



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**



**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΚΑΛΤΣΑΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΒΑΣΗ ΤΩΝ  
ΣΥΝΟΜΙΛΙΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΠΙΛΟΤΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΕΝΑΕΡΙΑΣ  
ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ  
CPDLC (CONTROLLER PILOT DATA LINK COMMUNICATION)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΑΤΘΑΙΟΣ ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2008**

*Στα αδέρφια μου, Στέλλα και Δημήτρη*

A fundamental means of operating the air traffic control (ATC) system is still based on voice communications between controllers and pilots. In such a system, radio-communication problems such as miscommunications, radio frequency congestion, poor quality, high susceptibility to interference and high risk of blocked or stepped on transmissions could occur in busy sectors. As a result, controllers and pilots workload could increase further, causing route inefficiencies, and sector capacity and safety reductions. As a response to the existing radio-based communications problems, the Controller-Pilot Data Link Communications (CPDLC) is introduced as the Aeronautical Data Link System (ADLS) that provides a data communication between aircraft and ground automation system. CPDLC complements voice communications and provides a link that is used for certain types of communication messages. The communication system is currently known in Europe as Link2000+ (formerly known as Preliminary EUROCONTROL Test of Air/Ground Datalink - PETAL); in the United States the system is known as the FAA Data Comm (formerly known as CPDLC).

Two very robust and reliable miscommunication prediction models, the Logistic Regression and the Recursive Partitioning Methodology, are constructed using a database that includes 42 thirty-minute controller-pilot voice-recording samples, derived from 33 sectors, positioned in five Air Route Traffic Control Centers (ARTCCs) located in the National Airspace System of the United States of America. Special attention is paid to analyzing (1) misheard and delayed messages for controllers and pilots and (2) the most significant factors that affect the state of (mis)communications (such as the entering of the aircraft into the sector, the transfer of communication and the radio frequency utilization). The developed prediction models for miscommunications between controllers and pilots are essential in understanding the underlying communications dynamics in ATC and designing a data link tool that would be very efficient and ergonomic. As a result, transfer of messages and message utilization by Data Link would be more successful and less prone to similar communication problems while using the new communication media.

Jasenska Rakas

Lecturer in the Civil and Environmental Engineering Department  
at the University of California at Berkeley

## ΣΥΝΟΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη πιθανοτικών μοντέλων για την έκβαση των συνομιλιών μεταξύ πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας στα πλαίσια της εφαρμογής του συστήματος CPDLC (Controller Pilot Data Link Communication). Βάση δεδομένων αποτελούμενη από 7.965 φωνητικά μηνύματα αναλύθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή μοντέλων πρόβλεψης με τη χρήση δύο ξεχωριστών μεθόδων, της Λογιστικής Παλινδρόμησης και της Μεθόδου Αναδρομικού Διαχωρισμού. Τα τελικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν στον προσδιορισμό του συνόλου των παραγόντων που καθορίζουν την έκβαση των συνομιλιών και στη διερεύνηση της επίδρασης του CPDLC στην αποτελεσματικότητα του συστήματος επικοινωνίας. Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι η μεταφορά της επικοινωνίας, η άφιξη του αεροσκάφους στον τομέα και το ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η εφαρμογή του CPDLC αναμένεται να αυξήσει την ασφάλεια του συστήματος επικοινωνίας και να συμβάλλει στην αποσυμφόρηση των συχνοτήτων.

## ABSTRACT

The objective of the present diploma thesis is to model and predict the outcome of voice communications between pilots and air traffic controllers in order to assess the impact of CPDLC on ATC performance. A database of 7,965 voice messages is subjected to statistical analysis and is used for the construction of prediction models by two different statistical methods, the Logistic Regression and the Recursive Partitioning Methodology (RPM). The developed models indicate that the most significant factors, which affect the outcome of communications, are the following: the aircraft entering the sector, the transfer of communication and the radio frequency occupancy time. According to these results, the implementation of CPDLC is expected to enhance communication safety and alleviate radio frequency congestion.

