστούν τουλάχιστον 20 φορές. Μερικές δοκιμές δεν θα είχαν ουσιαστικό όφελος, εάν δεν πλαισιώνονταν από σημαντικά γεγονότα και μετρήσεις. Η εύρεση μέγιστης ταχύτητας τροχιάς για παράδειγμα, πρέπει να πλαισιώνεται από την απόσταση που είχε διανύσει από την απογείωση και το ύψος. Σε κάθε δοκιμή θα προσπαθήσουμε να αντλήσουμε και άλλα σημαντικά στοιχεία που να πλαισιώνουν την δοκιμή. Η ικανότητα των μοντέλων, όπως αυτά προτάθηκαν, στις πράξεις είναι εξαιρετική και όπως φαίνεται παρακάτω τα σημασιολογικά δεδομένα που προσφέρουν είναι μοναδικά.

Τα χαρακτηριστικά του υπολογιστή που έγιναν οι δοκιμές είναι:

CPU	Intel i7 2600K 3.8Ghz
-----	-----------------------

RAM	16GB
GPU	Nvidia GTX 560Ti
STORAGE	8TB

5.1 Διεξαγωγή συμπερασμάτων

Εάν συγκρίνουμε τις εγγραφές, είναι προφανές ότι τα μοντέλα αποθηκεύουν με τελείως διαφορετική προσέγγιση τα δεδομένα. Ενώ το μοντέλο flat αποθηκεύει τα σημεία ανά γραμμή (εγγραφή στον πίνακα γεγονότων), στο μοντέλο segment αποθηκεύουμε τα τμήματα στα οποία το αεροπλάνο παρέμεινε σταθερό με βάση το ρυθμό ανόδου/καθόδου και στο μοντέλο TrajMat όλα τα σημεία αποθηκεύονται σε μία γραμμή. Από τη σύγκριση των εγγραφών στους πίνακες γεγονότων για κάθε τροχιά (Πίνακας 5-1) φαίνεται συγκριτικά η μείωση του όγκου της πληροφορίας στο segment model. Για κάθε τροχιά, το μικρότερο σύνολο των εγγραφών (Πίνακας 5-2), το έχει το TrajMat. Με βάση όμως το σχήμα της αποθήκης δεδομένων του TrajMat(Εικόνα 4-12), η κάθε εγγραφή για μία τροχιά στο μοντέλο αυτό, περιέχει ακριβώς τα ίδια σημεία, όσες είναι και οι εγγραφές της ίδιας τροχιάς στο επίπεδο μοντέλο, σε μορφή συστοιχίας τύπου complex_point. Παρατίθεται και ο κώδικας (Κώδικας 5-1) σε γλώσσα SQL για την μέτρηση. Η μέτρηση έγινε μέσα από την εφαρμογή pgAdmin (DBMS) που διαχειρίζεται την βάση δεδομένων Postgres.

```

1  WITH CombinedCounts AS (
2      SELECT traj_id,
3             SUM(flat_model) AS flat_model,
4             SUM(segment_model) AS segment_model
5  FROM (
6      SELECT traj_id, COUNT(*) AS flat_model, 0 AS segment_model
7      FROM db_airflix.fact_table
8      GROUP BY traj_id
9      UNION ALL
10     SELECT traj_id, 0 AS flat_model, COUNT(*) AS segment_model
11     FROM db_airflix.segment_table
12     GROUP BY traj_id
13 ) AS subquery
14 GROUP BY traj_id
15 )
16 SELECT traj_id,
17        COALESCE(flat_model, 0) AS flat_model,
18        COALESCE(segment_model, 0) AS segment_model,
19        COALESCE(flat_model, 0) - COALESCE(segment_model, 0) AS count_difference,
20        (COALESCE(segment_model, 0) * 100) / COALESCE(flat_model, 0) AS move-
21        ment_percentage
22 FROM CombinedCounts;
```

Κώδικας 5-1: SQL για την σύγκριση των αποθηκευμένων σημείων ανά μοντέλο.

Trajectory Id	Εγγραφές στο Flat Model	Εγγραφές στο Segment Model	Διαφορά	Ποσοστό Πληθικότητας
79	7970	2025	5945	25.40 %
80	7476	1258	6218	16.82%
354	2364	666	1698	28%
379	8259	1428	6831	17%
357	4341	508	3833	11.70%

Πίνακας 5-1: Σύγκριση πληθικότητας μεταξύ flat και segment

Trajectory Id	Εγγραφές στο Flat Model	Εγγραφές στο Segment Model	Εγγραφές στο TrajMat Model
79	7970	2025	1
80	7476	1258	1
354	2364	666	1
379	8259	1428	1
357	4341	508	1

Πίνακας 5-2: Σύγκριση πληθικότητας ανά μοντέλο

Στον πίνακα Πίνακας 5-1 φαίνονται αθροιστικά τα σημεία που είναι αποθηκευμένα στα μοντέλα flat και segment ανά trajectory. Το trajectory με αναγνωριστικό «357» έχει συνολικά 4341 αποθηκευμένες εγγραφές στο επίπεδο μοντέλο και 508 εγγραφές στο τμηματικό. Η σύγκριση των δύο μοντέλων μας αποκάλυψε ότι ο λόγος του αθροίσματος των εγγραφών του μοντέλου flat προς το άθροισμά των εγγραφών του segment ενός trajectory δηλώνει το ποσοστό της μεταβλητότητας του αεροσκάφους ως προς τον βαθμό ανόδου/καθόδου.

5.2 Πράξεις OLAP

Η πρώτη δοκιμή θα είναι η αναπαράσταση ενός κύβου δεδομένων (data cube). Το ερώτημα της πρώτης δοκιμής αφορά την αποτύπωση των πληροφοριών, των συνολικά 335 πτήσεων, που είναι αποθηκευμένες στο κάθε μοντέλο. Στην πρώτη δοκιμή θα συγκρίνουμε τους χρόνους απόκρισης, κάθε μοντέλου, για την εκτύπωση όλων των πτήσεων συσχετίζοντας αυτές με δεδομένα από τις διαστάσεις. Το ερώτημα θα πλαισιώνεται με την ημερομηνία εκτέλεσης της πτήσης, χαρακτηριστικό κλήσης, αεροπορική εταιρία, τύπος αεροσκάφους, κατασκευαστής αεροσκάφους, αεροδρόμιο αναχώρησης και προορισμού και τέλος ώρα αναχώρησης και άφιξης στο αεροδρόμιο προορισμού (Πίνακας 5-3). Η πρώτη σύγκριση αφορά την ταχύτητα ανάκτησης των δεδομένων από τους πίνακες γεγονότων για τις παραπάνω πληροφορίες. Τα ερωτήματα στο κάθε μοντέλο γίνονται με

διαφορετικό τρόπο και παράγουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα. Ενδεικτικά στον Πίνακα 5-3 φαίνονται τα αποτελέσματα από τα ερωτήματα. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι, ο μέσος χρόνος (Πίνακας 5-4) απόκρισης για το, flat model είναι 2,5468 δευτερόλεπτα, για segment model είναι 1,085 δευτερόλεπτα και 0,77 δευτερόλεπτα για το TrajMat. Το segment model είναι 57% γρηγορότερο σε σχέση με το flat model, ενώ το TrajMat είναι 69% γρηγορότερο από το flat και 28% ταχύτερο από το segment.

Traj. Id	Ημ/νια	Callsign	Operator	Model	Manufacturer	Departure Airport	Dep Time	Arrival Airport	Arrival Time
440	2022-11-26	DLH5A V	Lufthansa	A321 231	Airbus	Frankfurt Airport EDDF	08:44:45	Athens Eleftherios Venizelos International Airport LGAV	11:08:15
389	2022-11-25	DLH2T X	Lufthansa	A321 231	Airbus	Frankfurt Airport EDDF	13:12:00	Athens Eleftherios Venizelos International Airport LGAV	15:09:28
342	2022-09-19	AEE3F T	Aegean Airlines	A321 231	Airbus	Frankfurt Airport EDDF	17:06:09	Athens Eleftherios Venizelos International Airport LGAV	19:12:33
318	2022-03-04	RYP7E D	Malta Air	Boeing 737-8AS (W)	Boeing	Frankfurt Airport EDDF	06:06:38	Athens Eleftherios Venizelos International Airport LGAV	08:23:26
411	2022-02-16	MEDV C1A	Saudi Armed Forces Medical Services	Bombardier Learjet 60 XR	Bombardier	Frankfurt Airport EDDF	14:00:42	Athens Eleftherios Venizelos International Airport LGAV	16:13:27
162	2018-04-19	N225F D	Bank Of Utah Trustee	GIV-X (G450)	Gulfstream Aerospace	Frankfurt Airport EDDF	18:13:45	Athens Eleftherios Venizelos International Airport LGAV	20:36:04

Πίνακας 5-3 Ενδεικτικά Αποτελέσματα Εκτύπωσης Πληροφοριών Πτήσεων

A/A	Flat Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)	Segment Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)	TrajMat Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)
1	3,140	1,235	0,288
2	2,147	0,805	0,774
3	2,437	1,241	0,214
4	2,840	0,996	0,737
5	2,428	1,185	0,694
6	2,956	1,252	1,104
7	2,418	1,208	0,788

8	2,408	0,916	1,067
9	2,455	1,153	0,927
10	2,408	1,029	0,723
11	2,579	0,825	0,941
12	2,505	0,704	1,085
13	2,419	1,230	0,767
14	2,491	1,121	1,128
15	2,509	1,104	0,726
16	2,412	1,450	0,680
17	2,439	1,061	0,912
18	2,394	1,156	0,917
19	2,398	1,220	0,372
20	3,153	0,880	0,673
Average	2,5468	1,08855	0,77585
Percentage		57,2 % γρηγορότερο από flat model	69.5% γρηγορότερο από flat model
			28,7% γρηγορότερο από segment model

Πίνακας 5-4: Χρόνοι απόκρισης ερωτήματος ανά μοντέλο

```

1 WITH RankedTimes AS (
2     SELECT
3         traj_id,
4         time_id,
5         origin,
6         destination,
7         aircraft,
8         ROW_NUMBER() OVER (
9             PARTITION BY traj_id
10            ORDER BY time_id ASC
11        ) AS rn
12     FROM
13         db_airflinx.fact_table
14 )
15 SELECT
16     t.full_date::date,
17     rt.traj_id,
18     tr.callsign,

```

```

19     ar.owner,
20     ar.model,
21     ar.manufacture_name,
22     ap.name as DEPARTURE,
23     ap.icao,
24     tr.firstseen::time as dep_time,
25     app.name as ARRIVAL,
26     app.icao,
27     tr.lastseen::time as arr_time
28 FROM RankedTimes rt
29 JOIN db_airflix.time_dim t ON rt.time_id=t.time_id
30 JOIN db_airflix.trajectories tr ON rt.traj_id=tr.tr_id
31 JOIN db_airflix.aircrafts ar ON rt.aircraft=ar.aircraft_id
32 JOIN db_airflix.airports ap ON rt.origin=ap.id
33 JOIN db_airflix.airports app ON rt.destination=app.id
34 WHERE rn = 1
35 ORDER BY t.full_date desc

```

Κώδικας 5-2: Ερώτημα ανάκτησης πληροφοριών πτήσης στο επίπεδο μοντέλο

Επεξήγηση ερωτήματος flat model (Κώδικας 5-2)

Η εξαγωγή των πτήσεων ανά ημέρα, από το επίπεδο μοντέλο είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Το χαρακτηριστικό της κάθε τροχιάς (trajectory id) αναφέρεται, ως ξένο κλειδί από την διάσταση Trajectory (Εικόνα 4-6), πολλές φορές στον πίνακα των γεγονότων, δηλαδή όσες και τα σημεία της τροχιάς του στις εγγραφές. Το χαρακτηριστικό της τροχιάς συσχετίζεται στον πίνακα των γεγονότων σε κάθε εγγραφή με το καταγεγραμμένο σημείο. Η εύρεση της κάθε πτήσης επιτυγχάνεται με την εξαγωγή του πρώτου σημείου της κάθε τροχιάς και η συσχέτιση του χρόνου από την διάσταση του χρόνου. Η δομή του μοντέλου επιβάλει χρήση συναρτήσεων της Postgres για την εξαγωγή του πρώτου σημείου της κάθε τροχιάς όπως:

- [1]. **ROW_NUMBER() Function** -> Η συγκεκριμένη συνάρτηση (γραμμή 8) αναθέτει ένα δείκτη (index) ξεκινώντας από το 1 σε κάθε εγγραφή μέσα σε κάθε κατανομή (**PARTITION BY traj_id** – γραμμή 9). Η εξαγωγή του πρώτου σημείου της κάθε τροχιάς επιτυγχάνεται με το (**where rn=1**) γραμμή 37
- [2]. **ORDER BY time_id ASC** -> Εξασφαλίζει ότι θα ανατεθεί ο δείκτης 1 στο πρώτο καταγεγραμμένο χρόνο (γραμμή 10) της κάθε τροχιάς (κατανομής) .
- [3]. **WITH RankedTimes CTE** -> Η έκφραση **WITH** στην Postgres λέγεται Common Table Expression (CTE) και δημιουργεί έναν προσωρινό πίνακα που ισχύει μόνο για τη διάρκεια του ερωτήματος. Στην προκειμένη φάση η χρήση του είναι ως φίλτρο για την επιλογή μόνο των εγγραφών που έχουν δείκτη 1 (rank = 1) από κάθε τροχιά.

- [4]. **JOIN** -> Συσχέτιση γεγονότων με τις διαστάσεις των Αεροδρομίων, Χρόνου και Αεροσκάφους. Ως ώρα αναχώρησης και αφίξεις χρησιμοποιούμε την συσχέτιση της χρονοσφραγίδας (timestamp) του firstseen, lastseen γνωρίσματος της διάστασης Trajectory

```
1 WITH RankedTimes AS (  
2     SELECT  
3         traj_id,  
4         start_time_id,  
5         origin,  
6         destination,  
7         aircraft,  
8         ROW_NUMBER() OVER (  
9             PARTITION BY traj_id  
10            ORDER BY start_time_id ASC  
11        ) AS rn  
12     FROM  
13         db_airflinx.segment_table  
14 )  
15 SELECT  
16     t.full_date::date,  
17     rt.traj_id,  
18     tr.callsign,  
19     ar.owner,  
20     ar.model,  
21     ar.manufacture_name,  
22     ap.name as DEPARTURE,  
23     ap.icao,  
24     tr.firstseen::time as dep_time,  
25     app.name as ARRIVAL,  
26     app.icao,  
27     tr.lastseen::time as arr_time  
28 FROM RankedTimes rt  
29 join db_airflinx.time_dim t on rt.start_time_id=t.time_id  
30 join db_airflinx.trajectories tr on rt.traj_id=tr.tr_id  
31 join db_airflinx.aircrafts ar on rt.aircraft=ar.aircraft_id  
32 join db_airflinx.airports ap on rt.origin=ap.id  
33 join db_airflinx.airports app on rt.destination=app.id  
34 WHERE rn = 1  
35 ORDER BY t.full_date desc;
```

Κώδικας 5-3: Ερώτημα ανάκτησης πληροφοριών πτήσης στο τμηματικό μοντέλο

Επεξήγηση ερωτήματος segment model (Κώδικας 5-3)

Με παρόμοιο τρόπο δημιουργήσαμε και το ερώτημα για το segment model. Το χαρακτηριστικό της κάθε τροχιάς (trajectory id) αναφέρεται ως ξένο κλειδί από την διάσταση Trajectory σε κάθε τμήμα, το οποίο όμως συσχετίζεται στον πίνακα των γεγονότων με δύο σημεία, το πρώτο και το τελευταίο σημείο του τμήματος.

- [1]. **ROW_NUMBER()** Function -> Η συγκεκριμένη συνάρτηση (γραμμή 8) αναθέτει ένα δείκτη (index) ξεκινώντας από το 1 σε κάθε εγγραφή μέσα σε κάθε κατανομή (**PARTITION BY traj_id** – γραμμή 9).

[2]. **ORDER BY start_time_id ASC** -> Εξασφαλίζει ότι θα ανατεθεί ο δείκτης 1 στο πρώτο καταγεγραμμένο χρόνο (γραμμή 10) του κάθε τμήματος (κατανομής) .

[3]. **WITH RankedTimes CTE** -> Η έκφραση **WITH** στην Postgres λέγεται Common Table Expression (CTE) και δημιουργεί έναν προσωρινό πίνακα που ισχύει μόνο για τη διάρκεια του ερωτήματος. Στην προκειμένη φάση η χρήση του είναι ως φίλτρο για την επιλογή μόνο των εγγραφών που έχουν δείκτη 1 (rank = 1) από κάθε τροχιά.

[4]. **JOIN** -> Συσχέτιση γεγονότων με τις διαστάσεις.

```
1  select
2      f.traj_id,
3      f.firstseen::date,
4      f.callsign,
5      ar.owner,
6      ar.model,
7      ar.manufacture_name,
8      ap.name as DEPARTURE,
9      ap.icao,
11     f.firstseen::time as dep_time,
12     app.name as ARRIVAL,
13     app.icao,
14     f.lastseen::time as arr_time
15 from db_airflinx.complex_flat_table f
16 join db_airflinx.aircrafts ar on f.aircraft=ar.aircraft_id
17 join db_airflinx.airports ap on f.origin=ap.id
18 join db_airflinx.airports app on f.destination=app.id
19 group by traj_id, ar.owner, ar.model, ar.manufacture_name, ap.name, app.name,
20          ap.icao, app.icao
21 order by firstseen desc
```

Κώδικας 5-4: Ερώτημα ανάκτησης πληροφοριών πτήσης στο TrajMat μοντέλο

Επεξήγηση ερωτήματος TrajMat model (Κώδικας 5-4)

Το ερώτημα για το TrajMat model είναι πιο απλό εφόσον το χαρακτηριστικό της κάθε τροχιάς (trajectory id) δεν αναφέρεται ως ξένο κλειδί από άλλη διάσταση. Η κάθε εγγραφή αναφέρεται σε μία και μόνο τροχιά, οπότε έχουμε ένα απλό ερώτημα.

1. **SELECT** -> Επιλογή όλων των απαραίτητων γνωρίσματος.
2. **ORDER BY firstseen DESC** ->Εξασφάλισαμε ότι θα εμφανιστούν οι πτήσεις από την πιο πρόσφατη προς την πιο παλαιότερη ημερολογιακά.
3. **GROUP BY** -> Ομαδοποιεί τα δεδομένα πρώτα ως προς το χαρακτηριστικό της τροχιάς (trajectory id), έπειτα κατά αεροπορική εταιρία, μοντέλο αεροσκάφους κ.ο.κ.
4. **JOIN** -> Συσχέτιση γεγονότων με τις διαστάσεις.

Με τα επόμενα τρία ερωτήματα θα ανακτήσουμε από την αποθήκη δεδομένων τις πτήσεις 1) ανά ημέρα, 2) πτήσεις ανά μήνα και 3) πτήσεις ανά χρόνο (Πίνακας 5-5). Τα αποτελέσματα ήταν ίδια σε όλα τα μοντέλα, με τους χρόνους απόκρισης των ερωτημάτων να ποικίλουν. Συγκεκριμένα στο επίπεδο μοντέλο, ο μέσος χρόνος απόκρισης ήταν 1,16 - 1,234 - 1,516 δευτερόλεπτα αντίστοιχα στο κάθε ερώτημα όπως φαίνεται με χρώμα κόκκινο στον Πίνακα 5-6. Το επίπεδο μοντέλο ήταν 14% πιο γρήγορο από το τμηματικό μοντέλο μόνο στο δεύτερο ερώτημα, ενώ στα άλλα ήταν το πιο αργό. Οι χρόνοι επίδοσης του τμηματικού μοντέλου ήταν 0,923 - 1,439 - 1,408 στα ερωτήματα αντίστοιχα (Πίνακας 5-6 με πράσινο χρώμα) ενώ έδειξε ότι είναι ταχύτερο κατά 20% και 7% στο πρώτο και τρίτο ερώτημα μόνο από το επίπεδο μοντέλο. Το περίπλοκο μοντέλο TrajMat φαίνεται να είναι και τα ταχύτερο σε αυτά τα ερωτήματα με χρόνους 0,552 - 0,964 - 1,126 (Πίνακας 5-6 με πράσινο χρώμα) αντίστοιχα. Ποσοστιαία ήταν γρηγορότερο από το επίπεδο κατά 52% - 21% - 25% γρηγορότερο στο κάθε ερώτημα αντίστοιχα σε σχέση με το επίπεδο μοντέλο και κατά 40% - 33% - 20% αντίστοιχα από το τμηματικό μοντέλο.