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των συνομιλιών μεταξύ πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας θα οδηγήσουν σύντομα στην πλήρη κατάληψη των ραδιοσυχνοτήτων επικοινωνίας και στην αδυναμία των ελεγκτών να ρυθμίσουν με ασφάλεια την κίνηση των αεροσκαφών στον εναέριο χώρο. Το πεπερασμένο μέγεθος των πολύ υψηλών συχνοτήτων VHF (Very High Frequency) και των λίαν υψηλών συχνοτήτων UHF (Ultra High Frequency) δεν επιτρέπει την περαιτέρω αύξηση των καναλιών επικοινωνίας, με αποτέλεσμα να καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για τη σταδιακή μετάβαση από το φωνητικό στο γραπτό σύστημα επικοινωνίας (Controller Pilot Data Link Communication, CPDLC). Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη πιθανοτικών μοντέλων για την έκβαση των συνομιλιών μεταξύ πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας δεδομένα από φωνητικές συνομιλίες. Μέσω των μοντέλων αυτών εντοπίζονται οι παράμετροι που επιδρούν στην πρόκληση εσφαλμένων επικοινωνιών ανάμεσα στους πιλότους και τους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας και ερευνάται η πιθανή έκβαση των εξεταζόμενων συνομιλιών ύστερα από την εφαρμογή του CPDLC.

Τα δεδομένα τα οποία επεξεργάζεται η παρούσα διπλωματική εργασία προέρχονται από κασέτες ηχογραφημένων συνομιλιών της MITRE (Massachusetts Institute of Technology Research and Engineering) και της FAA (Federal Aviation Administration). Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει 42 τριαντάλεπτα δείγματα ηχογραφημένων φωνητικών συνομιλιών μεταξύ ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας και πιλότων από 33 διαφορετικούς τομείς πέντε κέντρων ελέγχου αεροδιαδρόμων. Συνολικά εξετάζονται 7.965 μηνύματα από τα οποία προέκυψαν ως συνηθέστερες κατηγορίες εσφαλμένων επικοινωνιών οι μη αποκρίσεις και οι εσφαλμένες ακροάσεις του παραλήπτη του μηνύματος.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει αρχικά την κατασκευή δύο ομάδων των τεσσάρων και πέντε μοντέλων αντιστοίχως. Σε κάθε μοντέλο τα μηνύματα αναλύονται σε τρία επίπεδα διάκρισης με βάση την έκβαση της συνομιλίας, τον παραλήπτη και το είδος του σφάλματος. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που εξετάζονται σε κάθε μοντέλο είναι 15 και απεικονίζουν τα χαρακτηριστικά του μηνύματος, της εναέριας κυκλοφορίας και του φόρτου εργασίας των ελεγκτών.

Βασικό κριτήριο της επιλογής τους αποτέλεσε η δυνατότητα της χρήσης τους τόσο στο φωνητικό σύστημα επικοινωνίας όσο και στο γραπτό.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν τα πιθανοτικά μοντέλα για την έκβαση των συνομιλιών με τη χρήση των μεθόδων της Λογιστικής Παλινδρόμησης και της ανάπτυξης μη παραμετρικών δέντρων ταξινόμησης μέσω της Μεθόδου Αναδρομικού Διαχωρισμού (Recursive Partitioning Methodology, RPM). Η πρώτη μέθοδος πλεονεκτεί στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης κάθε μεταβλητής που συμμετέχει στο μοντέλο, η δεύτερη όμως προσφέρει καλύτερα ποσοστά προβλέψεων. Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως η έναρξη και η λήξη της επικοινωνίας ενός αεροσκάφους με το κέντρο ελέγχου, καθώς και το ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας αποτελούν τους πιο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την έκβαση μιας συνομιλίας. Η χρήση του CPDLC αναμένεται να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τον αριθμό των εσφαλμένων επικοινωνιών

Θεωρώ χρέος μου να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Δρ. Ματθαίο Γ. Καρλαύτη, Επίκουρο καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και την ιδιαίτερα πολύτιμη καθοδήγησή του και συνεργασία σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Παράλληλα, ευχαριστώ ιδιαίτερος τον κ. Soren Dissing, Operations Work Package Leader του προγράμματος LINK2000+ της EUROCONTROL (Brussels), καθώς και τον διευθυντή του ίδιου προγράμματος κ. Martin Adnams για την εποικοδομητική συνεργασία μας και τις εύστοχες υποδείξεις τους κατά την τρίμηνη άσκησή μου (internship) στη EUROCONTROL (Μάιος - Ιούλιος 2008).