Πτήσεις Ανά Ημέρα	
Day	Flights
2018-04-07	2
2018-04-09	5
2018-04-10	3
2018-04-11	1
2018-04-12	1
2018-04-13	2
2018-04-14	4
2018-04-15	3
2018-04-16	2
2018-04-17	4
2018-04-18	4
2018-04-19	5
2018-04-20	3
2022-01-02	2
2022-01-06	1
2022-01-08	1
2022-01-12	1
2022-01-15	1
2022-01-17	1
2022-01-20	2
2022-01-23	1
2022-01-27	2
2022-01-28	1
2022-01-31	1
2022-02-05	1

Πτήσεις Ανά Μήνα		
Year	Month	Flights
2017	1	2
2017	3	1
2017	4	3
2017	5	6
2017	6	3
2017	7	3
2017	9	4
2018	1	48
2018	2	37
2018	3	24
2018	4	54
2022	1	14
2022	2	15
2022	3	15
2022	4	24
2022	5	16
2022	6	11
2022	7	7
2022	8	5
2022	9	10
2022	10	12
2022	11	21

Πτήσεις Ανά Χρόνο	
Year	Flights
2017	22
2018	163
2022	150

Πίνακας 5-5: Πτήσεις ανά ημέρα, μήνα, χρόνο

	Πτήσεις Ανά Ημέρα			Πτήσεις Ανά Μήνα			Πτήσεις Ανά Χρονιά		
	Flat Model	Segment Model	TrajMat Model	Flat Model	Segment Model	TrajMat Model	Flat Model	Segment Model	TrajMat Model
1	0,844	0,184	0,258	0,958	0,870	0,744	1,169	2,121	0,255
2	0,735	0,738	1,692	1,182	0,812	0,891	1,774	0,398	1,364
3	0,718	0,745	0,258	1,040	2,506	1,281	2,197	0,398	0,814
4	2,038	0,738	0,216	1,176	0,191	0,408	0,863	1,896	2,455
5	1,842	2,052	0,181	1,005	0,810	1,877	2,037	2,743	0,732
6	0,806	0,194	0,696	0,983	1,910	0,263	1,721	1,343	1,028
7	0,758	0,642	0,270	0,923	0,326	0,365	0,922	1,466	1,943
8	1,342	1,679	0,601	0,965	0,286	1,287	1,075	1,987	0,955
9	1,649	0,228	0,262	1,877	1,411	1,704	1,987	0,379	0,950
10	0,691	1,692	0,263	0,903	2,577	0,735	1,040	1,013	1,020
11	2,196	0,184	0,255	1,611	1,918	0,358	2,696	1,634	0,822
12	0,628	0,719	1,875	1,992	0,837	0,739	0,951	0,893	0,796
13	1,843	1,180	0,691	0,941	0,979	1,559	1,095	0,903	0,385
14	0,822	1,628	0,624	0,967	0,842	0,750	1,450	1,394	1,333
15	1,712	0,602	0,261	1,064	2,501	0,456	1,307	1,896	0,986
16	0,936	2,034	0,234	1,027	2,403	2,719	0,933	2,612	1,044
17	1,232	1,124	0,901	2,028	0,838	1,945	0,951	0,194	1,865
18	0,945	1,147	0,248	1,279	2,028	0,119	1,476	1,970	2,017
19	0,805	0,241	0,185	1,403	2,075	0,322	2,269	2,007	0,817
20	0,648	0,715	1,073	1,354	2,665	0,765	2,412	0,915	0,935
Average	1,16	0,923	0,552	1,234	1,439	0,964	1,516	1,408	1,126
	-	20%	52%	14%	-	21%	-	7%	25%
	-	-	40%	-	-	33%	-	-	20%

Πίνακας 5-6: Συγκρίσεις χρόνων απόκρισης των ερωτημάτων ανά μοντέλο

5.3 Κατανεμητές Συναρτήσεις Συγκέντρωσης

Οι παρακάτω συγκρίσεις αφορούν την αναζήτηση μέγιστων και ελάχιστων ταχυτήτων και ύψους που καταγράφηκε ανά τροχιά μεταξύ των μοντέλων. Οι συγκρίσεις κατανεμημένων συναρτήσεων συγκέντρωσης (**distributive aggregation functions**) είναι αρκετά ενδιαφέρουσες διότι η εύρεση των ελάχιστων και μέγιστων τιμών απαιτεί την προσπέλαση όλων των δεδομένων της κάθε τροχιάς. Σε κάθε τροχιά αεροσκάφους όμως, η μέγιστη ταχύτητα δεν είναι καταγεγραμμένη μόνο μία φορά. Η μέγιστη, ελάχιστη ταχύτητα δηλαδή έχει διάρκεια και αυτό είναι φυσικό, εφόσον το αεροσκάφος από την στιγμή που την απέκτησε την διατήρησε για κάποιο χρονικό διάστημα. Στα ερωτήματα που ακολουθούν, σκοπός είναι να βρεθεί η πρώτη φορά που εμφανίστηκε η μέγιστη ή ελάχιστη τιμή που καταγράφηκε. Αυτό συνεπάγεται ότι με τον έλεγχο των μοντέλων ως προς την ορθότητα των αποτελεσμάτων, θα πρέπει να εμφανίζουν το ίδιο σημείο και όχι διαφορετικό.

Η σύνδεση των γεγονότων μέσω των διαστάσεων, όπως ο χρόνος και ο εναέριος χώρος (Airspace), στην εύρεση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών ανά τροχιά θα είναι ιδιαίτερα απαιτητική, μιας και όπως αναφέραμε οι τιμές αυτές είναι καταγεγραμμένες σε πάρα πάνω από μία εγγραφές.

5.3.1 Εύρεση max speed ανά trajectory

Η πρώτη δοκιμή είναι η εύρεση της μέγιστης ταχύτητας που καταγράφηκε γενικά και θα εξεταστεί εάν τα ερωτήματα στο κάθε μοντέλο μας δώσουν τις ίδιες τιμές. Ο κώδικας SQL (Κώδικας 5-5) αναζητά την μέγιστη ταχύτητα για κάθε trajectory στο μοντέλο αντίστοιχα. Σκοπός της σύγκρισης, εκτός από την ορθότητα των αποτελεσμάτων, είναι και η απόκριση του χρόνου των ερωτημάτων. Από τα αποτελέσματα των μοντέλων προκύπτει ότι, στο Flat και TrajMat model μπορούμε να ενσωματώσουμε, την απόσταση και το συνολικό χρόνο μετά την απογείωση, όπου το αεροσκάφος απέκτησε την μέγιστη ταχύτητα, ενώ στο segment model έχουμε το τμήμα κατά το οποίο επιτεύχθηκε η μέγιστη ταχύτητα. Πιο ενδιαφέρον όμως παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του TrajMat model όπου σε αυτό το ερώτημα είναι ακριβώς ίδια με του flat model αλλά η απόκριση των αποτελεσμάτων είναι πάρα πολύ αργή σε σχέση με το flat model. Το αρνητικό χαρακτηριστικό του μοντέλου TrajMat, οφείλεται όπως θα δούμε και παρακάτω, στο γεγονός ότι θα πρέπει να μετατρέψουμε τις τιμές της πλειάδας `complex_point[]` σε εγγραφές.

```
1 WITH MaxSpeedPoints AS (  
2     SELECT *,  
3     ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY traj_id ORDER BY groundspeed DESC) AS rank  
4     FROM db_airflix.fact_table  
5 )  
6 SELECT traj_id,  
7     ST_FORCE2D(point), *  
8     t.full_date,  
9     groundspeed,  
10    geoaltitude,  
12    (total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS HOUR_AFTER_DEP,  
13    (total_distance / 1000)::numeric(10,3) AS KMS_AFTER_DEP,  
14    C.model,  
15    C.owner,  
16    A.designator,  
17    A.type  
18 FROM MaxSpeedPoints  
19 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS t ON MaxSpeedPoints.time_id = t.time_id  
20 INNER JOIN db_airflix.aircrafts AS C ON MaxSpeedPoints.aircraft=C.aircraft_id  
21 INNER JOIN db_airflix.airspace AS A ON MaxSpeedPoints.airspace = A.id  
22 WHERE rank = 1;
```

Κώδικας 5-5: Ο κώδικας SQL Flat Model για αναζήτηση max speed ανά trajectory

Επεξήγηση ερωτήματος flat model (Κώδικας 5-5)

Με την εύρεση της μέγιστης ταχύτητας του trajectory (γραμμές κώδικα 1 έως 5) στην αναζήτηση προσθέτουμε την εύρεση του ύψους που βρισκόταν η πτήση (γραμμή 11) και τον χρόνο που την απέκτησε (γραμμή 9). Η εύρεση της απόστασης σε χιλιόμετρα που είχε διανύσει από το αεροδρόμιο απογείωσης το αεροσκάφος γίνεται με την χρήση του παρακάτω κώδικα:

[1]. (total_distance / 1000)::numeric(10,3) AS KMs_AFTER_DEP και της συνολικής χρονικής διάρκειας της πτήσης από την απογείωση με αναγωγή σε λεπτά:

[2]. (total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS HOUR_AFTER_DEP

Τέλος με **INNER JOIN** προσθέτουμε τα δεδομένα όπως ο τύπος του αεροσκάφους, της εταιρίας που το έχει καθώς και σε ποιο εναέριο χώρο απέκτησε την ταχύτητα. Ένα μέρος των αποτελεσμάτων φαίνεται στον Πίνακα 5-7.

```
1 WITH MaxSpeedPoints AS (  
2     SELECT *,  
3         ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY traj_id ORDER BY max_speed DESC) AS rank  
4     FROM db_airflix.segment_table  
5 )  
6 SELECT traj_id,  
7     ST_MakeLine(start_point, stop_point),  
8     t.full_date AS START_TIME,  
9     s.full_date AS STOP_TIME,  
10    max_speed,  
11    C.model,  
12    C.owner,  
13    A.designator,  
14    A.type  
15 FROM MaxSpeedPoints  
16 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS t ON MAXSpeedPoints.start_time_id = t.time_id  
17 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS s ON MAXSpeedPoints.stop_time_id = s.time_id  
18 INNER JOIN db_airflix.aircrafts AS C ON MaxSpeedPoints.aircraft = C.aircraft_id  
19 INNER JOIN db_airflix.airspace AS A ON MaxSpeedPoints.airspace = A.id  
20 WHERE rank = 1;
```

Κώδικας 5-6: SQL κώδικας για αναζήτηση max speed ανά trajectory στο Segment model

Επεξήγηση ερωτήματος segment model (Κώδικας 5-6)

Με την εύρεση της μέγιστης ταχύτητας του trajectory (γραμμές κώδικα 1 έως 5) στην αναζήτηση αυτού του μοντέλου βρίσκουμε και το τμήμα (segment). Το κάθε τμήμα μπορεί να κατασκευαστεί δημιουργώντας την γραμμή που αποτελείται από τα σημεία start_point και stop_point που είναι αποθηκευμένα στον πίνακα γεγονότων ST_MakeLine(start_point, stop_point). Η εσωτερική συνάρτηση της PostGIS ST_MakeLine δέχεται δύο σημεία (points) ως παραμέτρους και επιστρέφει την γραμμή

μεταξύ των δύο σημείων. Τα αποτελέσματα του ερωτήματος φαίνονται στον πίνακα Πίνακας 5-8.

```
21  WITH RankedPoints AS (  
22      SELECT  
23          cf.traj_id,  
24          (cp).groundspeed AS speed,  
25          st_zmax((cp).point) AS geoaltitude,  
26          (cp).timestamp AS point_timestamp,  
27          (cp).airspace AS airspace_id,  
28          ((cp).total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS t_time,  
29          ((cp).total_distance / 1000)::numeric(10,2) AS t_d,  
30          td.full_date,  
31          ad.model,  
32          ad.owner,  
33          asd.designator AS airspace_name,  
34          asd.type AS airspace_type,  
35          ROW_NUMBER() OVER (  
36              PARTITION BY cf.traj_id  
37              ORDER BY (cp).groundspeed DESC  
38          ) AS rn  
39      FROM  
40          db_airflix.complex_flat_table cf  
41      JOIN  
42          UNNEST(cf.complex_points) AS cp (complex_point) ON TRUE  
43      JOIN  
44          db_airflix.time_dim td ON (cp).timestamp = td.time_id  
45      JOIN  
46          db_airflix.aircrafts ad ON cf.aircraft = ad.aircraft_id  
47      JOIN  
48          db_airflix.airspace asd ON (cp).airspace = asd.id  
49  )  
50  SELECT  
51      traj_id,  
52      speed AS max_speed,  
53      full_date,  
54      geoaltitude,  
55      t_time,  
56      t_d,  
57      model,  
58      owner,  
59      airspace_name,  
60      airspace_type  
61  FROM  
62      RankedPoints  
63  WHERE  
64      rn = 1  
65  ORDER BY  
66      traj_id;
```

Κώδικας 5-7: SQLερώτημα για την αναζήτηση max speed ανά trajectory στο TrajMat model

Επεξήγηση ερωτήματος TrajMat model (Κώδικας 5-7)

Με την χρήση της εντολής από την Postgres “**WITH rankedpoints AS**” (γραμμή 1), ορίζουμε ένα προσωρινό σύνολο δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει τον υπολογισμό της

μέγιστης ταχύτητας για τα δεδομένα μας. Το δύσκολο κομμάτι είναι στο να «ξεδιπλώσουμε» τις αποθηκευμένες τιμές του πίνακα(array) `complex_points[]` και να μετατρέψουμε τα στοιχεία σε ξεχωριστές γραμμές. Αυτό επιτυγχάνετε με την εντολή `UNNEST` (γραμμή 42). Η εντολή αυτή χρησιμοποιήθηκε για να μετατρέψει τον πίνακα σε ξεχωριστές γραμμές όπου το καθένα εμφανίζεται ως ξεχωριστή γραμμή του αποτελέσματος. Ο υπόλοιπος κώδικας είναι ο ίδιος με του flat μοντέλου.

Traj.ID	ΩΡΑ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ (knots)	ΥΨΟΣ (feet)	ΩΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ Α/Γ (hours)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ Α/Γ (kilometers)	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΝΑΕΡΙΟΣ ΧΩΡΟΣ	
79	29/6/2017 18:28	513	32150	2,01	2254,078	A321 231	Aegean Airlines	ATHINAI FIR	FIR
80	7/5/2017 13:32	537	35400	1,87	2427,147	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR	FIR
81	26/4/2017 13:53	492	28700	2,02	2737,656	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR	FIR
82	27/7/2017 8:55	536	36050	0,63	804,997	A321 231	Lufthansa	MILANO FIR	FIR
83	13/1/2017 13:49	484	33575	0,61	977,645	A321 231	Lufthansa	WIEN FIR	FIR

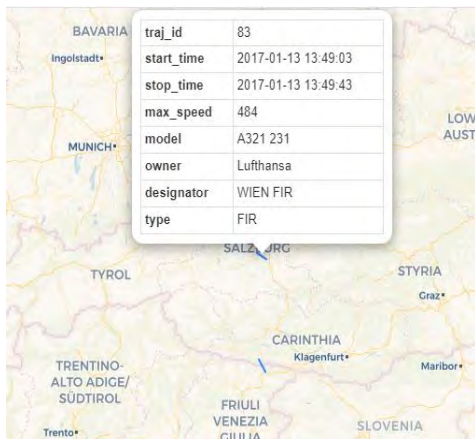
Πίνακας 5-7: Πίνακας αποτελεσμάτων Flat, TrajMat Model max speed ανά trajectory.

Traj.ID	ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΩΡΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΝΑΕΡΙΟΣ ΧΩΡΟΣ	
79	29/6/2017 18:28	29/6/2017 18:28	513	A321 231	Aegean Airlines	ATHINAI FIR	FIR
80	7/5/2017 13:32	7/5/2017 13:32	537	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR	FIR
81	26/4/2017 13:52	26/4/2017 13:52	492	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR	FIR
82	27/7/2017 8:55	27/7/2017 8:55	536	A321 231	Lufthansa	WIEN FIR	FIR
83	13/1/2017 13:49	13/1/2017 13:49	484	A321 231	Lufthansa	WIEN FIR	FIR

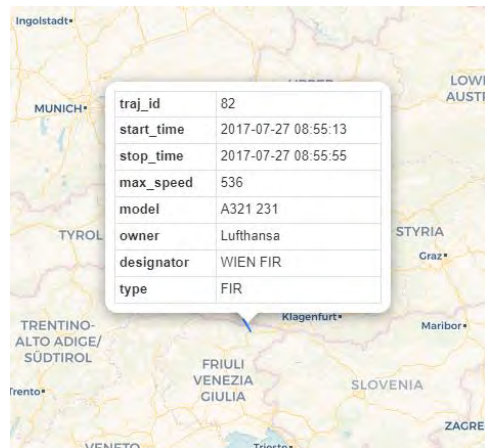
Πίνακας 5-8: Πίνακας αποτελεσμάτων Segment Model max speed ανά trajectory

Στους παραπάνω πίνακες φαίνονται τα αποτελέσματα των ερωτημάτων για τις ίδιες τροχιές (στήλη **traj_id**) και από τις στήλες **ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ** έχουμε ακριβώς τις ίδιες τιμές ως αποτέλεσμα στην αναζήτηση της μέγιστης ταχύτητας. Στον πίνακα του flat model και TrajMat έχουμε την στήλη του ύψους (σε πόδια - feet) ενώ η στήλη **ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ Α/Γ (απογείωση)** περιγράφει σε χιλιόμετρα την απόσταση από το αεροδρόμιο απογείωσης στο συγκεκριμένο σημείο.

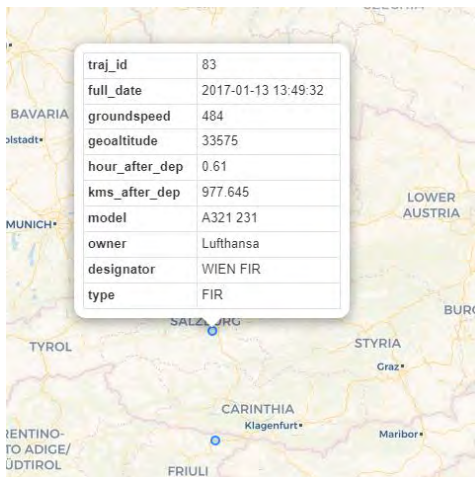
Η αποτύπωση των γεωμετριών σε χάρτη, ενδεικτικά των τροχιών 83 και 82, που το αεροσκάφος απέκτησε την μέγιστη ταχύτητα φαίνονται στις Εικόνες Εικόνα 5-1,Εικόνα 5-2Εικόνα 5-3Εικόνα 5-4. Στις παρακάτω εικόνες αποτυπώνεται η γεωμετρία του segment model (εικόνεςΕικόνα 5-1,Εικόνα 5-2) ενώ στις (εικόνεςΕικόνα 5-3,Εικόνα 5-4) αποτυπώνεται το σημείο της μέγιστης ταχύτητας για το flat model και TrajMat model.



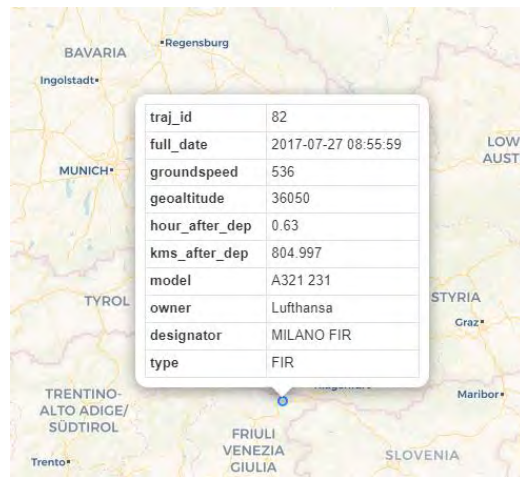
Εικόνα 5-1 Αποτύπωση σε χάρτη του τμήματος με την μεγαλύτερη ταχύτητα της τροχιά «83»



Εικόνα 5-2 Αποτύπωση σε χάρτη του τμήματος με την μεγαλύτερη ταχύτητα της τροχιά «82»



Εικόνα 5-3 Αποτύπωση σε χάρτη του σημείου με την μεγαλύτερη ταχύτητα της τροχιά «83»



Εικόνα 5-4 Αποτύπωση σε χάρτη του σημείου με την μεγαλύτερη ταχύτητα της τροχιά «82»

A/A	Flat Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)	Segment Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)	TrajMat Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)
1	5,1	0,964	19,262
2	3,9	2,948	16,846
3	2,463	1,019	16,678
4	1,9	0,748	16,668
5	2,4	2,917	16,824
6	2,6	0,847	16,808
7	2,02	1.030	16,665
8	2,4	1.033	16,707
9	2,01	0.751	16,684
10	2,004	0.927	16,727
11	2,00	1.040	16,216

12	1,9	0.820	16,974
13	2,1	0.955	17,692
14	2,0	0.822	16,295
15	2,3	0.985	16,642
16	2,0	0.848	16,621
17	2,8	0.756	16,310
18	2,581	0.744	16,770
19	2,4	0.869	17,369
20	2,4	1.028	16,277
Avarage	2,349	1,105	16,852
Percent-age		51 % γρηγορότερο από Flat	
		93% γρηγορότερο από TrajMat	

Πίνακας 5-9: Συγκρίσεων χρόνου απόκρισης εύρεσης max speed ανά μοντέλο

Συμπεράσματα συγκρίσεων των χρόνων απόκρισης των ερωτημάτων στον Πίνακα 5-9 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..** Το μοντέλο segment μπορεί εν μέρει να συμπίπτει την πληροφορία αλλά δεν χάνει την εγκυρότητα των πληροφοριών. Επίσης το μοντέλο segment είναι πιο γρήγορο στην αναζήτηση σε σχέση με το χρόνο απόκρισης των άλλων δύο μοντέλων. Στην συγκεκριμένη σύγκριση το μοντέλο TrajMat είναι πολύ αργό λόγω της δομής των δεδομένων αλλά προσφέρει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με τα άλλα μοντέλα.