Επίσης, θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην Δρ. Jasenka Rakas, Λέκτορα καθηγήτρια στο πανεπιστήμιο του Berkeley, για την παραχώρηση της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία. Την ευχαριστώ θερμά για τις παρατηρήσεις της και για το διαρκές ενδιαφέρον της.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου για την αμέριστη υποστήριξή τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Γεράσιμος Σκαλτσάς

Αθήνα - Βρυξέλλες, Ιούλιος 2008

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1	Γενικά .....	1
1.2	Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας και φωνητικό σύστημα επικοινωνίας .....	3
1.3	Το γραπτό σύστημα επικοινωνίας ( CPDLC, Controller Pilot Data Link Communication ).....	4
1.4	Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	6
1.5	Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	7
<b>2</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>8</b>
2.1	Εισαγωγή.....	8
2.2	Έρευνες σχετικά με τα σφάλματα στις συνομιλίες .....	8
2.3	Συμπεράσματα .....	20
<b>3</b>	<b>ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....</b>	<b>22</b>
3.1	Περιγραφή βάσης δεδομένων .....	22
3.2	Εσφαλμένες επικοινωνίες.....	24
3.3	Περιγραφή μοντέλων.....	26
3.4	Παρουσίαση μεταβλητών.....	30
3.5	Ανάλυση μεταβλητών.....	37
3.5.1	Περιγραφική Στατιστική.....	37
3.5.2	Αριθμός ανοιχτών συνομιλιών - νοητική χρησιμοποίηση .....	45
3.5.3	Πολυπλοκότητα μηνύματος.....	46
3.5.4	Διάρκεια μηνύματος .....	48
3.5.5	Άφιξη του αεροσκάφους.....	49
3.5.6	Αναχώρηση του αεροσκάφους .....	51
3.5.7	Μεταφορά επικοινωνίας .....	52
3.5.8	Σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών .....	53
3.5.9	Σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών .....	54
3.5.10	Αριθμός αεροσκαφών.....	55
3.5.11	Αριθμός αρχικών και τελικών επαφών.....	56
3.5.12	Χωρητικότητα: monitor alert parameter (MAP) .....	57
3.5.13	Αριθμός αεροσκαφών προς MAP .....	58
3.5.14	Αριθμός αρχικών και τελικών επαφών προς MAP.....	59
3.5.15	Κατάληψη ραδιοσυχνότητας ανά τομέα.....	60
3.5.16	Κατάληψη ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα.....	61
<b>4</b>	<b>ΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ (Logistic Regression).....</b>	<b>63</b>
4.1	Περιγραφή της μεθόδου.....	63
4.2	Ανάλυση των μοντέλων .....	66
4.2.1	Μοντέλο A1.....	66
4.2.2	Μοντέλο A2.....	67
4.2.3	Μοντέλο A3.....	68
4.2.4	Μοντέλο A4.....	70
4.2.5	Μοντέλο B1.....	71
4.2.6	Μοντέλο B2.....	72
4.2.7	Μοντέλο B3.....	73



4.2.8	Μοντέλο B4.....	75
4.2.9	Μοντέλο B5.....	76
<b>4.3</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>78</b>
<b>5</b>	<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΔΡΟΜΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ.....</b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Περιγραφή της μεθόδου.....</b>	<b>81</b>
<b>5.2</b>	<b>Ανάλυση των αποτελεσμάτων .....</b>	<b>84</b>
5.2.1	Κριτήρια επιλογής των δέντρων ταξινόμησης.....	84
5.2.2	Παρουσίαση και ανάλυση των δέντρων ταξινόμησης.....	86
5.2.3	Σύνοψη αποτελεσμάτων .....	92
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>95</b>
<b>6.1</b>	<b>Σύνοψη αποτελεσμάτων.....</b>	<b>95</b>
<b>6.2</b>	<b>Ανάλυση αποτελεσμάτων στα πλαίσια του συστήματος CPDLC .....</b>	<b>96</b>
<b>6.3</b>	<b>Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....</b>	<b>97</b>

## ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1,	Αύξηση της εναέριας κυκλοφορίας έως το 2025, .....	2
Εικόνα 3.1,	Μοντέλα ομάδας A .....	28
Εικόνα 3.2,	Μοντέλα ομάδας B.....	29

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2.1,	ICAO SHELL MODEL .....	21
Σχήμα 4.1,	Συνάρτηση Κατανομής Πιθανότητας Λογιστικής Κατανομής .....	64
Σχήμα 5.1,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου B2 .....	89
Σχήμα 5.2,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου B3 .....	91
Σχήμα Π.Β. 1,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου A1 .....	113
Σχήμα Π.Β. 2,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου A2 .....	114
Σχήμα Π.Β. 3,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου A3 .....	115
Σχήμα Π.Β. 4,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου A4 .....	115
Σχήμα Π.Β. 5,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου B1 .....	116
Σχήμα Π.Β. 6,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου B4 .....	117
Σχήμα Π.Β. 7,	Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου B5 .....	118

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3.1,	Memphis ZME Center .....	22
Πίνακας 3.2,	Indianapolis ZID Center.....	23
Πίνακας 3.3,	Περιγραφή των στοιχείων.....	23
Πίνακας 3.4,	Στατιστικός έλεγχος της διαφοράς των μέσων των πληθυσμών.....	38
Πίνακας 3.5,	Στατιστικός έλεγχος της διαφοράς των μέσων των πληθυσμών.....	38
Πίνακας 3.6,	Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου A1.....	39
Πίνακας 3.7,	Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου A2.....	39
Πίνακας 3.8,	Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου A3.....	40

Πίνακας 3.9, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου A4.....	40
Πίνακας 3.10, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου B1.....	41
Πίνακας 3.11, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου B2.....	41
Πίνακας 3.12, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου B3.....	42
Πίνακας 3.13, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου B4.....	42
Πίνακας 3.14, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου B5.....	43
Πίνακας 3.15, Συσχέτιση Μεβλητών .....	44
Πίνακας 4.1, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο A1.....	66
Πίνακας 4.2, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης.....	66
Πίνακας 4.3, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο A2.....	67
Πίνακας 4.4, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης.....	67
Πίνακας 4.5, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο A3.....	68
Πίνακας 4.6, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης.....	68
Πίνακας 4.7, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο A4.....	70
Πίνακας 4.8, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B1.....	72
Πίνακας 4.9, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης.....	72
Πίνακας 4.10, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B2.....	73
Πίνακας 4.11, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B3.....	74
Πίνακας 4.12, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης.....	74
Πίνακας 4.13, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B4.....	75
Πίνακας 4.14, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης.....	75
Πίνακας 4.15, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B5.....	76
Πίνακας 4.16, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης.....	77
Πίνακας 4.17, Αποτελέσματα λογιστικής παλινδρόμησης για την ομάδα A.....	79
Πίνακας 4.18, Αποτελέσματα λογιστικής παλινδρόμησης για την ομάδα B.....	79
Πίνακας 5.1, Σημαντικότητα μεταβλητών για το Μοντέλο B2.....	88
Πίνακας 5.2, Προβλέψεις Μοντέλου B2.....	88
Πίνακας 5.3, Σημαντικότητα μεταβλητών για το Μοντέλο B3.....	91
Πίνακας 5.4, Προβλέψεις Μοντέλου B3.....	91
Πίνακας 5.5, Συγκριτικός πίνακας προβλέψεων.....	93
Πίνακας 5.6, Ποσοστό συμμετοχής μεταβλητών για τα μοντέλα της ομάδας A.....	94
Πίνακας 5.7, Ποσοστό συμμετοχής μεταβλητών για τα μοντέλα της ομάδας B.....	94
Πίνακας Π.Α. 1, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο A1.....	103
Πίνακας Π.Α. 2, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο A2.....	104
Πίνακας Π.Α. 3, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο A3.....	105
Πίνακας Π.Α. 4, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο A4.....	106
Πίνακας Π.Α. 5, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο B1.....	107
Πίνακας Π.Α. 6, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο B2.....	108
Πίνακας Π.Α. 7, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο B3.....	109
Πίνακας Π.Α. 8, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο B4.....	110
Πίνακας Π.Α. 9, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο B5.....	111

## ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 3.1, Τύπος εσφαλμένης επικοινωνίας.....	25
Διάγραμμα 3.2, Πιλότος - Νοητική Χρησιμοποίηση.....	45
Διάγραμμα 3.3, Ελεγκτής - Νοητική Χρησιμοποίηση.....	45
Διάγραμμα 3.4, Πιλότος - Πολυπλοκότητα Μηνύματος.....	47
Διάγραμμα 3.5, Ελεγκτής - Πολυπλοκότητα Μηνύματος.....	47
Διάγραμμα 3.6, Μέσος όρος πολυπλοκότητας μηνυμάτων ανά τομέα.....	47