5.3.2 Εύρεση min speed ανά trajectory

Η δεύτερη δοκιμή είναι η αναζήτηση της ελάχιστης ταχύτητας και όπως στην πρώτη δοκιμή, αναμένουμε τα μοντέλα να μας δώσουν τις ίδιες τιμές. Ο κώδικας SQL (Κώδικας 5-8,Κώδικας 5-9,Κώδικας 5-10) αναζητά την ελάχιστη ταχύτητα για κάθε trajectory στο flat, segment και TrajMat model αντίστοιχα. Με τους πίνακες (Πίνακας 5-10Πίνακας 5-11,Πίνακας 5-12) θα συγκρίνουμε τις δοκιμές μας.

```

1  WITH MinSpeedPoints AS (
2      SELECT *,
3      ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY traj_id ORDER BY groundspeed ASC) AS rank
4      FROM db_airflix.fact_table
5      WHERE groundspeed > 0 AND onground = false
6  )
7  SELECT traj_id,
8      ST_FORCE2D(point),
9      t.full_date,
10     groundspeed,
11     geoaltitude,
12     (total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS HOUR_AFTER_DEP,
13     (total_distance / 1000)::numeric(10,3) AS KMS_AFTER_DEP,
14     C.model,
15     C.owner,

```

```

16     A.designator,
17     A.type
18 FROM MinSpeedPoints
19 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS t ON MinSpeedPoints.time_id = t.time_id
20 INNER JOIN db_airflix.aircrafts AS C ON MinSpeedPoints.aircraft = C.aircraft_id
21 INNER JOIN db_airflix.airspace AS A ON MinSpeedPoints.airspace = A.id
22 WHERE rank = 1;

```

Κώδικας 5-8: Ο κώδικας SQL Flat Model για αναζήτηση min speed ανά trajectory

Επεξήγηση ερωτήματος flat model (Κώδικας 5-8)

Με την εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας του trajectory (γραμμές κώδικα 1 έως 5) στην αναζήτηση προσθέτουμε την εύρεση του ύψους που βρισκόταν η πτήση (γραμμή 11) και τον χρόνο που την απέκτησε (γραμμή 9). Η εύρεση της απόστασης σε χιλιόμετρα που είχε διανύσει από το αεροδρόμιο απογείωσης το αεροσκάφος γίνεται με την χρήση της εντολής (total_distance / 1000)::numeric(10,3) AS KMs_AFTER_DEP και της συνολικής χρονικής διάρκειας της πτήσης από την απογείωση με αναγωγή σε λεπτά με την εντολή (total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS HOUR_AFTER_DEP.

Τέλος με **INNER JOIN** προσθέτουμε τα δεδομένα όπως ο τύπος του αεροσκάφους, της εταιρίας που το έχει καθώς και σε ποιο εναέριο χώρο απέκτησε την ταχύτητα. Ένα μέρος των αποτελεσμάτων φαίνεται στον Πίνακα 5-10.

```

1 WITH MaxSpeedPoints AS (
2     SELECT *,
3         ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY traj_id ORDER BY min_speed ASC) AS rank
4     FROM db_airflix.segment_table
5     WHERE min_speed >= 0
6 )
7 SELECT traj_id,
8     ST_MakeLine(start_point, stop_point),
9     t.full_date,
10    s.full_date,
11    min_speed,
12    start_track::numeric(3,0),
13    stop_track::numeric(3,0),
14    start_geoaltitude,
15    stop_geoaltitude,
16    C.model,
17    C.owner,
18    A.designator,
19    A.type
20 FROM MaxSpeedPoints
21 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS t ON MAXSpeedPoints.start_time_id = t.time_id
22 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS s ON MAXSpeedPoints.stop_time_id = s.time_id
23 INNER JOIN db_airflix.aircrafts AS C ON MaxSpeedPoints.aircraft = C.aircraft_id
24 INNER JOIN db_airflix.airspace AS A ON MaxSpeedPoints.airspace = A.id
25 WHERE rank = 1;

```

Κώδικας 5-9: Ο κώδικας SQL Segment Model για αναζήτηση min speed ανά trajectory

Επεξήγηση ερωτήματος segment model (Κώδικας 5-9)

Με την εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας του trajectory (γραμμές κώδικα 1 έως 5) στην αναζήτηση αυτού του μοντέλου βρίσκουμε και το τμήμα (segment). Το κάθε τμήμα μπορεί να κατασκευαστεί δημιουργώντας την γραμμή που αποτελείται από τα σημεία *start_point* και *stop_point* που είναι αποθηκευμένα στον πίνακα γεγονότων *ST_MakeLine(start_point, stop_point)*. Η εσωτερική συνάρτηση της PostGIS *ST_MakeLine* δέχεται δύο σημεία (points) ως παραμέτρους και επιστρέφει την γραμμή μεταξύ των δύο σημείων. Τα αποτελέσματα του ερωτήματος φαίνονται στον Πίνακας 5-11.

```
1  WITH RankedPoints AS (  
2      SELECT  
3          cf.traj_id,  
4          (cp).groundspeed AS speed,  
5          st_zmax((cp).point) AS geoaltitude,  
6          (cp).timestamp AS point_timestamp,  
7          (cp).airspace AS airspace_id,  
8          ((cp).total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS t_time,  
9          ((cp).total_distance / 1000)::numeric(10,2) AS t_d,  
10         td.full_date,  
11         ad.model,  
12         ad.owner,  
13         asd.designator AS airspace_name,  
14         asd.type AS airspace_type,  
15         ROW_NUMBER() OVER (  
16             PARTITION BY cf.traj_id  
17             ORDER BY (cp).groundspeed DESC  
18         ) AS rn  
19     FROM  
20         db_airflix.complex_flat_table cf  
21     JOIN  
22         UNNEST(cf.complex_points) AS cp (complex_point) ON (cp).groundspeed > 0  
23     JOIN  
24         db_airflix.time_dim td ON (cp).timestamp = td.time_id  
25     JOIN  
26         db_airflix.aircrafts ad ON cf.aircraft = ad.aircraft_id  
27     JOIN  
28         db_airflix.airspace asd ON (cp).airspace = asd.id  
29 )  
30     SELECT  
31         traj_id,  
32         speed AS max_speed,  
33         full_date,  
34         geoaltitude,  
35         t_time,  
36         t_d,  
37         model,  
38         owner,  
39         airspace_name,  
40         airspace_type  
41     FROM  
42         RankedPoints  
43     WHERE
```

```

44     rn = 1
45 ORDER BY
46     traj_id;

```

Κώδικας 5-10: Ο κώδικας SQL TrajMat Model για αναζήτηση min speed ανά trajectory

Επεξήγηση ερωτήματος flat model (Κώδικας 5-10)

Η εντολή UNNEST μετατρέπει τα στοιχεία του πίνακα (array) complex_point σε ξεχωριστές γραμμές αποκλείοντας όμως τις ταχύτητες με μηδενική τιμή (γραμμές κώδικα 1-29). Με την απόδοση ενός ευρετηρίου (rank) στις εγγραφές οι οποίες είναι διατεταγμένες (ORDER BY γραμμή 17) από την μικρότερη προς την μεγαλύτερη, γίνεται εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας του trajectory (γραμμές κώδικα 43 έως 44). Στην αναζήτηση προσθέτουμε την εύρεση του ύψους που βρισκόταν η πτήση (γραμμή 5) και τον χρόνο που την απέκτησε (γραμμή 8). Η εύρεση της απόστασης σε χιλιόμετρα που είχε διανύσει από το αεροδρόμιο απογείωσης το αεροσκάφος γίνεται με την χρήση του παρακάτω κώδικα:

[1].(total_distance / 1000)::numeric(10,3) AS KMs_AFTER_DEP (γραμμή 9) και της συνολικής χρονικής διάρκειας της πτήσης από την απογείωση με αναγωγή σε λεπτά:

[2].(total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS HOUR_AFTER_DEP

Traj.ID	ΩΡΑ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ (knots)	ΥΨΟΣ (feet)	ΩΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ Α/Γ (hours)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ Α/Γ (kilometers)	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΝΑΕΡΙΟΣ ΧΩΡΟΣ	
79	29/6/2017 18:43	155	1975	2,25	2708,18	A321 231	Aegean Air- lines	ATHINAI FIR	FIR
80	7/5/2017 13:52	166	3925	2,22	2981,22	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR	FIR
81	26/4/2017 11:52	168	1275	0,01	0,166	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR
82	27/7/2017 8:18	166	1750	0,01	36,773	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR
83	13/1/2017 13:13	167	1375	0,01	0,279	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR

Πίνακας 5-10: Flat Model min speed ανά trajectory

		ΩΡΑ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ	ΑΡΧΙΚΟ	ΤΕΛΙΚΟ				
Traj.ID	ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ	ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΥΨΟΣ	ΥΨΟΣ	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΝΑΕΡΙΟΣ ΧΩΡΟΣ	
	ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΤΜΗΜΑΤΟΣ	(knots)	ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΤΜΗΜΑΤΟΣ				
79	29/6/2017 18:43	29/6/2017 18:43	155	2000	2000	A321 231	Aegean Air- lines	ATHINAI FIR	FIR
80	7/5/2017 13:52	7/5/2017 13:52	167	4000	4000	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR	FIR
81	26/4/2017 11:52	26/4/2017 11:52	168	1150	1150	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR
82	27/7/2017 8:18	27/7/2017 8:18	166	1250	1375	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR
83	13/1/2017 13:13	13/1/2017 13:13	167	1450	1450	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR

Πίνακας 5-11: Segment Model min speed ανά trajectory

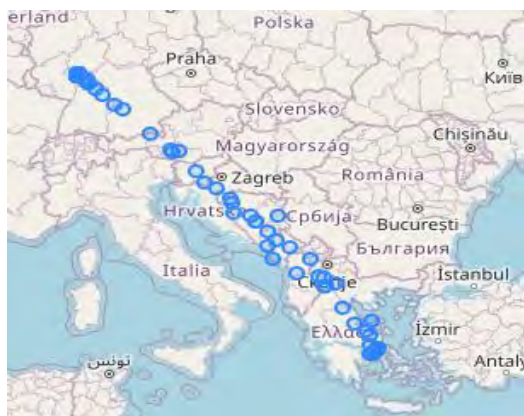
Traj.ID	ΩΡΑ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΥΨΟΣ (feet)	ΩΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ Α/Γ (hours)	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ Α/Γ (kilometers)	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΝΑΕΡΙΟΣ ΧΩΡΟΣ	
79	29/6/2017 18:43	155	1975	2,25	2708,18	A321 231	Aegean Air-lines	ATHINAI FIR	FIR
80	7/5/2017 13:52	166	3925	2,22	2981,22	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR	FIR
81	26/4/2017 11:52	168	1275	0,01	0,35	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR
82	27/7/2017 8:18	166	1750	0,01	37,26	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR
83	13/1/2017 13:13	167	1375	0,01	0,21	A321 231	Lufthansa	LANGEN FIR	FIR

Πίνακας 5-12 αποτελεσμάτων TrajMat Model min speed ανά trajectory

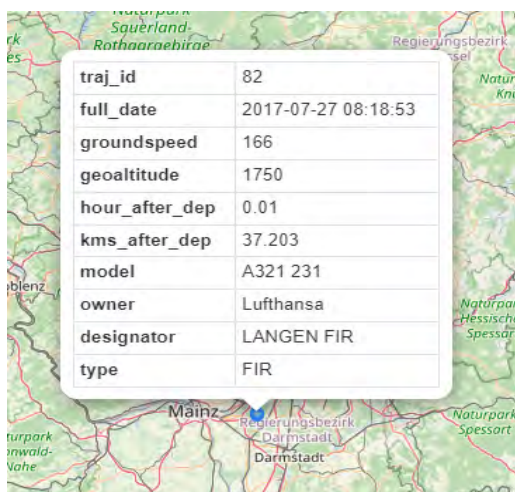
Στους παραπάνω πίνακες αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των ερωτημάτων συγκρίνοντας τέσσερεις τροχίες από το κάθε μοντέλο. Η στήλη **traj_id** υποδεικνύει τον αριθμό της τροχιάς και οι στήλες *ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ* (Πίνακας 5-10, Πίνακας 5-11, Πίνακας 5-12) εμφανίζουν την ελάχιστη ταχύτητα στο flat, segment και TrajMat model αντίστοιχα. Στον πίνακα του flat και TrajMat model υπάρχει η στήλη του ύψους (σε πόδια - feet) ενώ η στήλη *ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ Α/Γ* περιγράφει σε χιλιόμετρα την απόσταση από το αεροδρόμιο απογείωσης στο συγκεκριμένο σημείο.

Παρατηρούμε ότι έχουμε σχεδόν τις ίδιες τιμές, με μία απόκλιση του 1 Knot (Μονάδα μέτρηση της ταχύτητας) στο trajectory 80 μεταξύ των μοντέλων flat - segment. Επίσης, στο TrajMat, ενώ οι ελάχιστες ταχύτητές είναι ακριβώς ίδιες σε σχέση με το flat model, παρατηρούμε διαφορές στις τροχίες 81,83 ως προς την απόσταση από την απογείωση που καταγράφηκε η ελάχιστη ταχύτητα.

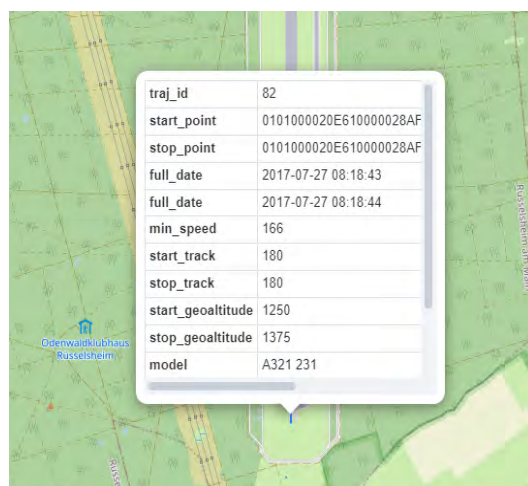
Η αποτύπωση των γεωμετριών σε χάρτη, ενδεικτικά της τροχιάς 82, που το αεροσκάφος απέκτησε την ελάχιστη ταχύτητα φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 5-6 Εικόνα 5-7. Στην Εικόνα 5-5 φαίνονται όλα τα σημεία στο χάρτη με την ελάχιστη ταχύτητα όλων των τροχιών και προκύπτει ότι οι ελάχιστες ταχύτητες είχαν τα αεροσκάφη σε τελείως ακαθόριστους χρόνους και σημεία και όχι κοντά στην απογείωση ή την προσγείωση.



Εικόνα 5-5: Αποτύπωση σε χάρτη όλων των σημείων με ελάχιστη ταχύτητα



Εικόνα 5-6 Αποτύπωση σημείου με ελάχιστη ταχύτητα τροχιάς 82



Εικόνα 5-7 Αποτύπωση τμήματος με ελάχιστη ταχύτητα τροχιάς 82

A/A	Flat Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)	Segment Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)	TrajMat Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)
1	2,769	0,756 sec	16,190
2	2,858	0,747	16,177
3	2,888	0,797	16,750
4	3,012	0,948	16,175
5	3,361	0,798	16,178
6	2,902	0,747	16,193
7	2,729	0,999	16,206
8	2,762	0,823	16,188
9	3,325	0,924	16,177
10	2,919	1,009	16,195
11	2,935	1,080	16,183
12	3,163	1,028	16,198
13	2,894	1,009	16,199
14	2,789	0,986	16,201

15	2,880	1,010	16,194
16	2,962	1,012	16,176
17	3,055	0,747	16,185
18	2,705	0,797	16,177
19	2,869	0,957	16,201
20	3,578	1,005	16,172
Avarage	2,9677	0,9089	16,216
Percent-age		68% γρηγορότερη απόκριση από flat model	
		94% γρηγορότερη απόκριση από TrajMat	

Πίνακας 5-13: Σύγκρισή των χρόνων απόκρισης στην εύρεση min speed των δύο μοντέλων.

Συμπεράσματα συγκρίσεων των χρόνων απόκρισης των δύο ερωτημάτων στον Πίνακα 5-13. Το μοντέλο segment μπορεί εν μέρει να συμπιέζει την πληροφορία αλλά δεν χάνει την εγκυρότητα των πληροφοριών. Επίσης το μοντέλο segment είναι πιο γρήγορο στην αναζήτηση σε σχέση με το χρόνο απόκρισης του flat model και TrajMat. Τα μοντέλα μας δείχνουν ότι η ελάχιστη ταχύτητα δεν καταγράφεται πάντα κατά την απογείωση ή την προσγείωση.

5.3.3 Εύρεση μέγιστου υψόμετρου ανά trajectory

Η τρίτη και τελευταία κατανεμημένη (distributive) δοκιμή είναι η εύρεση του μέγιστου ύψους που επιτεύχθηκε από το αεροσκάφος. Ο κώδικας SQL (Κώδικας 5-11,Κώδικας 5-12,Κώδικας 5-13) αναζητά το μέγιστο ύψος για κάθε trajectory στο flat, segment και TrajMat model αντίστοιχα. Με τους πίνακες (Πίνακας 5-14, Πίνακας 5-15) θα συγκρίνουμε τις δοκιμές.

```

1  WITH MaxSpeedPoints AS (
2      SELECT *,
3      ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY traj_id ORDER BY ST_Z(point) DESC) AS
rank
4      FROM db_airflix.fact_table
5      WHERE ST_Z(point) < 100000
6  )
7  SELECT traj_id,
8      ST_FORCE2D(point) AS POINT,
9      t.full_date AS DATE,
10     ST_Z(point) AS ALTITUDE,
11     groundspeed AS SPEED,
12     geoaltitude,
13     (total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS HOUR_AFTER_DEP,
14     (total_distance / 1000)::numeric(10,3) AS KMs_AFTER_DEP,
15     C.model,
16     C.owner,
17     A.designator,
18     A.type
19 FROM MaxSpeedPoints

```

```

20 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS t ON MAXSpeedPoints.time_id = t.time_id
21 INNER JOIN db_airflix.aircrafts AS C ON MaxSpeedPoints.aircraft = C.air-
craft_id
22 INNER JOIN db_airflix.airspace AS A ON MaxSpeedPoints.airspace = A.id
23 WHERE rank = 1;

```

Κώδικας 5-11: Ο κώδικας SQL Flat Model για αναζήτηση max altitude ανά trajectory

Επεξήγηση ερωτήματος flat model (Κώδικας 5-11)

Στο μοντέλο flat model επιλέξαμε την αποθήκευση του κάθε σημείου να είναι της μορφής Point_Z. Το γνώρισμά αυτό είναι εσωτερικό της επέκτασης – extension PostGIS και δύναται να αποθηκεύσει τιμές έως πέντε διαστάσεις, Point_Z(x – γεωγραφικό μήκος, y γεωγραφικό πλάτος, z – ύψος, t, y), όπου στο t και y αποδίδονται τιμές όπως ο χρόνος ή οποιαδήποτε άλλη τιμή επιθυμεί ο χρήστης. Η εύρεση του μέγιστου υψόμετρου που απέκτησε το trajectory (γραμμές κώδικα 1 έως 5) εξάγονται από την εσωτερική συνάρτηση της PostGIS **ST_Z(point)**, ή οποία δέχεται ως παράμετρο ένα σημείο και επιστρέφει το υψόμετρο «Z». Στην αναζήτηση προσθέτουμε την τιμή του geoaltitude (ύψος από την πραγματική επιφάνεια – βουνά κ.ο.κ.) που βρισκόταν η πτήση (γραμμή 11) και τον χρόνο που την απέκτησε (γραμμή 9).