---

Διάγραμμα 3.7, Πιλότος - Διάρκεια Μηνύματος .....	48
Διάγραμμα 3.8, Ελεγκτής - Διάρκεια Μηνύματος .....	48
Διάγραμμα 3.9, Πιλότος - Άφιξη του Αεροσκάφους .....	50
Διάγραμμα 3.10, Ελεγκτής - Άφιξη του Αεροσκάφους .....	50
Διάγραμμα 3.11, Πιλότος - Αναχώρηση του Αεροσκάφους .....	51
Διάγραμμα 3.12, Ελεγκτής - Αναχώρηση του Αεροσκάφους .....	51
Διάγραμμα 3.13, Πιλότος – Μεταφορά Επικοινωνίας .....	52
Διάγραμμα 3.14, Ελεγκτής – Μεταφορά Επικοινωνίας .....	52
Διάγραμμα 3.15, Σύνολο Αφικνουμένων Αεροσκαφών .....	53
Διάγραμμα 3.16, Σύνολο Αφικνουμένων Αεροσκαφών .....	53
Διάγραμμα 3.17, Πιλότος - Σύνολο Αναχωρούντων αεροσκαφών .....	54
Διάγραμμα 3.18, Ελεγκτής - Σύνολο Αναχωρούντων αεροσκαφών .....	54
Διάγραμμα 3.19, Πιλότος - Αριθμός Αεροσκαφών.....	55
Διάγραμμα 3.20, Ελεγκτής - Αριθμός Αεροσκαφών.....	55
Διάγραμμα 3.21, Πιλότος - Αριθμός Αρχικών και Τελικών Επαφών .....	56
Διάγραμμα 3.22, Ελεγκτής - Αριθμός Αρχικών και Τελικών Επαφών .....	56
Διάγραμμα 3.23, Πιλότος - Monitor Alert Parameter (MAP) .....	57
Διάγραμμα 3.24, Ελεγκτής - Monitor Alert Parameter (MAP) .....	57
Διάγραμμα 3.25, Πιλότος - Αριθμός Αεροσκαφών / MAP .....	58
Διάγραμμα 3.26, Ελεγκτής - Αριθμός Αεροσκαφών / MAP .....	58
Διάγραμμα 3.27, Πιλότος - Αριθμός Επαφών / MAP .....	59
Διάγραμμα 3.28, Ελεγκτής - Αριθμός Επαφών / MAP .....	59
Διάγραμμα 3.29, Πιλότος - Κατάληψη Ραδιοσυχνότητας ανά Τομέα .....	60
Διάγραμμα 3.30, Ελεγκτής - Κατάληψη Ραδιοσυχνότητας ανά Τομέα .....	60
Διάγραμμα 3.31, Πιλότος – Κατάληψη Ραδιοσυχνότητας ανά Μήνυμα .....	61
Διάγραμμα 3.32, Ελεγκτής - Κατάληψη Ραδιοσυχνότητας ανά Μήνυμα.....	61

## Ακρόνυμα

ACL: ATC Clearances

ACM: ATC Communication Management

AMC: ATC Microphone Check

ARTCC: Air Route Traffic Control Centers

ASRS: Aviation Safety Reporting System

ATC: Air Traffic Control

ATIS: Automatic Terminal Information Service

CART: Classification and Regression Trees

CPDLC: Controller Pilot Data Link Communication

D-ATIS: Data Link Automatic Terminal Information Service

DLIC: Data Link Initiation Capability

ESRA: EUROCONTROL Statistical Reference Area

FAA: Federal Aviation Administration

FL: Flight Level

IATA: International Air Transport Association

ICAO: International Civil Aviation Organization

IFR: Instrument Flight Rules

MITRE: Massachusetts Institute of Technology Research and Engineering

MUAC: Maastricht Upper Area Control Centre

NTSB: National Transportation Safety Board

RPM: Recursive Partitioning Methodology

STCA: Short-Term Conflict Alert

TRACON: Terminal Radar Approach Control

VHF: Very High Frequency

UHF: Ultra High Frequency

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Η φωνητική επικοινωνία αέρος-εδάφους μεταξύ ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας και πιλότων<sup>1</sup> αποτελεί προϋπόθεση για την ασφάλεια του συστήματος των αερομεταφορών. Τραγικά ατυχήματα του παρελθόντος, όπως η σύγκρουση των δύο Boeing 747s στο αεροδρόμιο της Τενερίφης το 1977 που οδήγησε στην απώλεια 583 ανθρώπινων ζώων, υπογραμμίζουν τη σημασία των επικοινωνιών στην ασφάλεια των πτήσεων. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να εντοπιστούν τα προβλήματα και να κατανοηθούν οι παράγοντες που σχετίζονται με την πρόκληση των εσφαλμένων επικοινωνιών. Η σημασία της επικοινωνίας στη διαχείριση της εναέριας κυκλοφορίας τονίζεται από τους Linter και Buckles (Linter and Buckles, 1993), οι οποίοι αναφέρουν χαρακτηριστικά ότι «ανεξαρτήτως του επιπέδου εξέλιξης στο οποίο θα βρίσκεται το σύστημα της εναέριας κυκλοφορίας στο τέλος του αιώνα, η αποτελεσματικότητα του συστήματος μας θα περιορίζεται πάντα από το πόσο επιτυχώς επικοινωνούμε».

Την τελευταία δεκαετία (1997-2007) έχει παρατηρηθεί αξιοσημείωτη αύξηση της εναέριας κυκλοφορίας κατά 40% (IATA, 2008). Μελέτες πρόβλεψης για τον Ευρωπαϊκό χώρο με ορίζοντα το 2025 υποδεικνύουν πως η εναέρια κυκλοφορία στον Ευρωπαϊκό χώρο το 2025 θα κυμαίνεται από 15.5 έως 18.9 IFR κινήσεις ετησίως, που αντιστοιχεί σε αύξηση της τάξεως του 70% - 110% σε σχέση με το 2005 και σε ετήσια αύξηση 2,7% - 3,7% (ESRA, 2006) (Εικόνα 1.1). Η αύξηση αυτή σε συνδυασμό με το πεπερασμένο μέγεθος των πολύ υψηλών συχνοτήτων VHF (Very High Frequency) και των λίαν υψηλών συχνοτήτων UHF (Ultra High Frequency) δεν επιτρέπει την περαιτέρω αύξηση των καναλιών επικοινωνίας, με αποτέλεσμα να καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για την εφαρμογή νέων συστημάτων τα οποία θα προσφέρουν τη δυνατότητα στους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας να ρυθμίζουν με ασφάλεια την κυκλοφορία του αυξημένου αριθμού αεροσκαφών και να επικοινωνούν επιτυχώς με αυτά.

---

<sup>1</sup> Σύμφωνα με τον ICAO (2001), ως επικοινωνία αέρος-εδάφους ορίζεται κάθε αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ αεροσκάφους και σταθμού ή θέσης στην επιφάνεια της γης.



## 1.2 Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας και φωνητικό σύστημα επικοινωνίας

Ο έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας είναι μια υπηρεσία που προσφέρεται από το έδαφος προς τα αεροσκάφη. Ρόλος του ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας είναι να παρέχει ασφαλή, κανονική και ταχεία ροή της κυκλοφορίας. Το έργο αυτό είναι πολύπλοκο και περιέχει δύο βασικά στοιχεία, εκείνο του διαχωρισμού και της πληροφορίας. Ο ασφαλής διαχωρισμός μεταξύ των αεροσκαφών οριζοντίως και καθέτως επιτυγχάνεται με εξουσιοδοτήσεις από το κέντρο ελέγχου οι οποίες διασφαλίζουν την τήρηση των καθιερωμένων προτύπων διαχωρισμού του ICAO. Οι ελεγκτές επεξεργάζονται πλήθος πληροφοριών από διαφορετικές πηγές. Στη συνέχεια παρέχουν μέσω της ραδιοσυχνότητας επικοινωνίας τις απαραίτητες εξουσιοδοτήσεις και πληροφορίες στους πιλότους και σε κάθε άλλο ενδιαφερόμενο.