Η εύρεση της απόστασης σε χιλιόμετρα που είχε διανύσει από το αεροδρόμιο απογείωσης το αεροσκάφος γίνεται με την χρήση του παρακάτω κώδικα:

[1].(total_distance / 1000)::numeric(10,3) AS KMs_AFTER_DEP (γραμμή 13)

και της συνολικής χρονικής διάρκειας της πτήσης από την απογείωση με αναγωγή σε λεπτά:

[2].(total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS HOUR_AFTER_DEP (γραμμή 14)

Τέλος με **INNER JOIN** προσθέτουμε τα δεδομένα όπως ο τύπος του αεροσκάφους, της εταιρίας που το έχει καθώς και σε ποιο εναέριο χώρο απέκτησε το μέγιστο ύψος. Ένα μέρος των αποτελεσμάτων φαίνεται στον Πίνακα 5-14.

```

1 WITH MaxSpeedPoints AS (
2     SELECT *,
3     ROW_NUMBER() OVER (PARTITION BY traj_id ORDER BY start_altitude DESC) AS rank
4     FROM db_airflix.segment_table
5     WHERE start_geoaltitude > 0 AND stop_geoaltitude > 0
6 )
7 SELECT traj_id,
8     ST_MakeLine(start_point, stop_point),
9     start_geoaltitude,
10    stop_geoaltitude,
11    vertical_rate,
12    t.full_date AS START_TIME,
13    s.full_date AS STOP_TIME,
14    max_speed,

```

```

15         C.model,
16         C.owner,
17         A.designator,
18         A.type
19 FROM MaxSpeedPoints
20 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS t ON MaxSpeedPoints.start_time_id = t.time_id
21 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS s ON MaxSpeedPoints.stop_time_id = s.time_id
22 INNER JOIN db_airflix.aircrafts AS C ON MaxSpeedPoints.aircraft = C.aircraft_id
23 INNER JOIN db_airflix.airspace AS A ON MaxSpeedPoints.airspace = A.id
24 WHERE rank = 1;

```

Κώδικας 5-12: Ο κώδικας SQL Segment Model για αναζήτηση max altitude ανά trajectory

Επεξήγηση ερωτήματος segment model (Κώδικας 5-12)

Η εύρεση του μέγιστου ύψους στο segment model είναι πιο εύκολη, εφόσον για κάθε τμήμα αποθηκεύουμε το μέγιστο ύψος (που απέκτησε το αεροσκάφος) του τμήματος. Η εύρεση του μέγιστου ύψους επιτυγχάνεται στις γραμμές κώδικα 1 έως 5 καθώς επίσης στην αναζήτηση αυτού του μοντέλου βρίσκουμε και το τμήμα (segment) που βρισκόταν το αεροσκάφος.

```

1 WITH RankedPoints AS (
2     SELECT
3         cf.traj_id,
4         (cp).groundspeed AS speed,
5         st_zmax((cp).point) AS geoaltitude,
6         (cp).timestamp AS point_timestamp,
7         (cp).airspace AS airspace_id,
8         ((cp).total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS t_time,
9         ((cp).total_distance / 1000)::numeric(10,2) AS t_d,
10        td.full_date,
11        ad.model,
12        ad.owner,
13        asd.designator AS airspace_name,
14        asd.type AS airspace_type,
15        ROW_NUMBER() OVER (
16            PARTITION BY cf.traj_id
17            ORDER BY st_zmax((cp).point) DESC
18        ) AS rn
19 FROM
20     db_airflix.complex_flat_table cf
21 JOIN
22     UNNEST(cf.complex_points) AS cp (complex_point) ON TRUE
23 JOIN
24     db_airflix.time_dim td ON (cp).timestamp = td.time_id
25 JOIN
26     db_airflix.aircrafts ad ON cf.aircraft = ad.aircraft_id
27 JOIN
28     db_airflix.airspace asd ON (cp).airspace = asd.id
29 )
30 SELECT
31     traj_id,
32     speed AS max_speed,
33     full_date,
34     geoaltitude,
35     t_time,

```

```

36     t_d,
37     model,
38     owner,
39     airspace_name,
40     airspace_type
41 FROM
42   RankedPoints
43 WHERE
44   rn = 1
45 ORDER BY
46   traj_id;

```

Κώδικας 5-13: Ο κώδικας SQL TrajMat Model για αναζήτηση max altitude ανά trajectory

Επεξήγηση ερωτήματος flat model (Κώδικας 5-13)

Σε αυτό το μοντέλο όπως και στο flat model η αποθήκευση του κάθε σημείου είναι της μορφής Point_Z. Οπότε η εύρεση του μέγιστου υψόμετρου που απέκτησε το trajectory (γραμμή 5) εξάγονται από την εσωτερική συνάρτηση της PostGIS **ST_Z(point)**.

Η εύρεση της απόστασης σε χιλιόμετρα που είχε διανύσει από το αεροδρόμιο απογείωσης το αεροσκάφος γίνεται με την χρήση του παρακάτω κώδικα:

[1].(total_distance / 1000)::numeric(10,3) AS KMs_AFTER_DEP (γραμμή 8)

και της συνολικής χρονικής διάρκειας της πτήσης από την απογείωση με αναγωγή σε λεπτά:

[2].(total_time / 3600.0)::numeric(10,2) AS HOUR_AFTER_DEP (γραμμή 9)

Τέλος με **INNER JOIN** προσθέτουμε τα δεδομένα όπως ο τύπος του αεροσκάφους, της εταιρίας που το έχει καθώς και σε ποιο εναέριο χώρο απέκτησε το μέγιστο ύψος. Ένα μέρος των αποτελεσμάτων φαίνεται στον πίνακα.

TRAJ ID	ΩΡΑ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ (feet)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ (knots)	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΥΨΟΣ MSL (feet)	ΩΡΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ Α/Γ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ Α/Γ	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΝΑΕΡΙΟΣ ΧΩΡΟΣ
79	29/6/2017 17:34	30175	480	35775	65	687822	A321 231	Aegean Airlines	WIEN FIR
80	7/5/2017 13:09	36025	519	35100	149	1941497	A321 231	Lufthansa	TIRANA FIR
81	26/4/2017 13:51	39200	476	32950	200	2674155	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR
82	27/7/2017 8:46	38100	512	32275	47	578951	A321 231	Lufthansa	WIEN FIR
83	13/1/2017 15:05	39000	458	34850	188	5881340	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR

Πίνακας 5-14: Αποτελεσμάτων Flat, TrajMat model max altitude (στήλη altitude) ανά trajectory

TRAJ ID	ΥΨΟΣ (feet)	ΡΥΘΜΟΣ ΑΝΟΔΟΥ / ΚΑΘΟΔΟΥ (feet/min)	ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΩΡΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΕΤΑΙΡΙΑ	ΕΝΑΕΡΙΟΣ ΧΩΡΟΣ
79	30175	64	29/6/2017 16:57	29/6/2017 16:57	A321 231	Aegean Airlines	MUNICH FIR
80	36025	0	7/5/2017 13:09	7/5/2017 13:09	A321 231	Lufthansa	TIRANA FIR

81	39200	0	26/4/2017 13:36	26/4/2017 13:51	A321 231	Lufthansa	ATHINAI FIR	FIR
82	38100	320	27/7/2017 8:46	27/7/2017 8:46	A321 231	Lufthansa	WIEN FIR	FIR
83	39000	0	13/1/2017 14:51	13/1/2017 14:52	A321 231	Lufthansa	SKOPJE FIR	FIR

Πίνακας 5-15: αποτελεσμάτων segment model max altitude (στήλη latitude) ανά trajectory

A/A	Flat Model – Χρόνος Α- πόκρισης	Segment Model – Χρόνος Α- πόκρισης	TrajMat Model – Χρό- νος Απόκρισης
1	4,684 sec	0,900 sec	17,711
2	3,124 sec	0,850 sec	17,227
3	3,098 sec	0,864 sec	17,217
4	3,086 sec	1,077 sec	17,232
5	3,447 sec	0,968 sec	17,221
6	3,695 sec	0,775 sec	17,236
7	3,747 sec	0,964 sec	17,219
8	3,055 sec	0,983 sec	17,212
9	3,063 sec	1,066 sec	17,239
10	3,013 sec	0,757 sec	17,223
11	3,056 sec	0,776 sec	17,224
12	3,065 sec	0,852 sec	17,215
13	3,844 sec	0,887 sec	17,219
14	3,879 sec	1,021 sec	17,203
15	3,892 sec	1,599 sec	17,207
16	3,781 sec	1,020 sec	17,261
17	3,050 sec	0,803 sec	17,201
18	3,032 sec	0,761 sec	17,231
19	3,046 sec	0,970 sec	17,263
20	3,023 sec	0,950 sec	17,237
Avarage	3,384sec	0,942 sec	17,25
Percent- age		72% γρηγορότερο από flat model	
		94,5% γρηγορότερο από TrajMat model	

Πίνακας 5-16: Σύγκριση των χρόνων απόκρισης των δύο μοντέλων στην εύρεση max altitude των δύο μοντέλων.

Συμπεράσματα συγκρίσεων των χρόνων απόκρισης των ερωτημάτων στον Πίνακα 5-16. Το μοντέλο segment είναι υπερβολικά γρηγορότερο. Επίσης πλαισιώσαμε στην εύρεση του μέγιστου ύψους και τον εναέριο χώρο που αποκτήθηκε. Με δεδομένο ότι όλες οι πτήσεις κατευθύνονται προς Αθήνα από Φρανκφούρτη προκύπτει ότι δεν υπάρχει συσχέτιση σε ποιο εναέριο χώρο αποκτούν πάντα το μέγιστο ύψος.

5.4 Αναζήτηση μοναδικού σημείου σε όλη την αποθήκη

5.4.1 Εύρεση trajectory με την μεγαλύτερη ταχύτητα

Σε αυτή την κατηγορία αναζητούμε μέσα στο σύνολο των εγγραφών το σημείο με την μεγαλύτερη ταχύτητα και σε πιο trajectory ανήκει. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο μοντέλο flat θα πρέπει να διατρέξουμε όλες τις εγγραφές σε σχέση με το segment μοντέλο. Επίσης να αναφέρουμε ότι στο μοντέλο TrajMat θα πρέπει πρώτα να μετατρέψουμε όλες τις τιμές όλων των πινάκων σε γραμμές και έπειτα να αναζητήσουμε την μέγιστη ταχύτητα.

```
1 SELECT traj_id , ST_FORCE2D(point), ST_Z(point), MAX(groundspeed) AS
2 highest_max_speed
3 FROM
4 db_airflix.fact_table
5 GROUP by traj_id, point
6 ORDER BY highest_max_speed
7 DESC
8 LIMIT 1;
```

Κώδικας 5-14: SQL για την εύρεση της μέγιστης καταγεγραμμένης ταχύτητας στο flat model

Επεξήγηση Ερωτήματος Flat Model (Κώδικας 5-14)

Στην πρώτη γραμμή κώδικα επιλέγουμε από την βάση μέσω της συνάρτησης MAX(groundspeed) την μεγαλύτερη αποθηκευμένη ταχύτητα, συμπεριλαμβανομένου και το trajectory id, το σημείο και το ύψος της υψηλότερης καταγεγραμμένης ταχύτητας. Έπειτα ορίζουμε την ταξινόμηση από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο (γραμμή 7) και περιορίζουμε τα αποτελέσματα σε ένα 'LIMIT 1' (γραμμή 8). Στον Πίνακα 5-17 φαίνονται τα αποτελέσματα του ερωτήματος.

```
1 SELECT traj_id , ST_MakeLine(start_point, stop_point), MAX(max_speed) AS
2 highest_max_speed
3 FROM
4 db_airflix.segment_table
5 GROUP by traj_id, start_point, stop_point
6 ORDER BY highest_max_speed
7 DESC
8 LIMIT 1;
```

Κώδικας 5-15: SQL Κώδικας για την εύρεση της μέγιστης ταχύτητας στο segment model

Επεξήγηση Ερωτήματος Segment Model (Κώδικας 5-15)

Στην πρώτη γραμμή κώδικα επιλέγουμε από την βάση μέσω της συνάρτησης MAX(max_speed) την μεγαλύτερη αποθηκευμένη ταχύτητα, συμπεριλαμβανομένου και το trajectory id και το τμήμα της υψηλότερης καταγεγραμμένης ταχύτητας. Σε αυτό το μοντέλο για το κάθε τμήμα έχει καταγραφεί η μέγιστη ταχύτητα του τμήματος, οπότε η

αναζήτηση είναι μεν σειριακή και εδώ αλλά σε λιγότερες εγγραφές όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5-18. Έπειτα ορίζουμε, όπως και στην προηγούμενη αναζήτηση, την ταξινόμηση από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο (γραμμή 7) και περιορίζουμε τα αποτελέσματα σε ένα ‘LIMIT 1’ (γραμμή 8). Στο Πίνακα 5-18 φαίνονται τα αποτελέσματα του ερωτήματος.

```

1 SELECT
2     traj_id,
3     MAX((p).groundspeed) AS max_speed,
4     ST_Z((p).point) as altitude
5 FROM
6     db_airflix.complex_flat_table,
7     UNNEST(complex_points) AS p
8 GROUP BY
9     traj_id, (p).point
10 ORDER BY
11     max_speed DESC
12 LIMIT 1;

```

Κώδικας 5-16: SQL Κώδικας για την εύρεση της μέγιστης ταχύτητας στο TrajMat model

Επεξήγηση Ερωτήματος TrajMat Model (Κώδικας 5-16)

Όπως και στα προηγούμενα ερωτήματα επιλέγουμε από την βάση μέσω της συνάρτησης MAX(max_speed) την μεγαλύτερη αποθηκευμένη ταχύτητα, συμπεριλαμβανομένου και το trajectory id το σημείο και το ύψος της υψηλότερης καταγεγραμμένης ταχύτητας. Η διαφορά εδώ σε σχέση με το flat είναι ότι πρέπει να γίνει χρήση την εντολής UNNEST (γραμμή 7). Σε αυτό το μοντέλο θα πρέπει πριν διατρέξουμε όλες τις γραμμές να «ξεδιπλώσουμε» όλες τις τιμές όλων των πλειάδων complex_point[] (γραμμή 7) της κάθε εγγραφής και να τις μετατρέψουμε σε γραμμές. Έπειτα ορίζουμε, όπως και στις προηγούμενες αναζητήσεις, την ταξινόμηση από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο (γραμμή 11) και περιορίζουμε τα αποτελέσματα σε ένα ‘LIMIT 1’ (γραμμή 12). Στον Πίνακα 5-17 φαίνονται τα αποτελέσματα του ερωτήματος τα οποία είναι ίδια με το μοντέλο Flat.

Traj_id	Point	Altitude	Highest Max Speed
236	[]	30975	620

Πίνακας 5-17: αποτελεσμάτων Flat, TrajMat model

Traj_id	Segment	Highest Max Speed
236	[]	620

Πίνακας 5-18:αποτελεσμάτων segment model

A/A	Flat Model – Χρόνος Απόκρισης	Segment Model – Χρόνος Απόκρισης	TrajMat Model – Χρόνος Απόκρισης
1	4,641 sec	2,894 sec	5,112
2	4,221 sec	2,148 sec	5,123

3	4,700 sec	2,592 sec	4,995
4	4,203 sec	2,507 sec	5,015
5	4,779 sec	2,763 sec	5,019
6	4,695 sec	2,034 sec	4,936
7	5,130 sec	2,027 sec	5,054
8	4,965 sec	2,021 sec	4,960
9	4,246 sec	2,809 sec	5,076
10	4,625 sec	2,030 sec	4,941
11	4,195 sec	2,026 sec	4,870
12	4,180 sec	2,484 sec	4,933
13	5,130 sec	2,049 sec	4,951
14	5,075 sec	2,363 sec	5,056
15	4,922 sec	2,573 sec	4,924
16	4,976 sec	2,137 sec	5,022
17	4,511 sec	2,059 sec	4,964
18	4,694 sec	1,990 sec	5,005
19	4,779 sec	2,025 sec	5,025
20	4,166 sec	2,146 sec	5,015
Average	4,641sec	2,283 sec	4,999
Percent-age	7% γρηγορότερο από TrajMat	52% γρηγορότερο από Flat	-
	-	54% γρηγορότερο από TrajMat	-

Πίνακας 5-19: συγκρίσεων για την εύρεση της μέγιστης καταγεγραμμένης ταχύτητας

Συμπεράσματα συγκρίσεων των χρόνων απόκρισης των ερωτημάτων στον Πίνακα 5-19. Μπορεί το μοντέλο segment να μειώνει το χρόνο σχεδόν στο μισό από τα άλλα δύο αλλά οι χρόνο εξαρτώνται από τον αριθμό των συνολικών εγγραφών, όσο περισσότερες οι εγγραφές τόσο αυξάνονται και οι χρόνοι. Σε αυτό το ερώτημα φαίνεται ότι είναι κατά 7% γρηγορότερο το Flat σε σχέση με το TrajMat Model.

5.4.2 Εύρεση trajectory με την μικρότερη ταχύτητα

Όπως και στην προηγούμενη αναζήτηση, εδώ αναζητούμε την μικρότερη ταχύτητα και σε πιο trajectory ανήκει.

```

1 SELECT traj_id , ST_FORCE2D(point), ST_Z(point), MIN(groundspeed) AS
2 minimum_speed
3 FROM
4 db_airflix.fact_table
5 WHERE groundspeed > 0
6 GROUP by traj_id, point
7 ORDER BY minimum_speed
8 ASC
9 LIMIT 1;
```

Κώδικας 5-17: SQL Κώδικας για την εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας στο flat model

Επεξήγηση Ερωτήματος Flat Model (Κώδικας 5-17)

Στην πρώτη γραμμή κώδικα επιλέγουμε από την βάση μέσω της συνάρτησης MIN(groundspeed) την μικρότερη αποθηκευμένη ταχύτητα, συμπεριλαμβανομένου και το trajectory id, το σημείο και το ύψος της ελάχιστης καταγεγραμμένης ταχύτητας. Στην γραμμή κώδικα 5 αποκλείουμε (WHERE groundspeed > 0) τις εγγραφές με μηδενική ταχύτητα. Έπειτα ορίζουμε την ταξινόμηση από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο (γραμμή 7,8) και περιορίζουμε τα αποτελέσματα σε ένα 'LIMIT 1' (γραμμή 9). Στον Πίνακα 5-20 φαίνονται τα αποτελέσματα του ερωτήματος.

```
1 SELECT traj_id , ST_MakeLine(start_point, stop_point), MIN(min_speed) AS
2 minimum_speed
3 FROM
4 db_airflix.segment_table
5 WHERE min_speed > 0
6 GROUP by traj_id, start_point, stop_point
7 ORDER BY minimum_speed
8 ASC
9 LIMIT 1;
```

Κώδικας 5-18: SQL Κώδικας για την εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας στο segment model

Επεξήγηση Ερωτήματος Segment Model (Κώδικας 5-18)

Στην πρώτη γραμμή κώδικα επιλέγουμε από την βάση μέσω της συνάρτησης MIN(groundspeed) την ελάχιστη αποθηκευμένη ταχύτητα, συμπεριλαμβανομένου και το trajectory id και το τμήμα της μικρότερης καταγεγραμμένης ταχύτητας. Σε αυτό το μοντέλο για το κάθε τμήμα έχει καταγραφεί η ελάχιστη ταχύτητα (min_speed) του τμήματος, χωρίς να χάνεται η εγγύτητα του αποτελέσματος όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5-21. Έπειτα ορίζουμε, όπως και στην προηγούμενη αναζήτηση, την ταξινόμηση από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο (γραμμή 8) και περιορίζουμε τα αποτελέσματα σε ένα 'LIMIT 1' (γραμμή 9). Στον Πίνακα 5-21 φαίνονται τα αποτελέσματα του ερωτήματος.

```
1 SELECT
2     traj_id,
3     MIN((p).groundspeed) AS min_speed,
4     ST_Z((p).point) as altitude,
5     (p).point
6 FROM
7     db_airflix.complex_flat_table,
8     UNNEST(complex_points) AS p WHERE (p).groundspeed >0
9 GROUP BY
10    traj_id, (p).point
11 ORDER BY
12    min_speed ASC
13 LIMIT 1;
```

Κώδικας 5-19: SQL Κώδικας για την εύρεση της ελάχιστης ταχύτητας στο TrajMat model

Επεξήγηση Ερωτήματος TrajMat Model (Κώδικας 5-19)

Όπως και στα προηγούμενα ερωτήματα επιλέγουμε από την βάση μέσω της συνάρτησης MIN(min_speed) την μικρότερη αποθηκευμένη ταχύτητα, συμπεριλαμβανομένου και το trajectory id, το σημείο και το ύψος της ελάχιστης καταγεγραμμένης ταχύτητας. Πριν την εύρεση της μικρότερης ταχύτητας θα πρέπει πρώτα να μετατρέψουμε τις πλειάδες σε γραμμές. Αυτό επιτυγχάνεται στην γραμμή κώδικα 8 όπου επίσης αποκλείουμε (WHERE groundspeed > 0) τις εγγραφές με μηδενική ταχύτητα. Έπειτα ορίζουμε την ταξινόμηση από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο (γραμμή 11,12) και περιορίζουμε τα αποτελέσματα σε ένα 'LIMIT 1' (γραμμή 13). Στον Πίνακα 5-20 φαίνονται τα αποτελέσματα του ερωτήματος.

Traj_id	Point	ΥΨΟΣ (feet)	Minimum Speed (knots)
319		650	80

Πίνακας 5-20: Πίνακας αποτελεσμάτων Flat, TrajMat model για την εύρεση ελάχιστης ταχύτητας

Traj_id	Segment	Minimum Speed (knots)
236		80

Πίνακας 5-21: Πίνακας αποτελεσμάτων segment model για την εύρεση ελάχιστης ταχύτητας

A/A	Flat Model – Χρόνος Α- πόκρισης (seconds)	Segment Model – Χρόνος Απόκρισης (seconds)	TrajMat Model – Χρό- νος Απόκρισης (sec- onds)
1	5,180	2,054	4,948
2	5,168	2,082	4,912
3	5,217	2,901	4,971
4	5,080	2,562	4,945
5	5,304	2,375	4,914
6	5,180	2,053	4,949
7	5,184	2,030	4,966
8	4,775	2,045	4,915
9	5,140	2,045	4,882
10	5,350	2,016	4,956
11	5,103	2,038	4,946
12	5,211	2,045	4,927
13	5,589	2,046	4,897
14	4,962	2,003	4,919
15	4,817	2,043	4,984
16	4,888	2,044	5,007
17	4,959	2,006	4,953
18	5,227	2,490	4,944
19	5,229	2,010	4,917
20	5,163	2,509	4,952
Average	5,13	2,16	4,94
Percent- age		57%	3%

Πίνακας 5-22: Εύρεση της ελάχιστης καταγεγραμμένης ταχύτητας

Συμπεράσματα συγκρίσεων των χρόνων απόκρισης των ερωτημάτων στον Πίνακα 5-22. Σε αντίθεση με την εύρεση μέγιστης τιμής της ταχύτητας στην αναζήτηση ελάχιστης τιμής το TrajMat έδειξε ότι είναι λίγο γρηγορότερο από το Flat. Το μοντέλο Segment φαίνεται να είναι το γρηγορότερο μέχρι στιγμής.

Οι αναζητήσεις της ελάχιστης, μέγιστης καταγεγραμμένης τιμής στα γνωρίσματα είναι πολύ σημαντικά ερωτήματα. Μην ξεχνάμε ότι τα μοντέλα αντιπροσωπεύουν ξεχωριστές αποθήκες δεδομένων οι οποίες προορίζονται να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη τροχιάς. Όπως θα δούμε και στα παρακάτω κεφάλαια η ομαλοποίηση (normalization) των δεδομένων είναι συχνό φαινόμενο στην μηχανική μάθηση και ιδιαίτερα στα νευρωνικά δίκτυα. Η διαδικασία ομαλοποίησης βοηθά στη μείωση της επίδρασης των διαφορών κλίμακας μεταξύ των διαφόρων χαρακτηριστικών και επιταχύνει τη διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου. Μία από τις πιο απλές και συνηθισμένες μεθόδους ομαλοποίησης είναι η συνάρτηση Min-Max. Η συνάρτηση αυτή μετασχηματίζει τις τιμές των δεδομένων σε ένα προκαθορισμένο εύρος, συνήθως $[0, 1]$.

5.5 Αναζήτηση μέσης ταχύτητας (average speed) ανά trajectory

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η εύρεση της μέσης ταχύτητας (average speed) ανά τροχιά. Πέρα από την σύγκριση της αναζήτησης της μέσης ταχύτητας ανά τροχιά στα μοντέλα, με την συγκεκριμένη αναζήτηση εξάγουμε επιπλέον συμπεράσματα. Η ανάλυση της μέσης ταχύτητας, με τον εμπλουτισμό της μέγιστης ταχύτητας και της συνολικής διάρκειας της πτήσης, δείχνει τα δυνατά σημεία της αποθήκης δεδομένων. Η σχέση, μεταξύ μέσης και μέγιστης ταχύτητας, σε συνάρτηση με τον συνολικό χρόνο διάρκειας της πτήσης, εξάγει ένα σημαντικό γεγονός όπως την εξάρτηση της ταχύτητας με την διάρκεια μιας πτήσης. Τέλος όπως και στις προηγούμενες συγκρίσεις θα πρέπει τα αποτελέσματα των αναζητήσεων να έχουν την ίδια εγκυρότητα. Δεδομένου όμως ότι το μοντέλο segment αποθηκεύει τμήματα αντί για σημεία η εύρεση της μέση ταχύτητας ανά τροχιά θα είναι δύσκολη και ίσως να μην προσεγγίσει τις πραγματικές τιμές. Εφόσον για το κάθε τμήμα αποθηκεύουμε την αρχική και τελική ταχύτητα του τμήματος, οι ενδιάμεσες τιμές έχουν χαθεί.

```
1 SELECT traj_id,
```

```

2     AVG(groundspeed)::numeric(10,2) AS average_speed,
3     MAX(groundspeed) AS max_speed,
4     MAX(total_time) / 60 AS DURATION_MINUTES,
5     ST_MakeLine(ST_Force2D(point) ORDER BY time_id) AS FLIGHT_PATH
6 FROM db_airflix.fact_table
7 GROUP BY traj_id
8 ORDER BY DURATION_MINUTES
9 DESC;

```

Κώδικας 5-20: SQL Κώδικας αναζήτησης average speed στο flat model

Επεξήγηση Ερωτήματος Flat Model (Κώδικας 5-20: SQL Κώδικας αναζήτησης average speed στο flat model)

Στις πρώτες γραμμές κώδικα, μέχρι την επιλογή της βάσης (FROM db_airflix.fact_table) χρησιμοποιούμε της συναρτήσεις συνάθροισης (Aggregation Functions) avg και max, που εφαρμόζονται στο σύνολο των τιμών της ταχύτητας. Η συνάρτηση AVG() επιστρέφει την μέση τιμή από ένα σύνολο τιμών της κάθε τροχιάς, ενώ η MAX επιστρέφει την μεγαλύτερη τιμή αντίστοιχα από το σύνολο τιμών της κάθε τροχιάς. Τέλος τα ομαδοποιούμε ανά trajectory **GROUP BY traj_id** και τα ταξινομούμε με βάση την διάρκεια της πτήσης, από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη. Να επισημάνουμε ότι η διάρκεια της πτήσης μετατρέπεται σε λεπτά λόγω της αποθήκευσης του γνωρίσματος σε δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα του ερωτήματος φαίνονται στον Πίνακα 5-23

```

1 SELECT traj_id,
2        SUM(average_spd) / count(traj_id) AS average_speed,
3        MAX(max_speed) AS max_speed,
4        AGE(MAX(t.full_date), MIN(f.full_date)) AS duration_minutes
5 FROM db_airflix.segment_table
6 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS t ON db_airflix.segment_table.stop_time_id =
7        t.time_id
8 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS f ON db_airflix.segment_table.start_time_id =
9        f.time_id
10 GROUP BY traj_id
11 ORDER BY DURATION_MINUTES
12 DESC

```

Κώδικας 5-21: SQL Κώδικας αναζήτησης average speed στο segment model

Επεξήγηση Ερωτήματος Segment Model (Κώδικας 5-21)

Σε αυτήν την αναζήτηση παρατηρείται η πρώτη αδυναμία στην εγκυρότητα των δεδομένων. Σύμφωνα με την **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** (μοντέλο Segment model), δεν υπάρχει γνώρισμα που να καταγράφει την ταχύτητα του κάθε σημείου, αντ' αυτού καταγράφεται η αρχική, η τελική και μέση ταχύτητα του κάθε τμήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφορετικών αποτελεσμάτων στην αναζήτηση όπως φαίνεται και από τα ενδεικτικά αποτελέσματα στους Πίνακες Πίνακας

5-23, Πίνακας 5-24. Αυτό συμβαίνει, διότι στο μοντέλο segment καταγράφουμε την μέση ταχύτητα (γνώρισμά `average_speed`) για κάθε τμήμα - εγγραφή, με συνέπεια στην αναζήτηση να υπολογίζουμε την μέση τιμή των μέσων τιμών (γραμμή κώδικα 2) **SUM(`average_speed`) / count(`traj_id`) AS `average_speed`)**. Σε αυτόν τον υπολογισμό οφείλεται και η απώλεια του υπολογισμού της μέσης τιμής όπως στο Flat Model. Παρόλα αυτά οι τιμές όπως φαίνονται στον πίνακα Πίνακας 5-24 είναι πολύ κοντά στην μέση τιμή του αντίστοιχου trajectory του Flat Model. Στο Flat Model η συνάρτηση AVG εφαρμόζεται σε όλες τις ακατέργαστες τιμές της ταχύτητας (γνώρισμά `groundspeed` Flat Model), ενώ στο Segment Model εφαρμόζεται στο σύνολο των μέσων τιμών ταχύτητας του κάθε τμήματος.

```

1  SELECT
2      traj_id,
3      AVG((p).groundspeed)::numeric(10,2) AS average_speed,
4      MAX((p).groundspeed) AS max_speed,
5      MAX((p).total_time) / 60 AS DURATION_MINUTES,
6      ST_MakeLine(ST_Force2D((p).point) ORDER BY (p).timestamp) AS FLIGHT_PATH
7  FROM
8      db_airflix.complex_flat_table,
9      UNNEST(complex_points) AS p
10 GROUP BY
11     traj_id
12 ORDER BY
13     DURATION_MINUTES DESC;

```

Κώδικας 5-22: SQL Κώδικας αναζήτησης average speed στο TrajMat model

Επεξήγηση Ερωτήματος TrajMat Model (Κώδικας 5-20: SQL Κώδικας αναζήτησης average speed στο flat model)

Παρόμοια με το ερώτημα του Flat χρησιμοποιούμε τις συναρτήσεις συνάθροισης (Aggregation Functions) avg και max, που εφαρμόζονται στο σύνολο των τιμών της ταχύτητας. Η διαφορά εδώ είναι όπως πάλι η μετατροπή των πλειάδων σε κανονικές γραμμές. Τα αποτελέσματα του ερωτήματος φαίνονται στον Πίνακα 5-23 καθώς είναι ίδια με του μοντέλου Flat. Παρόλα αυτά το μοντέλο TrajMat δείχνει να είναι γρηγορότερο από το Flat και τα αποτελέσματα που μας δίνει είναι 100% ίδια.

traj_id	Average_speed	Max_speed	Duration_minutes	HOURS
350	410.09	505	159	02:39:12
327	427.01	504	156	02:36:18
93	410.36	475	154	02:33:41
380	434.49	494	153	02:33:55
299	307.04	450	152	02:32:12

Πίνακας 5-23: Πίνακας αποτελεσμάτων average speed Flat Model

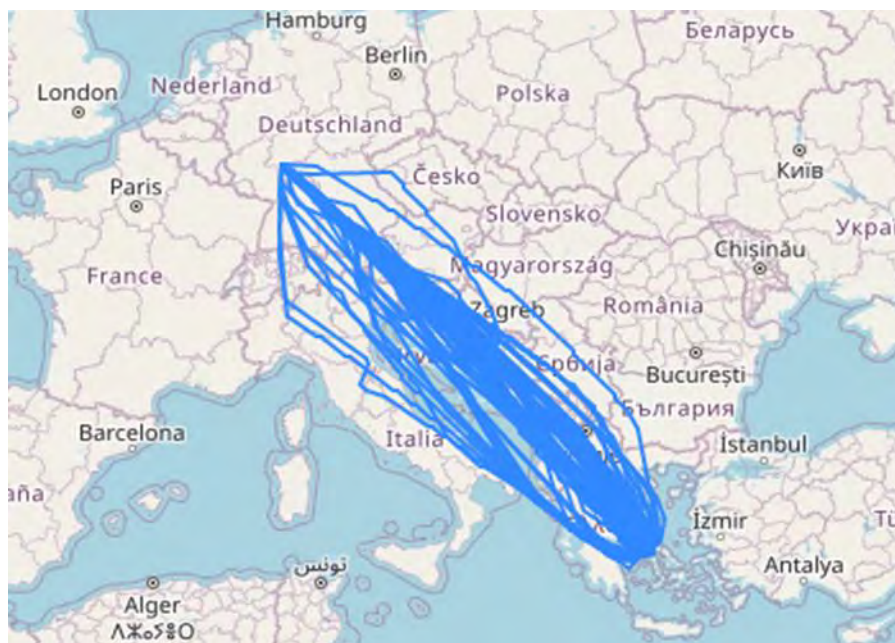
traj_id	Average_speed	Max_speed	Duration_minutes	HOURS
350	402.77	505	159	02:39:12
327	404.94	504	156	02:36:18
93	382.72	475	154	02:33:41
380	382.73	494	153	02:33:55
299	315.40	450	152	02:32:12

Πίνακας 5-24 Πίνακας αποτελεσμάτων average speed Segment Model

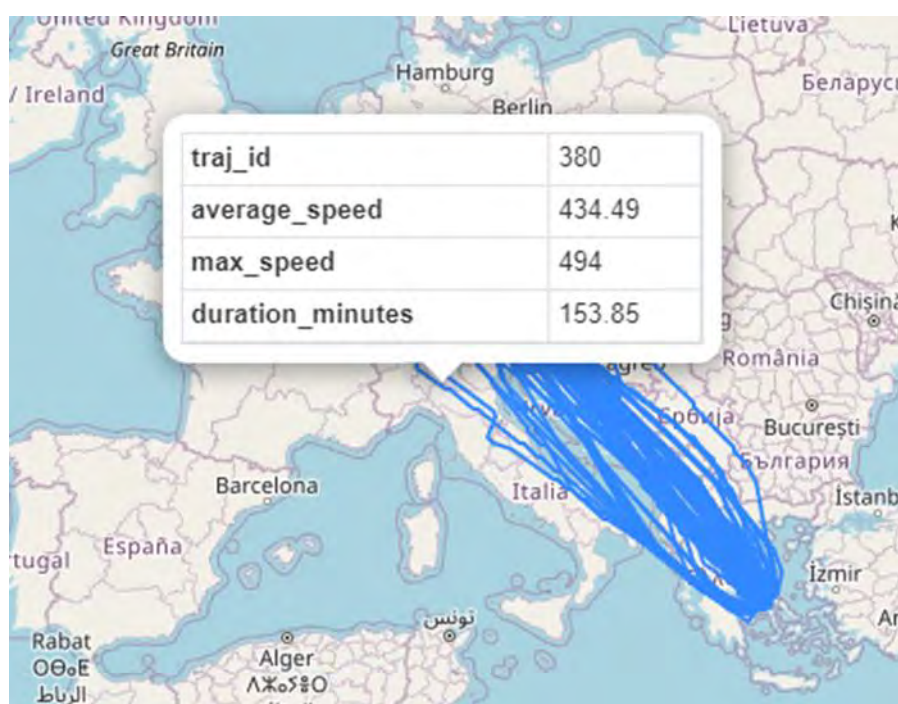
A/A	Flat Model – Χρόνος Α- πόκρισης	Segment Model – Χρόνος Απόκρισης	TrajMat Model – Χρό- νος Απόκρισης
1	10,450 sec	3,307 sec	8,850
2	9,289 sec	3,323 sec	8,880
3	9,469 sec	3,311 sec	8,939
4	11,617 sec	3,505 sec	9,021
5	9,653 sec	3,483 sec	8,946
6	9,867 sec	3,860 sec	9,062
7	9,464 sec	3,778 sec	8,941
8	9,418 sec	3,752 sec	8,983
9	9,284 sec	3,296 sec	9,032
10	10,374 sec	4,4sec	9,109
11	10,494 sec	3,312 sec	8,942
12	9,272 sec	3,296 sec	8,971
13	9,385 sec	3,328 sec	8,951
14	9,511 sec	3,620 sec	8,976
15	9,113 sec	3,529 sec	8,956
16	9,520 sec	3,446 sec	8,959
17	9,048 sec	3,954 sec	9,002
18	9,184 sec	3,301 sec	8,948
19	9,049 sec	3,308 sec	8,978
20	9,978 sec	3,912 sec	8,895
Average	9,67 sec	3,55 sec	8,96
Percent- age	-	63 %	7%
	-	60%	

Πίνακας 5-25: Συγκρίσεων μοντέλων στην αναζήτηση average speed

Συμπεράσματα συγκρίσεων των ερωτημάτων στον Πίνακα 5-25 Πίνακα 5-22. Η α-δυναμία του μοντέλου segment στην εύρεση μέσης ταχύτητας φάνηκε στην συγκεκρι-μένη σύγκριση. Η μείωση του όγκου των δεδομένων θυσίασε ένα πολύ βασικό χαρακτη-ριστικό όπως είναι η μέση ταχύτητα. Σε αντίθεση το TrajMat έδειξε ότι είναι πάλι γρη-γορότερο από το Flat και εξακολουθεί να παρέχει εγγύτητα στα δεδομένα. Στις Εικόνες Εικόνα 5-8 Εικόνα 5-9 αποτυπώνονται στο χάρτη οι συνολικά 335 τροχιές από τα ερωτή-ματα των Flat και TrajMat.



Εικόνα 5-8: Αποτύπωση σε χάρτη των τροχιών των Flat και TrajMat



Εικόνα 5-9 Αποτύπωση σε χάρτη των χαρακτηριστικών της τροχιάς 380

5.6 Αναζήτηση μέσου ύψους (average altitude) ανά trajectory

Η τελευταία σύγκριση των μοντέλων είναι αυτή της εύρεσης του μέσου ύψους ανά τροχιά. Σε αυτές τις συγκρίσεις εμφανίζεται η αδυναμία του segment model στην εύρεση

μέσων τιμών. Δεδομένου όμως ότι το μοντέλο segment αποθηκεύει το αρχικό, τελικό και μέσο ύψος του τμήματος οι ενδιαμέσες τιμές εκφυλίζονται.

```
1 SELECT traj_id,  
2 AVG(geoaltitude)::numeric(10,2) AS average_alt,  
3 MAX(geoaltitude) AS max_alt,  
4 MAX(total_time) / 60 AS DURATION_MINUTES,  
5 ST_MakeLine(ST_FORCE2D(point) ORDER BY time_id) AS FLIGHT_PATH  
6 FROM db_airflix.fact_table  
7 GROUP BY traj_id  
8 ORDER BY DURATION_MINUTES  
9 DESC;
```

Κώδικας 5-23: SQL Κώδικας αναζήτησης average altitude στο flat model

Επεξήγηση Ερωτήματος Flat Model (Κώδικας 5-23)

Στις πρώτες γραμμές κώδικα (γραμμές 1-5), όπως και στην προηγούμενη αναζήτηση η συναρτήση συνάθροισης (Aggregation Function) avg και max, που εφαρμόζονται σε σύνολα αριθμητικών τιμών εμφανίζει την μέση τιμή για το ύψος. Η συνάρτηση AVG() επιστρέφει την μέση τιμή από ένα σύνολο τιμών ενώ η MAX επιστρέφει την μεγαλύτερη τιμή αντίστοιχα από ένα σύνολο τιμών. Τέλος ομαδοποιούμε τα αποτελέσματα ανά trajectory **GROUP BY traj_id** και τα ταξινομούμε με βάση την διάρκεια της πτήσης, από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη. Να επισημάνουμε ότι η διάρκεια της πτήσης μετατρέπεται σε λεπτά.

```
1 SELECT traj_id,  
2 ( ((SUM(start_geoaltitude) / count(traj_id)) + (SUM(stop_geoaltitude) /  
3 count(traj_id))) / 2) AS average_s_alt,  
4 MAX(start_geoaltitude) AS max_s_alt,  
5 SUM(stop_geoaltitude) / count(traj_id) AS average_st_alt,  
6 MAX(stop_geoaltitude) AS max_st_alt,  
7 AGE(MAX(t.full_date), MIN(f.full_date)) AS duration_minutes  
8 FROM db_airflix.segment_table  
9 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS t ON db_airflix.segment_table.stop_time_id = t.time_id  
10 INNER JOIN db_airflix.time_dim AS f ON db_airflix.segment_table.start_time_id = f.time_id  
11 GROUP BY traj_id  
12 ORDER BY DURATION_MINUTES  
13 DESC
```

Κώδικας 5-24: SQL Κώδικας αναζήτησης average altitude στο segment model

Επεξήγηση Ερωτήματος Segment Model (Κώδικας 5-24)

Σε αυτήν την αναζήτηση ο υπολογισμός του average altitude υπολογίζεται από τις μέσες τιμές του του υψομέτρου εισόδου και εξόδου (start_geoaltitude, stop_geoaltitude) του

κάθε τμήματος (γραμμές κώδικα 2-3). Στην περίπτωση υπολογισμού του average_altitude ακόμη και αν καταγράφαμε το μέσο υψόμετρο του κάθε τμήματος τα αποτελέσματα δεν είναι τα επιθυμητά και δεν είναι τα ίδια.

```

1. SELECT
2.     traj_id,
3.     AVG((p).geoaltitude)::numeric(10,2) AS average_alt,
4.     MAX((p).geoaltitude) AS max_alt,
5.     MAX((p).total_time) / 60 AS DURATION_MINUTES,
6.     ST_MakeLine(ST_Force2D((p).point) ORDER BY (p).timestamp) AS FLIGHT_PATH
7. FROM
8.     db_airflix.complex_flat_table,
9.     UNNEST(complex_points) AS p
10. GROUP BY
11.     traj_id
12. ORDER BY
13.     DURATION_MINUTES DESC;

```

Κώδικας 5-25: SQL Κώδικας αναζήτησης average altitude στο TrajMat model

Επεξήγηση Ερωτήματος TrajMat Model (Κώδικας 5-25)

Στις πρώτες γραμμές κώδικα (γραμμές 1-5), όπως και στην αναζήτηση του flat model η συναρτήση συνάθροισης (Aggregation Function) avg και max, που εφαρμόζονται σε σύνολα αριθμητικών τιμών εμφανίζει την μέση τιμή για το ύψος. Η διαφορά εδώ είναι ότι οι συναρτήσεις συνάθροισης εφαρμόζονται όταν γίνει η μετατροπή των πλειάδων σε κανονικές γραμμές (γραμμή 8). Τέλος ομαδοποιούμε τα αποτελέσματα ανά trajectory **GROUP BY traj_id** και τα ταξινομούμε με βάση την διάρκεια της πτήσης, από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη. Να επισημάνουμε ότι η διάρκεια της πτήσης μετατρέπεται σε λεπτά.

traj_id	average_alt	max_alt	duration
350	29032.06	36450	159
327	30764.28	39275	156
93	31162.69	38250	154
380	32333.27	40750	153
364	25942.86	36525	152

Πίνακας 5-26: Πίνακας αποτελεσμάτων average altitude Flat Model

traj_id	average_alt	max_start_alt	max_stop_alt
350	24835.39	36200	36200
327	24910.13	36925	36925
93	23812.04	38225	38250
380	21705.99	37125	37125
364	19988.96	36500	36525

Πίνακας 5-27: Πίνακας αποτελεσμάτων average altitude Segment Model

A/A	Flat Model – Χρόνος Α- πόκρισης	Segment Model – Χρόνος Απόκρισης	TrajMat Model – Χρό- νος Απόκρισης
1	12,641 sec	6,307 sec	9,249
2	11,289 sec	5,323 sec	9,248
3	14,266 sec	6,311 sec	9,152
4	11,617 sec	4,505 sec	9,266
5	10,653 sec	4,483 sec	9,097
6	9,867 sec	4,860 sec	9,078
7	11,464 sec	3,778 sec	9,191
8	10,418 sec	4,752 sec	9,129
9	11,284 sec	6,296 sec	9,049
10	10,374 sec	4,4sec	8,972
11	10,494 sec	5,312 sec	9,153
12	9,272 sec	5,296 sec	9,047
13	9,385 sec	5,328 sec	9,068
14	9,511 sec	5,620 sec	8,890
15	9,113 sec	5,529 sec	8,916
16	9,520 sec	5,446 sec	9,021
17	9,048 sec	5,954 sec	9,139
18	9,184 sec	5,301 sec	9,089
19	9,049 sec	5,308 sec	8,973
20	9,978 sec	5,912 sec	8,947
Average	10,67 sec	5,95 sec	9,53
Percent- age	-	44 %	10%
	-	37%	

Πίνακας 5-28: Χρόνοι απόκρισης ερωτημάτων μέσω υψόμετρου

5.7 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Από τις συγκρίσεις των τριών μοντέλων προκύπτει ο πίνακας των αποτελεσμάτων (Πίνακας 5-29). Από τις συγκρίσεις παρατηρείτε ότι το πιο γρήγορο μοντέλο είναι το segment, το οποίο μπορεί να μειώνει τον όγκο των δεδομένων, αλλά χάνονται κάποιες μετρικές και η ορθότητα των δεδομένων. Το μοντέλο TrajMat είναι το γρηγορότερο όσον αφορά τις πράξεις OLAP αλλά από την άλλη όταν πρέπει να προσπελάσουμε όλες τα σημεία και της μετρικής μιας τροχιάς, τότε γίνεται υπερβολικά αργό σε σχέση με το flat. Επίσης το TrajMat έδειξε ότι μπορεί να αποθηκεύσει όλες τις μετρικές και μετρήσεις με την ίδια ορθότητα που τις αποθηκεύει και το flat. Τέλος το flat φαίνεται να είναι το πιο επικερδές στην χρήση του εφόσον δεν είναι τόσο αργό όσο το TrajMat.