Σε κάθε τομέα η ραδιοσυχνότητα επικοινωνίας είναι κοινή για όλα τα αεροσκάφη. Προκειμένου να ταυτοποιείται το αεροσκάφος από ή προς το οποίο αποστέλεται κάποιο μήνυμα, κάθε μήνυμα πρέπει να ξεκινάει με το χαρακτηριστικό κλήσης του αεροσκάφους. Ανάλογα με το περιεχόμενο του μηνύματος ο παραλήπτης οφείλει να αποκριθεί μέσω της αποστολής του αντίστοιχου readback<sup>2</sup>, όπως ορίζουν τα πρότυπα του ICAO. Σκοπός του readback είναι να επιβεβαιώσει ότι:

- το μήνυμα λήφθηκε από το σωστό παραλήπτη
- το περιεχόμενο του μηνύματος λήφθηκε και κατανοήθηκε σωστά
- απεστάληκαν οι σωστές πληροφορίες

Όπως παρουσιάζεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί, η σωστή χρήση του readback είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή λειτουργία του φωνητικού συστήματος επικοινωνίας.

---

<sup>2</sup> Ως Readback ορίζεται η διαδικασία επανάληψης του λαμβανομένου μηνύματος ή τμήματος αυτού προς τον σταθμό αποστολής, ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή λήψη του (ICAO Annex 10 Vol II).

### 1.3 Το γραπτό σύστημα επικοινωνίας ( CPDLC, Controller Pilot Data Link Communication )

Η εφαρμογή του CPDLC αναμένεται να αποτελέσει το κύριο μέσο για την αποσυμφόρηση των ραδιοσυχνοτήτων, να μειώσει το φόρτο εργασίας των ελεγκτών και των πιλότων και να αυξήσει παράλληλα τη χωρητικότητα του συστήματος διαχείρισης εναέριας κυκλοφορίας και την ασφάλεια των επικοινωνιών.

Αυτό θα έχει ως άμεση συνέπεια τη μείωση του κόστους λειτουργίας των αεροπορικών εταιριών. Σύμφωνα με έρευνες στο χώρο των αερομεταφορών και επενδύσεων, η εφαρμογή του CPDLC στον ευρωπαϊκό εναέριο χώρο θα οδηγήσει σε αύξηση της χωρητικότητας κατά 10% με αύξηση του κόστους κατά 219 εκατομμύρια ευρώ ετησίως. Η ίδια αύξηση της χωρητικότητας χωρίς τη χρήση του CPDLC θα απαιτούσε επενδύσεις μεγαλύτερες των 440 εκατομμυρίων ευρώ ετησίως. Επομένως η χρήση του CPDLC εξασφαλίζει μείωση του κόστους κατά 221 εκατομμύρια ευρώ ετησίως την οποία επωμίζονται άμεσα οι αεροπορικές εταιρίες.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης του CPDLC έναντι του φωνητικού συστήματος είναι τα εξής:

- παρέχει ευανάγνωστα μηνύματα με ταχύτητα και χωρίς όχληση στους ελεγκτές και τους πιλότους
- περιορίζει τη πιθανότητα εσφαλμένης κατανόησης των μηνυμάτων
- προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης του αρχείου των απεσταλθέντων και ληφθέντων μηνυμάτων
- καθιστά αδύνατη την πρόκληση εσφαλμένων επικοινωνιών εξαιτίας του χαρακτηριστικού κλήσης
- αυξάνει τη διαθεσιμότητα της ραδιοσυχνότητας επικοινωνίας για αποστολή χρονικώς κρίσιμων μηνυμάτων
- μειώνει την ανάγκη για φωνητική επικοινωνία και κατ' επέκταση τον φόρτο εργασίας των ελεγκτών, αυξάνοντας την ασφάλεια
- προσφέρει ένα «ήσυχο» περιβάλλον εργασίας



Το CPDLC αναπτύσσεται ξεχωριστά στην Ευρώπη από την EUROCONTROL και στις ΗΠΑ από την FAA. Τον Ιούνιο του 2002 το κέντρο ελέγχου αεροδιαδρόμου στο Μαϊάμι έγινε το πρώτο κέντρο ελέγχου παγκοσμίως που χρησιμοποίησε το CPDLC παρέχοντας τέσσερις διαφορετικές υπηρεσίες:

- έναρξη αρχικής επικοινωνίας (Initial Contact)
- μεταφορά επικοινωνίας (Transfer of Communication)
- αποστολή υψομετρικών πληροφοριών ( Altimeter Service)
- αποστολή κειμένου μέσω προκαθορισμένων μηνυμάτων (Menu Text)

Παρά την επιτυχημένη εφαρμογή του συστήματος, η FAA αποφάσισε τη διακοπή και αναβάθμιση του προγράμματος τον Απρίλιο του 2003. Έκτοτε δεν ξαναχρησιμοποιήθηκε.