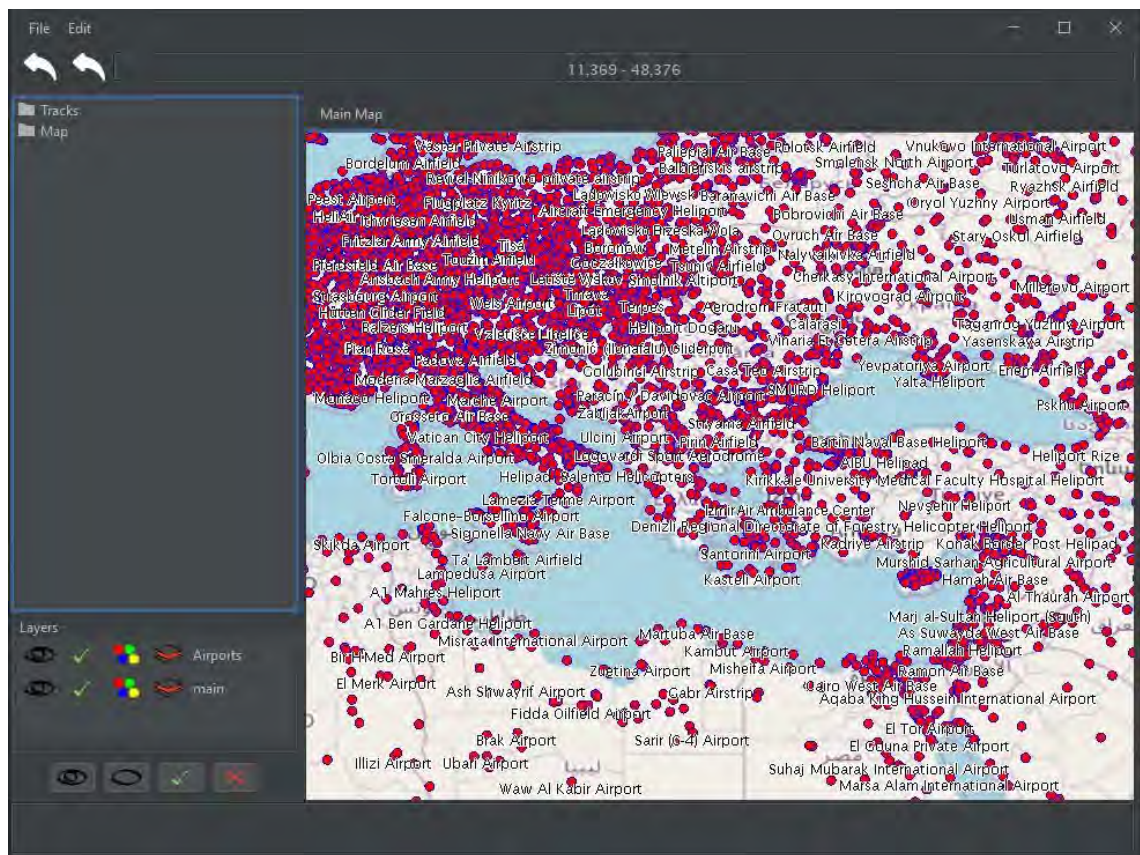
Αποτελέσματα συγκρίσεων			
Category	Model		
	Flat (seconds)	Segment (seconds)	TrajMat (seconds)
Ερωτήματα OLAP			
Data Cube	2,546	1,088	0,775
Flights per Day	1,16	0,923	0,552
Flights per Month	1,234	1,439	0,964
Flight per Year	1,516	1,408	1,126
Ερωτήματα Distributive			
Max Speed	2,349	1,105	16,852
Min speed	2,967	0,908	16,216
Max Altitude	3,384	0,942	17,25
Ερωτήματα Algebraic			
Highest Speed	2,349	1,105	4,999
Lowest Speed	5,13	2,16	4,94
Ερωτήματα Holistic (Average)			
Average Speed	9,67	3,55	8,96
Average Alt	10,67	5,95	9,53
Total Average	3,9	1,8	7,4

Percentage			
Model	Flat	Segment	TrajMat
Flat		53% γρηγορότερο σε σχέση με το flat	
Segment			
TrajMat	47% γρηγορότερο σε σχέση με το TrajMat	75% γρηγορότερο σε σχέση με το TrajMat	
Correctness	11/11	9/11	11/11

Πίνακας 5-29: Συγκρίσεις μοντέλων

6 Λογισμικό Airflix

Σκοπός της πτυχιακής είναι η ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου λογισμικού για την οπτικοποίηση των πληροφοριών της αποθήκης δεδομένων και την πρόβλεψη τροχιάς. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε με την γλώσσα προγραμματισμού Java. Ένα στιγμιότυπο της εφαρμογής φαίνεται στην Εικόνα 6-1.



Εικόνα 6-1: Στιγμιότυπο του λογισμικού AIRFLIX

6.1 Υλοποίηση

Η υλοποίηση της ΑΔ έγινε σε σύστημα PostgreSQL, με ενεργοποιημένο το πρόσθετο PostGIS και η διαδικασία φόρτωσης των δεδομένων στην ΑΔΤ αυτοματοποιήθηκε με την γλώσσα προγραμματισμού Java, Java Spring Boot και Java Persistence API (JPA). Χρησιμοποιήθηκε και η γλώσσα SQL για τις προβολές των αναφορών. Για την επεξεργασία των γεωχωρικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη της Java GeoTools.

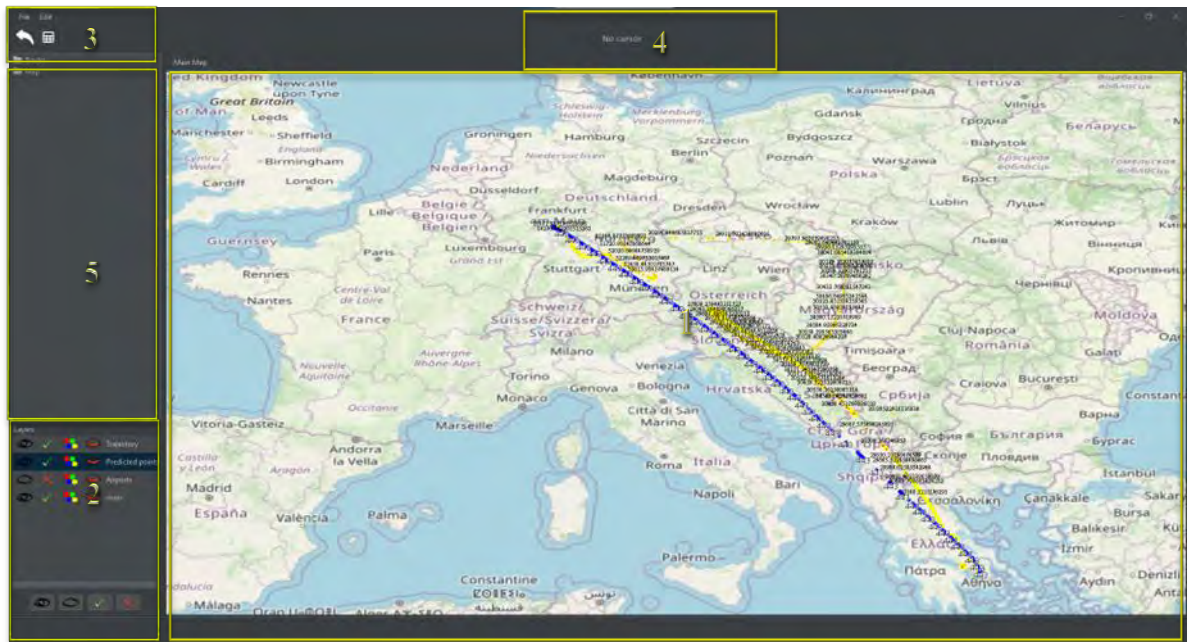
6.2 Η βιβλιοθήκη GeoTools

Η βιβλιοθήκη GeoTool είναι ένα σύνολο εργαλείων για την επεξεργασία των γεωχωρικών δεδομένων ανοιχτού κώδικα (Open Source). Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη ακολουθεί όλα τα πρότυπα για τον χειρισμό γεωχωρικών δεδομένων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός συστήματος GIS (Geographic Information Systems). Η χρήση, η προβολή και η επεξεργασία δεδομένων πάνω σε χάρτες είναι κάποια από τα πολλά χαρακτηριστήρια της βιβλιοθήκης. Υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους χαρτών όπως:

- [1]. Ψηφιδωτή μορφή - Raster Formats – Χάρτες που στηρίζονται σε εικόνες και έχουν ως βάση το pixel. Χάρτες αυτού του τύπου είναι οι GeoTiff, Jpeg, ArcGrid
- [2]. Διανυσματική Μορφή – Vector Formats χάρτες που στηρίζονται σε σχήματα και διανύσματα και έχουν ως βάση το σημείο (point) GeoJson, Shapefile.

Η βιβλιοθήκη περιέχει μία κλάση (Class) Feature, που αναπαριστά μία δομή δεδομένων για τις ιδιότητες των γεωχωρικών αντικειμένων. Ένα feature μπορεί να αποθηκεύσει και να αναπαραστήσει σχεδόν τα πάντα (κύκλους, ευθείες, σημεία κ.ο.κ). Τα γεωχωρικά δεδομένα, έχουν την δυνατότητα να ενσωματωθούν σε ένα στρώμα (layer) για την προβολή τους στους χάρτες. Με την χρήση των features μπορούμε να σχεδιάσουμε και να απεικονίσουμε οτιδήποτε. Η απεικόνιση των αεροδρομίων, η γραμμές των τροχιών γίνεται με τον προγραμματισμό ανάλογων δομών features. Τέλος μπορούμε να αποθηκεύσουμε χάρτες με την απεικόνιση των στοιχείων στις παραπάνω μορφές που αναφέρθηκαν.

6.3 Γραφική Διεπαφή Χρήστη – Graphical User Interface GUI



Εικόνα 6-2: Επιμέρους στοιχεία γραφικής διεπαφής Χρήστη(Στιγμιότυπο της εφαρμογής)

Η γραφική διεπαφή χρήστη απαρτίζεται με επιμέρους στοιχεία. Επισημαίνονται τα κυριότερα όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα 6-2 παραπάνω:

1. **Χάρτης** Το κυρίως πάνελ (main panel) της εφαρμογής περιέχει μια δισδιάστατη μορφή απεικόνισης του κεντρικού διαδραστικού χάρτη. Ο χρήστης δύναται να έχει αλληλεπίδρασή στο συγκεκριμένο πάνελ. Η αλληλεπίδραση επιτυγχάνετε με σύρσιμο (drag) του ποντικιού και κουνώντας δεξιά, αριστερά, πάνω ή κάτω το χάρτη επιτυγχάνεται πλοήγηση στα σημεία ενδιαφέροντος. Τέλος μέσω της ροδέλας του ποντικιού μπορούμε να επέμβουμε στην κλίμακα του χάρτη με ζουμ(zoom in, zoom out).
2. **Layers** Ο πίνακας στρωμάτων (layers) εμφανίζει τη λίστα με τα διάφορα στρώματα που έχουμε δημιουργήσει. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργεί διάφορα layers των τροχιών που οπτικοποιούν δεδομένα στο χάρτη. Το κάθε layer αποθηκεύει προσωρινά στην μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM) δεδομένα προς απεικόνιση πάνω στο χάρτη. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποια layers θα απεικονίζονται στο χάρτη και ποια όχι καθώς και να επιλέξει ποιες επιγραφές (labels) των στοιχείων θα εμφανίζονται για το κάθε σημείο. Τα στοιχεία των στρωμάτων δύναται να είναι σημεία (points), γραμμές ευθείες και μη (lines), κύκλοι, εικόνες ή ότι άλλο επιθυμεί ο χρήστης. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να

απεικονιστούν στο χάρτη με διαφορετικά χρώματα κατόπιν επιλογής του χρήστη.

3. **Γραμμή Εργαλείων** Διαθέτει δύο κομβία (buttons). Το πρώτο κουμπί οδηγεί στην γραφική διεπαφή της αποθήκης δεδομένων (Εικόνα 6-2) με όνομα Trajectories ενώ το δεύτερο «αδειάζει» τον πίνακα των στρωμάτων αφαιρώντας όλα τα στρώματα.

- **Πίνακας Trajectories** (Εικόνα 6-3): Η γραφική διεπαφή των Trajectories απεικονίζει την διάσταση των Trajectories (τον πίνακα της αποθήκης δεδομένων Trajectories) και μας επιτρέπει μια σειρά από ενέργειες που οδηγούν στην ανάκτηση του πίνακα των γεγονότων, τη δημιουργία στρωμάτων και απεικόνιση όλων των σημείων ενός trajectory στην κύρια διεπαφή (main panel).

[1]. Αναπτυσσόμενη λίστα (Drop-down list) επιλογής μοντέλου αποθήκης δεδομένων

[2]. Φίλτρα αναζήτησης

[3]. Έναρξη εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου

[4]. Πίνακας των εγγραφών των trajectories.

- Στήλη 1: Απεικονίζεται το μοναδικό χαρακτηριστικό του trajectory
- Στήλη 2: Αεροδρόμιο αναχώρησης
- Στήλη 3: Αεροδρόμιο προορισμού
- Στήλη 4: Χρόνος καταγραφής του πρώτου σημείου
- Στήλη 5: Χρόνος καταγραφής του τελευταίου σημείου
- Στήλη 6: Πλήθος σημείων ή τμημάτων αναλόγως το επιλεγμένο μοντέλο
- Στήλη 7: Κουμπιά χειρισμού της εγγραφής.

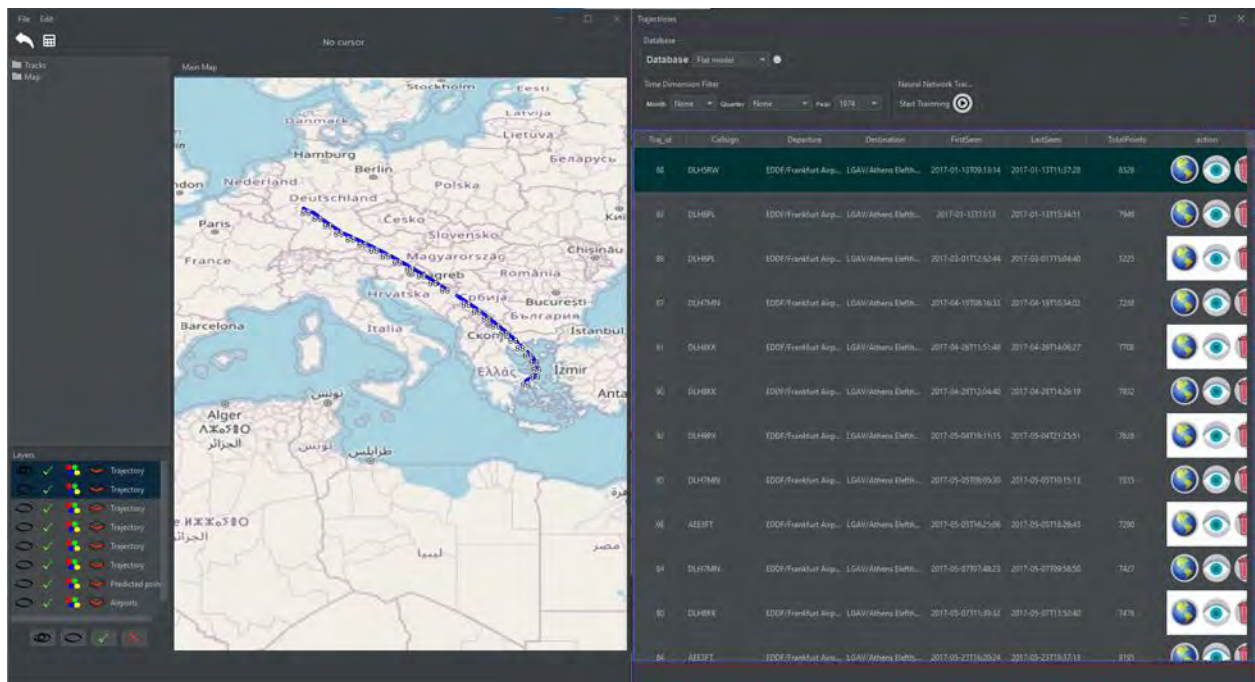
Traj ID	Category	Signature	Destination	Start Date	End Date	Total Points
88	DLH00A	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-01-11T09:19:14	2017-01-11T11:17:08	1538
89	DLH00L	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-01-11T13:02	2017-01-11T15:34:51	7999
89	DLH00L	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-03-01T11:52:44	2017-03-01T13:04:49	5205
87	DLH00M	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-04-10T08:38:03	2017-04-10T10:14:02	2238
81	DLH00X	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-04-26T11:51:48	2017-04-26T14:04:37	7788
80	DLH00X	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-04-28T13:04:40	2017-04-28T14:26:19	1802
82	DLH00Y	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-05-24T16:11:11	2017-05-24T17:25:51	7659
85	DLH00M	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-05-02T08:00:00	2017-05-02T10:15:13	1334
86	AEE00T	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-05-02T16:25:08	2017-05-02T18:26:43	7280
84	DLH00M	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-05-07T17:46:23	2017-05-07T20:00:50	3427
80	DLH00X	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-05-07T11:39:02	2017-05-07T13:50:46	7476
84	AEE00T	EDDF Frankfurt Airport	LGAV Athens Eleftherios Venizelos International Air...	2017-05-22T08:00:00	2017-05-22T10:01:12	8195

Εικόνα 6-3: Πίνακας Trajectories Διεπαφή εγγραφών αποθήκης δεδομένων

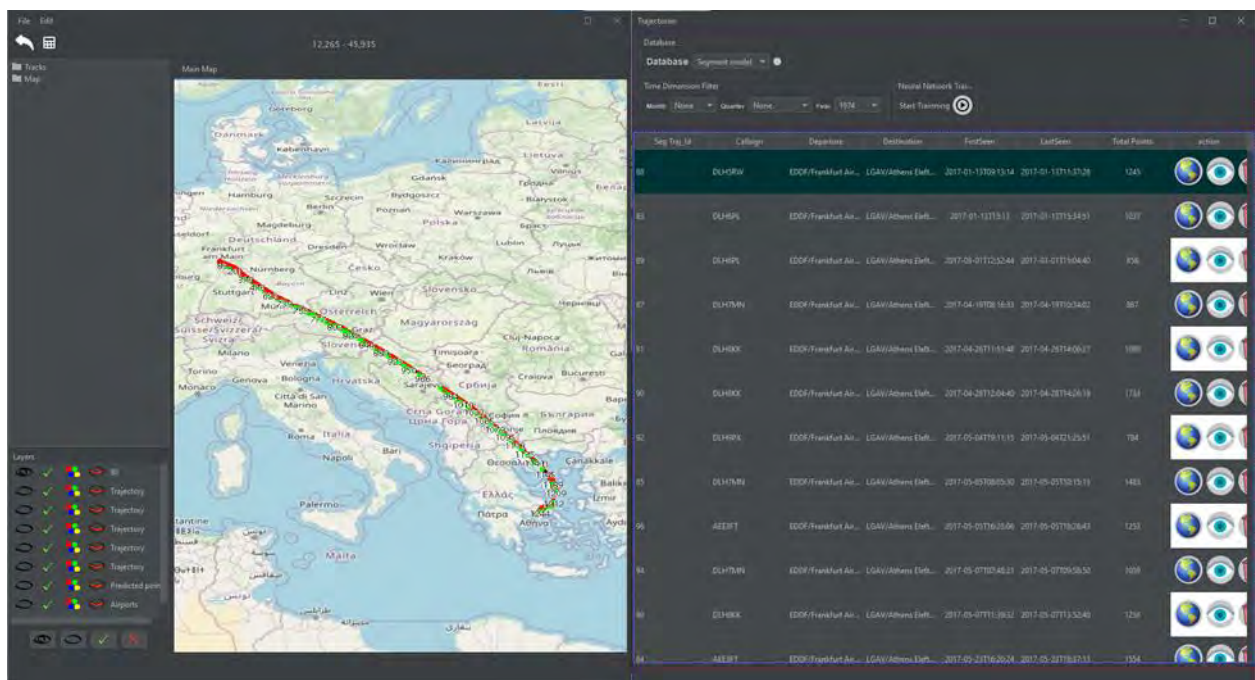
4. **Cursor:** Προβολή των συντεταγμένων στην τοποθεσία του κέρσورا (mouse cursor) Εικόνα 6-2. Όταν το ποντίκι είναι τοποθετημένο μέσα στον χάρτη το συγκεκριμένο πάνελ απεικονίζονται οι συντεταγμένες σε γεωγραφικό πλάτος και μήκος.
5. **Panel:** Στο Πάνελ της διεπαφής ο χρήστης προσαρμόζει ρυθμίσεις απεικόνισης Εικόνα 6-2.

Επιλογή και απεικόνιση των Trajectories

Η διεπαφή των trajectories μας δίνει την δυνατότητα να απεικονίσουμε τον πίνακα των γεγονότων (τις εγγραφές) των δύο μοντέλων στο χάρτη. Επιλέγοντας το μοντέλο από τον πίνακα Database μπορούμε να εναλλασσόμαστε μεταξύ του Flat και του Segment μοντέλου όπως φαίνεται στις Εικόνα 6-4 Εικόνα 6-5. Για την κάθε εγγραφή στη διάσταση των trajectories μπορούμε πατώντας το κουμπί της «υδρόγειου» να φέρουμε όλα τα σημεία του επιλεγμένου trajectory στο χάρτη δημιουργώντας ένα στρώμα (layer) με το μοναδικό αναγνωριστικό του trajectory (traj_id). Στην περίπτωση που έχουμε επιλεγμένο το μοντέλο Flat (Εικόνα 6-4) στο χάρτη σχηματίζεται μία γραμμή από όλα τα σημεία που είναι αποθηκευμένα, ενώ παρατηρείται κενό όπου υπήρχε έλλειψη πληροφοριών. Η διαφορά στην απεικόνιση του Flat με το Segment model (Εικόνα 6-5), είναι ότι εμφανίζονται τα τμήματα στο χάρτη (segments), αντί της γραμμής και η αρχή και το τέλος του κάθε τμήματος απεικονίζεται με πράσινο τετράγωνο ενώ το κάθε τμήμα αποτελείται από μία κόκκινη ευθεία γραμμή.

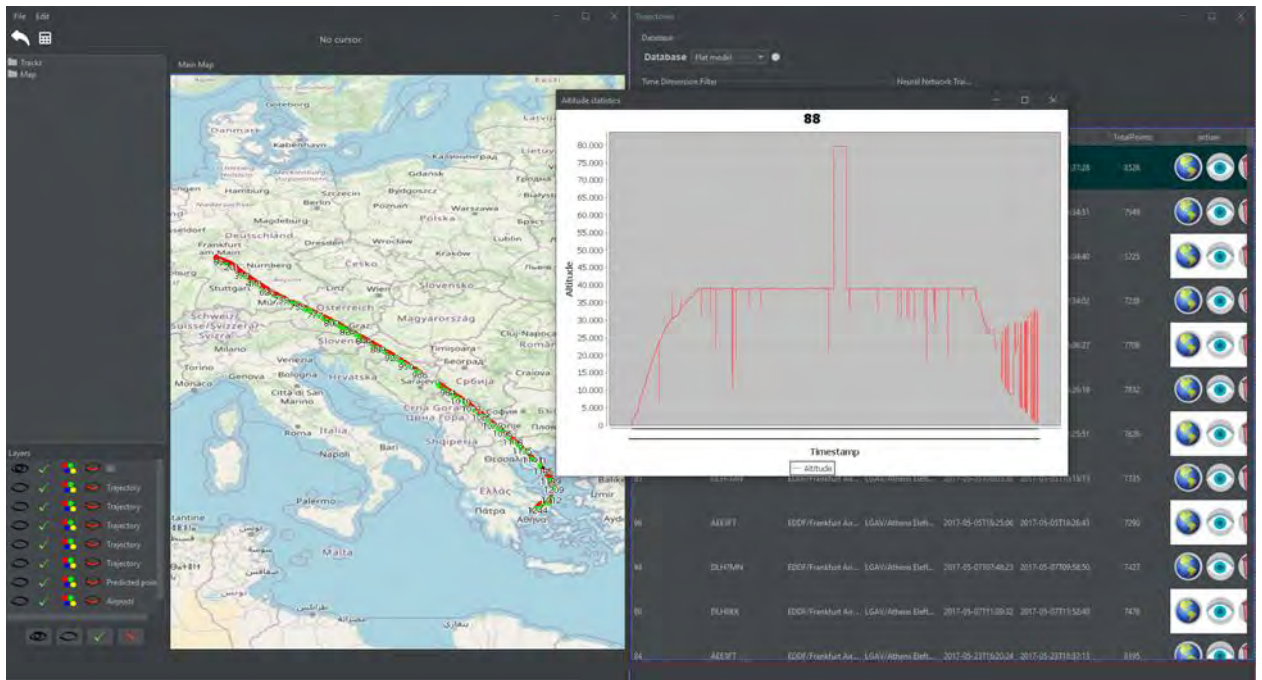


Εικόνα 6-4: Πίνακας Trajectories Επιλογή και απεικόνιση trajectory id:88 Flat model



Εικόνα 6-5: Πίνακας Trajectories Επιλογή και απεικόνιση trajectory id:88 Segment model

Τέλος όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6-6) μπορούμε να απεικονίσουμε το διδιάστατο γράφημα για τις πληροφορίες του καταγεγραμμένου ύψους που ακολούθησε η πτήση πατώντας το κουμπί με το «μάτι». Στο γράφημα απεικονίζεται στον άξονα «X» ο χρόνος ενώ στο κάθετο άξονα «Y» απεικονίζεται το ύψος. Η χρήση των γραφημάτων μπορεί να μας δώσει υψομετρικές πληροφορίες της πτήσης σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 6-6: Πίνακας Trajectories Προβολή γραφήματος ύψους σε σχέση με το χρόνο του trajectory 88

6.4 Εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου – Neural Network

Η αποθήκευση ιστορικών δεδομένων τροχιάς μέσω της εφαρμογής Airflix μας δίνει δυνατότητες εξαγωγής συμπερασμάτων από την ανάλυση αυτών αλλά ξεκλειδώνει και άλλες. Στόχος της παρούσας διπλωματικής αλλά και της εφαρμογής Airflix είναι η συνεχής εκπαίδευση και εύρεση νέων μοντέλων μηχανικής μάθησης (machine learning models) για την πρόβλεψη τροχιάς. Η χρήση διαφορετικών νευρωνικών δικτύων για την εύρεση ενός μοντέλου πρόβλεψης είναι ένας από τους κύριους στόχους. Η χρήση του νευρωνικού δικτύου θα μας βοηθήσει στην εύρεση της εξίσωσης που θα «κατανοεί» την μηχανική πτήσης του αεροσκάφους.

6.4.1 Νευρωνικά Δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι συστήματα τεχνητής νοημοσύνης εμπνευσμένα από τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Αποτελούνται από πολυεπίπεδους κόμβους (νευρώνες) που συνδέονται μεταξύ τους και επεξεργάζονται δεδομένα μέσω συνδέσεων (συνάψεις). Κάθε νευρώνας λαμβάνει σήματα, τα επεξεργάζεται και τα μεταδίδει στους επόμενους, επιτρέποντας τη μάθηση και την αναγνώριση προτύπων. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως η αναγνώριση εικόνας, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας και η πρόβλεψη. Η εκπαίδευσή τους γίνεται μέσω δεδομένων, προσαρμόζοντας τις

συνδέσεις για βελτιστοποίηση της απόδοσης. Τα νευρωνικά δίκτυα βελτιστοποιούν την απόδοσή τους μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται οπισθοδιάδοση (backpropagation). Η οπισθοδιάδοση είναι μια μέθοδος εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται για να μειώσει το σφάλμα μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των πραγματικών τιμών. Αφού το νευρωνικό δίκτυο παράξει μια έξοδο, το σφάλμα υπολογίζεται συγκρίνοντας την έξοδο αυτή με την επιθυμητή έξοδο. Το σφάλμα στη συνέχεια διαδίδεται προς τα πίσω μέσω του δικτύου, από την έξοδο προς την είσοδο, προσαρμόζοντας τα βάρη των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους όπως ο αλγόριθμος gradient descent, μέχρις ότου το σφάλμα ελαχιστοποιηθεί και το δίκτυο μπορέσει να κάνει ακριβείς προβλέψεις. Η οπισθοδιάδοση καθιστά δυνατή τη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου, επιτρέποντας του να μάθει από τα δεδομένα και να προσαρμόζει συνεχώς τις παραμέτρους του για καλύτερα αποτελέσματα.

6.4.2 Η βιβλιοθήκη Encog

Η Βιβλιοθήκη Encog της Java αποτελεί ένα framework για μηχανική μάθηση (Machine Learning) [23] και υποστηρίζει διαφορετικούς αλγόριθμους μάθησης, όπως Bayesian Networks, Hidden Markov Models και Support Vector Machines. Ωστόσο το πιο δυνατό της χαρακτηριστικό έγκειται στους αλγόριθμους νευρωνικών δικτύων. Η βιβλιοθήκη προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας μιας ευρείας ποικιλίας δικτύων αλλά και μεθόδους για την ομαλοποίηση (normalization) και επεξεργασία των δεδομένων. Η βιβλιοθήκη χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς όπως της ιατρικής, οικονομικής ερευνάς και της αεροδιαστημικής [24].

6.4.3 Προσέγγιση Συνάρτησης – Function Approximation

Για την πρόβλεψη της τροχιάς θα πρέπει να προσεγγίσουμε την σχέση (συνάρτηση) που υπάρχει μεταξύ των αποθηκευμένων τιμών ενός trajectory. Το νευρωνικό δίκτυο λαμβάνει ως είσοδο ένα σύνολο από έξι χαρακτηριστικά: γεωγραφικό πλάτος (lat), γεωγραφικό μήκος (lon), ύψος (altitude), ταχύτητα (speed), διεύθυνση (vector), και χρόνο (time) και στόχος του είναι να βρεθεί η συνάρτηση που, με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, θα προβλέπει την μελλοντική θέση του αεροσκάφους, σε διάστημα τριών δευτερολέπτων. Για παράδειγμά, για προσέγγιση της συνάρτησης πρόβλεψης τροχιάς τα επόμενα 3 δευτερόλεπτα, θα πρέπει για κάθε σημείο από t_1 έως t_{n-3} στο πίνακα των γεγονότων για χρόνο t (όπου 1 είναι το πρώτο καταγεγραμμένο σημείο με τις επιμέρους πληροφορίες και $n-3$ το

σημείο 3 δευτερόλεπτα πριν το τελευταίο) να βρεθεί η σχέση με κάθε t_3-t_n . Στους παρακάτω πίνακες απεικονίζονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις συναρτήσεων όπου στον Πίνακα 6-1 έχουμε είσοδο 6 δεδομένων όπου $x_n = (\text{latitude}_n, \text{longitude}_n, \text{altitude}_n, \text{speed}_n, \text{time}_n, \text{heading}_n)$ όπου το n παίρνει τιμές από $\{1 \dots n-3\}$ ενώ στον Πίνακα 6-2 έχουμε ως είσοδο στην συνάρτηση 12 δεδομένων ($\text{latitude}_n, \text{longitude}_n, \dots, \text{latitude}_{n+1}, \text{longitude}_{n+1}, \text{altitude}_{n+1}, \text{speed}_{n+1}, \text{time}_{n+1}, \text{heading}_{n+1}$). Στην πραγματικότητα ψάχνουμε την συνάρτηση η οποία παίρνει ως είσοδο το πρώτο σημείο ενός trajectory από το πίνακα δεδομένων (η κατανομή των σημείων ενός trajectory είναι ανά δευτερόλεπτο) και θα μας δίνει ως αποτέλεσμα το τέταρτο σημείο (+3 δευτερόλεπτα), εκεί που θα βρίσκεται δηλαδή το ίχνος της τροχιάς έπειτα από τρία δευτερόλεπτα.

Πίνακας 1	
$F(x_n) = x_{n+3}$	
Δεδομένα Εισόδου	Έξοδος Συνάρτησης
X_1	X_4
X_2	X_5
X_{n-3}	X_n

Πίνακας 6-1: Συνάρτηση 6 παραμέτρων

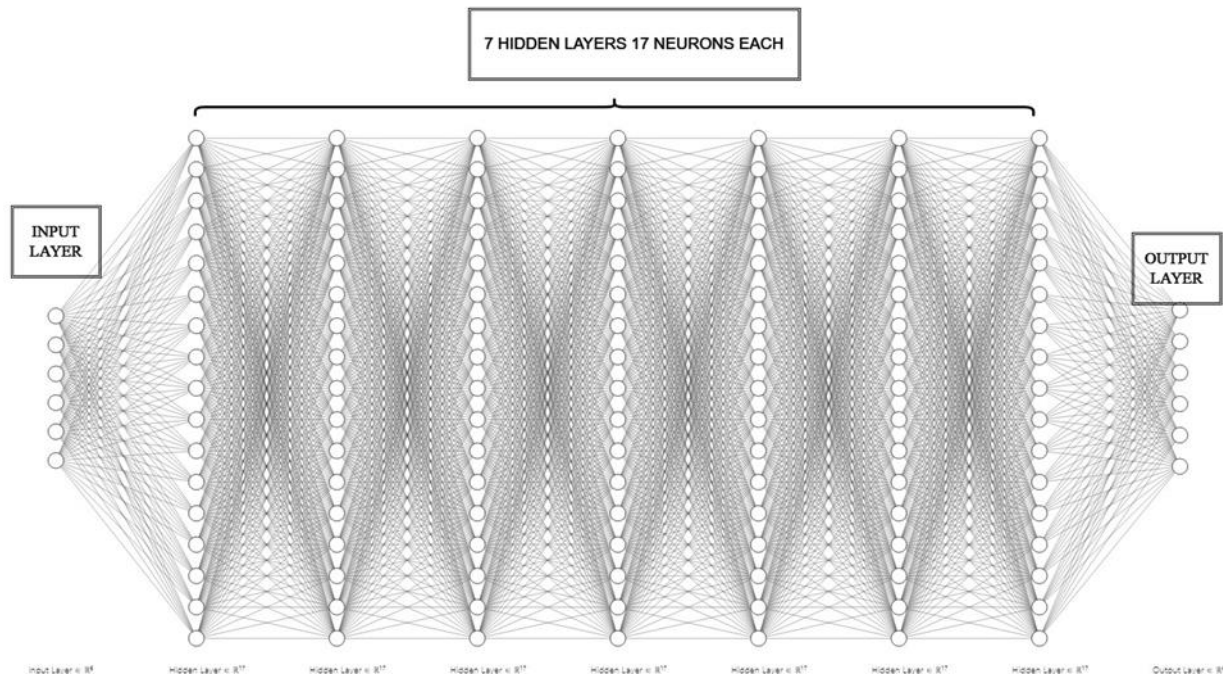
Πίνακας 2	
$F(x_n + x_{n+2}) = x_{n+3}$	
Δεδομένα Εισόδου	Έξοδος Συνάρτησης
$X_1 + X_2$	X_4
$X_2 + X_3$	X_5
$X_{n-3} + X_{n-2}$	X_n

Πίνακας 6-2: Συνάρτηση 12 παραμέτρων

6.4.4 Αρχιτεκτονική Δικτύου

Η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη της τροχιάς είναι σχεδιασμένη με συγκεκριμένες παραμέτρους για βέλτιστη απόδοση. Το δίκτυο αποτελείται από ένα επίπεδο εισόδου (input layer) με 6 νευρώνες, που αντιστοιχούν στις έξι εισόδους: γεωγραφικό πλάτος (lat), γεωγραφικό μήκος (lon), ύψος (altitude), ταχύτητα (speed), διεύθυνση (vector), και χρόνο (time). Ακολουθούν 7 κρυφά επίπεδα (hidden layers), το καθένα με 17 νευρώνες, όπου πραγματοποιείται η επεξεργασία και η εξαγωγή χαρακτηριστικών από τα δεδομένα εισόδου. Τέλος, το επίπεδο εξόδου (output layer) αποτελείται από 6 νευρώνες, οι οποίοι παρέχουν την προβλεπόμενη μελλοντική θέση του αεροσκάφους. Αυτή η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική επιτρέπει στο δίκτυο να μάθει πολύπλοκες συναρτήσεις και σχέσεις μεταξύ των εισόδων και της επιθυμητής εξόδου, επιτυγχάνοντας ακριβείς προβλέψεις για τη μελλοντική τροχιά. Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται στο σύνολο των αποθηκευμένων δεδομένων, χρησιμοποιώντας την τεχνική της οπισθοδιάδοσης σφαλμάτων (back propagation) για τη βελτιστοποίηση των βαρών των συνδέσεων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, το δίκτυο μαθαίνει να συσχετίζει τις εισόδους με τις επιθυμητές εξόδους, επιτυγχάνοντας έτσι να γενικεύσει και να προβλέψει με ακρίβεια την

μελλοντική θέση του αεροσκάφους, προσεγγίζοντας την επιθυμητή συνάρτηση που περιγράφει τη δυναμική της πτήσης. Η αρχιτεκτονική του δικτύου φαίνεται στην Εικόνα 6-7 και ο κώδικας του με την χρήση της βιβλιοθήκης encog.



Εικόνα 6-7: Αρχιτεκτονική Δικτύου

```
//Create the network
BasicNetwork network = new BasicNetwork();
//Input layer
network.addLayer(new BasicLayer(null, true, 6));
//Hidden layer
network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationTANH(), true, 17));
network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationTANH(), true, 17));
network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationTANH(), true, 17));
network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationTANH(), true, 17));
network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationTANH(), true, 17));
network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationTANH(), true, 17));
network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationTANH(), true, 17));
//output layer
network.addLayer(new BasicLayer(new ActivationTANH(), false, 6));
network.getStructure().finalizeStructure();
```

Κώδικας 6-1: Δημιουργίας Input,Hidden Output Layers του Νευρωνικού δικτύου

6.4.5 Ομαλοποίηση δεδομένων

Η προετοιμασία των dataset για την εκπαίδευση και την δοκιμή του δικτύου για την πρόβλεψη της τροχιάς περιλαμβάνει τα στάδια της 1) επιλογής των τροχιών, 2) της εξαγωγής από τον πίνακα γεγονότων (Fact Table) των κατάλληλων δεδομένων για το κάθε

trajectory και 3) την οργάνωση τους σε αρχεία csv (comma separated value). Αρχικά, γίνεται εξαγωγή (extract) των δεδομένων για κάθε trajectory για τις τρέχουσες τιμές, το γεωγραφικό πλάτος (lat), το γεωγραφικό μήκος (lon), την ταχύτητα (speed), το ύψος (alt), τη διεύθυνση (vector) και το χρόνο (time). Αυτά τα δεδομένα πρέπει να συνδυαστούν με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές μετά από τρία δευτερόλεπτα, δηλαδή τα lat+3, lon+3, speed+3, alt+3, vector+3 και time+3. Το τελικό dataset αποθηκεύεται σε αρχείο CSV με 12 στήλες: lat, lon, speed, alt, vector, time, lat+3, lon+3, speed+3, alt+3, vector+3 και time+3.

Για να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα του νευρωνικού δικτύου, είναι απαραίτητο να γίνει ομαλοποίηση (normalization) των δεδομένων. Η διαδικασία ομαλοποίησης normalization βοηθά στη μείωση της επίδρασης των διαφορών κλίμακας μεταξύ των διαφόρων χαρακτηριστικών και επιταχύνει τη διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου. Μία από τις πιο απλές και συνηθισμένες μεθόδους normalization είναι η συνάρτηση Min-Max. Η συνάρτηση αυτή μετασχηματίζει τις τιμές των δεδομένων σε ένα προκαθορισμένο εύρος, συνήθως [0, 1] γιατί είναι ποιο εύκολο να γίνουν πράξεις με δεδομένα που παίρνουν τιμές μεταξύ 0-1 παρά με 0 – 45.000. Για κάθε χαρακτηριστικό x , η απλοποιημένη τιμή της x' υπολογίζεται ως εξής:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

όπου $x_{\min}$ και $x_{\max}$ είναι οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές του χαρακτηριστικού x στο dataset.

Η διαδικασία normalization εφαρμόζεται σε κάθε στήλη του dataset ξεχωριστά. Αρχικά, υπολογίζουμε τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές για κάθε χαρακτηριστικό από τα αποθηκευμένα δεδομένα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Min-Max, κανονικοποιούμε τις τιμές όλων των χαρακτηριστικών τόσο για τις τρέχουσες όσο και για τις μελλοντικές τιμές. Αυτό το βήμα είναι κρίσιμο καθώς διασφαλίζει ότι όλες οι είσοδοι στο νευρωνικό δίκτυο βρίσκονται στο ίδιο εύρος τιμών, διευκολύνοντας έτσι τη διαδικασία εκμάθησης και βελτιώνοντας την ακρίβεια των προβλέψεων.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας κανονικοποίησης, το τελικό normalized dataset αποθηκεύεται ξανά σε αρχείο CSV. Αυτό το αρχείο είναι έτοιμο για χρήση στην εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Η σωστή προετοιμασία και κανονικοποίηση του dataset

είναι θεμελιώδη βήματα για την επιτυχή υλοποίηση του Trajectory Predictor, καθώς επιτρέπουν στο μοντέλο να μάθει πιο αποδοτικά και να παρέχει πιο ακριβείς προβλέψεις για την τροχιά των αεροσκαφών.

6.4.6 Συνάρτηση Ενεργοποίησης Activation Function

Η συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) εφαρμόζεται στην είσοδο κάθε νευρώνα σαν ενεργοποιητής, δηλαδή καθορίζει την είσοδο και την έξοδο των τιμών του κάθε νευρώνα. Η συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) είναι ένα μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται σε νευρωνικά δίκτυα για να εξασφαλίσει την μη γραμμικότητα στο μοντέλο. Χωρίς αυτή, ένα νευρωνικό δίκτυο που αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα θα λειτουργούσε απλώς ως ένας γραμμικός μετασχηματισμός των εισόδων του, γεγονός που περιορίζει σοβαρά την ικανότητά του να μοντελοποιεί πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των δεδομένων.

Υπάρχουν διάφορες δημοφιλείς συναρτήσεις ενεργοποίησης που χρησιμοποιούνται στα νευρωνικά δίκτυα:

1. Sigmoid (Σιγμοειδής):

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Μετασχηματίζει την είσοδο σε μια τιμή μεταξύ 0 και 1, και χρησιμοποιείται συχνά σε δίκτυα όπου οι έξοδοι είναι πιθανότητες.

2. Tanh (Υπερβολική Εφαπτομένη):

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Μετασχηματίζει την είσοδο σε μια τιμή μεταξύ -1 και 1, και είναι χρήσιμη σε πολλές περιπτώσεις επειδή τα δεδομένα της είναι κεντραρισμένα γύρω από το μηδέν, κάτι που μπορεί να βοηθήσει στη σύγκλιση κατά την εκπαίδευση.

3. ReLU(Rectified Linear Unit):

$$ReLU(x) = \max(0, x)$$

Είναι πολύ δημοφιλής στις σύγχρονες εφαρμογές λόγω της απλότητάς της και της αποτελεσματικότητάς της στην εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων. Ενεργοποιεί μόνο τα θετικά εισερχόμενα σήματα και αφήνει τα αρνητικά ως μηδέν.

Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης ενεργοποίησης εξαρτάται από την ειδική εφαρμογή και τα χαρακτηριστικά των δεδομένων, καθώς επηρεάζει άμεσα την απόδοση

και την δυνατότητα εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Έπειτα από αρκετές δοκιμές η συνάρτηση ενεργοποίησης που επιλέχτηκε για το δίκτυο είναι η $\tanh(x)$ (όπως φαίνεται και στον Κώδικας 6-1) της οποίας τα αποτελέσματα είναι κεντραρισμένα γύρω από το μηδέν. Η συνάρτηση $\tanh(x)$ επιλέχτηκε καθώς δεν υπάρχουν στα δεδομένα αρνητικές τιμές εισόδου. Το ύψος, η ταχύτητα, η θέση καθώς και ο χρόνος, ως τιμές εισόδου δεν περιέχουν αρνητικές τιμές καθιστώντας την $\tanh(x)$ ιδανική.

6.4.7 Εκπαίδευση Νευρωνικού δικτύου

Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη της τροχιάς των αεροσκαφών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Java και τη βιβλιοθήκη μηχανικής μάθησης Encog. Η βιβλιοθήκη Encog προσφέρει μια σειρά από εργαλεία και αλγόριθμους για την ανάπτυξη και εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων, καθιστώντας την ιδανική επιλογή για την υλοποίηση του Trajectory Predictor. Το νευρωνικό δίκτυο σχεδιάστηκε να λαμβάνει τις έξι εισόδους (lat, lon, speed, alt, vector, time) και να προβλέπει τις αντίστοιχες τιμές μετά από τρία δευτερόλεπτα (lat+3, lon+3, speed+3, alt+3, vector+3, time+3), βασιζόμενο στα ιστορικά δεδομένα πτήσεων.

Για τη βελτιστοποίηση των βαρών του νευρωνικού δικτύου, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση ενεργοποίησης $\tanh()$. Η συνάρτηση $\tanh()$ είναι μια υπερβολική εφαστομένη που μετασχηματίζει τις εισόδους σε τιμές μεταξύ -1 και 1, επιτρέποντας στο δίκτυο να μάθει πιο αποτελεσματικά και να χειριστεί καλύτερα τα μη γραμμικά δεδομένα. Η διαδικασία εκπαίδευσης (Κώδικας 6-2) περιλάμβανε 5000 επαναλήψεις (epochs) ή μέχρι το ποσοστό σφάλματος να φτάσει στο 0.00099, όποιο από τα δύο συνέβαινε πρώτο. Αυτό εξασφάλισε ότι το δίκτυο μπορούσε να βελτιστοποιηθεί επαρκώς χωρίς να υπερπροσαρμοστεί στα δεδομένα εκπαίδευσης.

Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, το νευρωνικό δίκτυο ενημέρωνε συνεχώς τα βάρη των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων μέσω της διαδικασίας της οπισθοδιάδοσης (backpropagation). Η οπισθοδιάδοση επέτρεπε στο δίκτυο να μειώνει το σφάλμα πρόβλεψης με κάθε επανάληψη, προσαρμόζοντας τα βάρη ώστε να βελτιστοποιήσει τις προβλέψεις του. Η χρήση του Encog και της $\tanh()$ συνάρτησης, σε συνδυασμό με τον μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, εξασφάλισε ότι το δίκτυο εκπαιδεύτηκε αποτελεσματικά, καταλήγοντας σε ένα μοντέλο ικανό να παρέχει ακριβείς προβλέψεις για τις μελλοντικές θέσεις των αεροσκαφών, εντός του καθορισμένου στόχου σφάλματος. Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας εκπαίδευσης του δικτύου.

```

do {
    train.iteration();
    log.info("Epoch#{0} Error:{0}", epoch, String.format("%.9f",
train.getError()));
    epoch++;

    if (epoch >= 5000 && network.calculateError(dataset) > 0.00099) {
        returnCode = 1;
        log.info("Try again ");
        return returnCode;
    }
} while (network.calculateError(dataset) > 0.00098);
//Save the network to file
EncogDirectoryPersistence.saveObject(new File("saved_network.csv"),
network);
log.info("Neural Network Results");

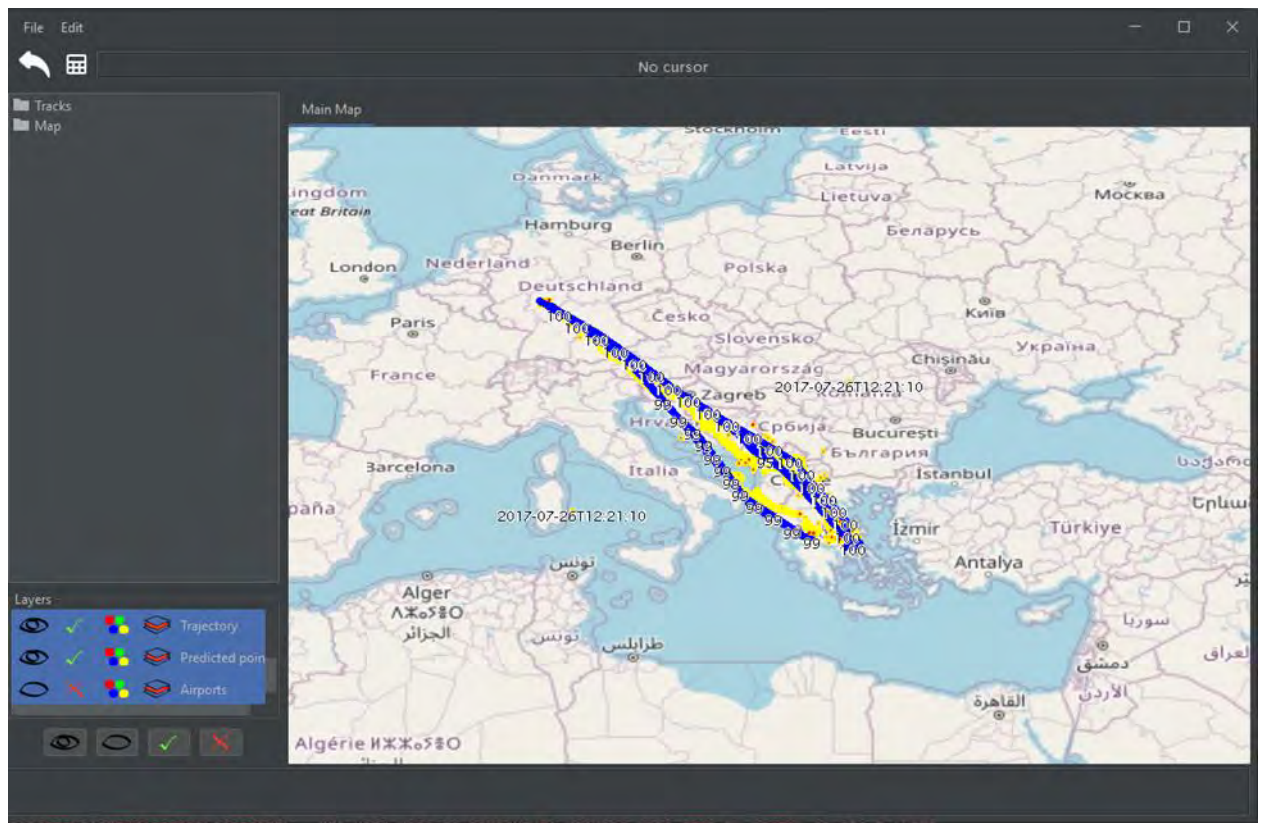
```

Κώδικας 6-2: Εκπαίδευση BNN με την χρήση της Encog

Η ενεργοποίηση του παραπάνω κώδικα και διαδικασία έναρξής της εκπαίδευσης του νευρωνικού γίνεται με το πάτημα του κομβίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-3. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, εμφανίζονται στην εφαρμογή τα επιλεγμένα προς εκπαίδευση και δοκιμή trajectories με το χαρακτηριστικό τους (id) στον πίνακα με τα layers. Τέλος η πρόβλεψη της τροχιάς οπτικοποιείται πάνω στον χάρτη όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-8. Με χρώμα μπλε εμφανίζονται τα αποθηκευμένα στην ΑΔΤ trajectories ενώ με κίτρινο χρώμα διαγράφεται η γραμμή πρόβλεψης της τροχιάς. Στην Εικόνα 6-8 στο χάρτη εμφανίζονται τα επιλεγμένα trajectories με id (99,100).

The max and average error results	
The number of records in training file	42263
Max error Lat	95,64 %
Max error Lon	17,15 %
Max error Alt	84,00 %
Max error Vel	136,11 %
Max error Vector	149,12 %
Max error Time	0,00 %
Average Lat error percent	1,95 %
Average Lon error percent	0,45 %
Average Alt error percent	20,75 %
Average Vel error percent	20,75 %
Average Vector error percent	6,82 %
Average Time error percent	0,00 %

Πίνακας 6-3 Ποσοστά σφάλματος



Εικόνα 6-8: Απεικόνιση της πρόβλεψη τροχιάς στην εφαρμογή Airfix (με κίτρινο μονοπάτι)

7 Συμπεράσματα

Ο τομέας των αερομεταφορών αυξάνεται εκθετικά με τα χρόνια καθιστώντας το αεροπλάνο ως πρωταγωνιστή στις μετακινήσεις. Η πρόβλεψη τροχιάς είναι σίγουρα ένα από τα βήματα για την επίτευξη της αύξησης του όγκου των πτήσεων με ασφάλεια. Η καρδιά ενός συστήματος trajectory predictor όπως αποδείχτηκε μέσα από την συγκεκριμένη πτυχιακή είναι μια καλώς δομημένη Αποθήκη Δεδομένων Τροχιάς. Οι προτάσεις των δύο μοντέλων αποτελούν εγγύτητα και ακεραιότητα των δεδομένων. Παρόλα αυτά ο χρόνος και η ασφάλεια σε τέτοια συστήματα διαχείρισης Εναέριας Κυκλοφορίας απαιτούν επεξεργασία και εξαγωγή αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο (real time). Η πρόταση του segment model μειώνει συμπιέζοντας αισθητά τον όγκο των δεδομένων, μειώνει τους χρόνους απόκρισης και κρατάει την ακεραιότητα των δεδομένων, χωρίς να χαθούν τα σημασιολογικά δεδομένα.

Η διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας προσανατολίζεται και θα εκσυγχρονιστεί στο προσεχές μέλλον στηριζόμενη στις προβλέψεις τροχιάς (Trajectory Based Operations - TBO). Η πρόβλεψη τροχιάς θα προσφέρει ευελιξία στην αεροναυτιλία μειώνοντας τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα αφού θα μπορεί να εξασφαλίσει δυναμικές αλλαγές στις πορείες των αεροσκαφών εξοικονομώντας καύσιμα. Η διαχείριση της κυκλοφορίας θα γίνει ευκολότερη και ίσως αυτοματοποιηθεί πλήρως. Η κατανόηση των κανόνων που διέπουν την μηχανική πτήσης, αποδείξαμε ότι είναι πιο εύκολα κατανοητή από τα πληροφοριακά συστήματα, μέσω της ανάλυση της τροχιάς. Τα δύο μοντέλα «Flat Model» και «Segment Model» μπορούν να «εκπαιδεύουν» εν συνεχεία, με τον μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας που αποθηκεύουν την πληροφορία, Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα - ΤΝΔ για την προσέγγιση ενός όλο και πιο ακριβέστερου μοντέλου πρόβλεψης.

Η μηχανική μάθηση ως μέθοδος για την πρόβλεψη της τροχιάς είναι η πιο προσοδοφόρα σε σύγκριση με τις state estimation και kinetic μεθόδους. Είναι ξεκάθαρο ότι από ανθρώπινης φύσης δεν είναι εύκολη η εύρεση εξισώσεων για την ακριβής μοντελοποίηση της πρόβλεψης της τροχιάς λόγω αστάθμητων παραγόντων. Από την άλλη η μηχανική μάθηση μπορεί να «μάθει» τις κινήσεις και να προβλέψει τροχιές με αλγόριθμους εξόρυξης δεδομένων όπως δείξαμε και σχεδόν με μικρό βαθμό λάθους.

Ως ετούτου πετύχαμε την κατασκευή ενός συστήματος, μικρής κλίμακας, Trajectory Predictor και προβλέψαμε την τροχιά στηριζόμενοι στην αποθήκη δεδομένων με ιστορικά trajectories προερχόμενα από ADS-B. Η πρόταση των δύο μοντέλων καθώς και η πιστοποίηση τους με ιστορικά δεδομένα απέδειξε την λειτουργικότητα της πρόβλεψης και την εφαρμογή της στο τομέα της αεροναυτιλίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Airbus. (2018). "*Global Networks, Global Citizens, Global Market Forecast 2018 - 2037*". Presented by Eric Schulz. Airbus SE. Ανάκτηση [Ιουλ 2023] από (<http://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2018-07-nearly-37400-new-aircraft-valued-at-us58-trillion-required-over-20>).
- [2] EUROCONTROL.(2018). "*Challenges of Growth 2018: Annex1- Flight Forecast to 2040*" EUROCONTROL Statistics and Forecast Service (STATFOR)
- [3] Lopez Leones, J., Ranieri, A., & Ruiz, S. (2018) "*A Novel Performance Framework and Methodology to Analyze the Impact of 4D Trajectory Based Operations in the Future Air Traffic Management System*". Journal of Advanced Transportation 2018 - Springer (2018). <https://doi.org/10.1155/2018/1601295>
- [4] Slattery R, & Zhao Y. (1995) "*Trajectory Modeling for Automated en route air traffic control (AERA)*". Presented at American Control Conference (ACC'95), Seattle, WA, USA, 21-23 June 1995,
- [5] AP16 Team. (2010) "*Common TP Structure and Terminology in Support of SESAR & NextGen*", (White Paper v1.0)
- [6] Garcia-Chico, J., Vivona R., & Cate, K. (2008) "*Characterizing Intent Maneuvers From Operational Data: A step towards Trajectory Uncertainty Estimation*" In proceeding of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Honolulu, HI: American Institute of Aeronautics and Astronautics. Ανάκτηση [Ιουν 2023] από <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2008-6520>
- [7] Liang, M., Delahaye, D., & Wang, Z. (2017) "*Short-term 4D Trajectory Prediction Using Machine Learning Methods*", Collection of Open Conferences in Research Transport, 2017, p. 285. <https://doi.org/10.2829/376211> .

- [8] Chatterji, G. (1999) "Short Term Trajectory Prediction Methods" In *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Portland, OR, USA, August 9–11, 1999. AIAA Paper 1999-4233
- [9] International Civil Aviation Organization (2007). Doc 4444, *Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management* (PANS-ATM), Fifteenth edition Montreal, Canada: ICAO.
- [10] Ευρωπαϊκός Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 549/2004 άρθρο 2 παράγραφος 4.
- [11] Ευρωπαϊκός Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 549/2004 άρθρο 2 παράγραφος 10, 2004.
- [12] EUROCONTROL.(n.d) official website Ανάκτηση [Oct 2023] από: <https://www.eurocontrol.int/>.
- [13] Wikipedia contributors. (20 Sep 2023) "*Satellite navigation*" In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Ανάκτηση [Apr 12 2024] από: https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation.
- [14] Renso Chiara, Artur Ribeiro de Aquino, Fernando de Lucca Siqueira, Vania Bogorny (2014) "A Conceptual Data Model for Semantic Trajectories of Moving Objects." *Transaction in GIS Journal, Published from Wiley-Blackwell* vol 18(1), pages 66-88 Feb 2013.
- [15] Claudio de Souza Baptista, Fabio Gomes de Andrade, Damião Ribeiro de Almeida (2020), "*A Survey on Big Data for Trajectory Analytics*", ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(2), 88. MDPI
- [16] OpenSky Network. (n.d). OpenSky Network Official website. Ανάκτηση [20 Sep 2022] από: <https://opensky-network.org/>.
- [17] TRAFFIC Library Official Repository in Github. Ανάκτηση [22 Sep 2022] από: <https://traffic-viz.github.io/quickstart.html>.
- [18] Desai B., "*The Hitchhiker's Guide to OLAP: What is OLAP and its Types*", Ανάκτηση [21 October 2022] από : <https://www.kyvosinsights.com/blog/the-hitchhikers-guide-to-olap-what-is-olap-and-its-types/>.
- [19] International Civil Aviation Organization. (2016) Doc 7910: Location Indicators (6th edition). Montreal, Canada: ICAO.

- [20] Alsahfi Tariq, Almotairi Mouse., Ramez Elmasri, (2020) "*A survey on trajectory data warehouse*" Spatial Information Research - Springer, Volume 28(1), pages 53–66
- [21] Jose Antonio Fernandes de Macedo, Raffaeta Alessandra, Chiara Renso, Alesandro Roncato, Roberto Trasarti, Ricardo Wagner (2014), "*Mob-warehouse: A semantic approach for mobility analysis with a trajectory*", In J. Parsons & D. Chiu (Eds.), Advances in Conceptual Modeling: ER 2013 Workshops (pp, 127-136). Springer
- [22] NASA. (2020). "The axes of flight" Ανάκτηση [1 Dec 2023] από: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2020/04/the_axes_of_flight.pdf.
- [23] Heaton Jeff (2015) "Encog: Library of Interchangeable Machine Learning Models for Java and C#", Journal of Machine Learning Research Springer, vol. 16, pages 1243-1247 Ανάκτηση [15 Dec 2023] από : <http://www.jmlr.org/papers/volume16/heaton15a/heaton15a.pdf>
- [24] Verheyen Jens, Hoffman Daniel, Heider Dominik, " *Predicting Bevirimat resistance of HIV-1 from genotype*" BMC Bioinformatics, vol 11(1) page 37 Ανάκτηση [9 Dec 2023]. από: <http://www.biomedcentral.com/content/pdf/1471-2105-11-37.pdf>, 2010