Στην Ευρώπη το CPDLC εγκαταστάθηκε και εφαρμόστηκε στο κέντρο ελέγχου του Μάαστριχτ (Maastricht Upper Area Control Centre, MUAC) τον Ιούνιο του 2003. Η λειτουργία του συνοψίζεται στις ακόλουθες τέσσερις υπηρεσίες:

- ικανότητα έναρξης επικοινωνίας μέσω Data Link (Data Link Initiation Capability, DLIC)
- διαχείριση επικοινωνίας (ATC Communication Management, ACM)
- αποστολή και λήψη πληροφοριών και αδειών (ATC Clearances, ACL)
- αποστολή και λήψη οδηγίας ελέγχου της λειτουργίας του μικροφώνου (ATC Microphone Check, AMC)

Το 2007 35 αεροπορικές εταιρίες είχαν αεροσκάφη εξοπλισμένα με CPDLC. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν 33.000 συνδέσεις (DLIC), 50% περισσότερες σε σχέση με το 2006 και λήφθηκαν επιτυχώς 82.000 γραπτά μηνύματα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια να αξιολογηθούν τα στοιχεία που προκύπτουν από τα παραπάνω δύο κέντρα, προκειμένου να διερευνηθεί η συμβολή του γραπτού μέσου επικοινωνίας στην πρόκληση των εσφαλμένων επικοινωνιών. Ωστόσο έμφαση δίνεται στο κέντρο ελέγχου του Μάαστριχτ, διότι αφενός αποτελεί στην τρέχουσα χρονική περίοδο το μοναδικό κέντρο ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, όπου το CPDLC χρησιμοποιείται για επιχειρησιακούς σκοπούς, και αφετέρου έχει ήδη συμπληρώσει πέντε χρόνια επιτυχούς λειτουργίας.

Επειδή, η βάση δεδομένων που επεξεργάζεται η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τομείς μόνο από τις ΗΠΑ, τα αποτελέσματα που προκύπτουν ενδέχεται να μην είναι αντιπροσωπευτικά των συνθηκών του ευρωπαϊκού χώρου. Αυτό οφείλεται σε τρεις βασικές διαφορές του συστήματος ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας μεταξύ των δύο ηπείρων:

- στην Ευρώπη η πλειοψηφία των πιλότων και των ελεγκτών δεν ομιλεί την αγγλική γλώσσα ως μητρική γλώσσα
- ο διαχωρισμός των ραδιοσυχνοτήτων (VHF) στις ΗΠΑ γίνεται στα δύο δεκαδικά ψηφία, ενώ στην Ευρώπη στα τρία (8.33 kHz άνω των 24.500 ποδιών)
- οι τομείς στην Ευρώπη έχουν μικρότερο μέγεθος

Οι διαφορές αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σύγκριση στοιχείων που προκύπτουν από τις δυο ηπείρους. Επιπλέον, θα πρέπει να αποφεύγεται αυθαίρετη γενίκευση των συμπερασμάτων.

## 1.4 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη πιθανοτικών μοντέλων για την έκβαση των συνομιλιών μεταξύ πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας δεδομένα από φωνητικές συνομιλίες. Ειδικότερα, μέσω των μοντέλων αυτών επιδιώκεται να εντοπιστούν οι παράμετροι που επιδρούν στην πρόκληση εσφαλμένων επικοινωνιών ανάμεσα στους πιλότους και τους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας και να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος επικοινωνίας ύστερα από την εφαρμογή του CPDLC. Η ανάλυση των δεδομένων θα γίνει με χρήση δύο μεθόδων, της Λογιστικής Παλινδρόμησης και της Μεθόδου Αναδρομικού Διαχωρισμού.

## 1.5 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η διάταξη των κεφαλαίων της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει τη δομή που παρουσιάζεται παρακάτω:

Το **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, που αφορά στην ανάλυση ερευνών από τη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τις εσφαλμένες επικοινωνίες, τους συνηθέστερους τύπους σφαλμάτων, τους παράγοντες που τις προκαλούν και τη μεθοδολογία με την οποία διερευνώνται και προτυποποιούνται τα μεγέθη αυτά. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από εξομοιώσεις συνομιλιών με χρήση του Data Link και περιγράφονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του μικτού συστήματος επικοινωνίας.

Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιγράφεται η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται στη ανάπτυξη των πιθανοτικών μοντέλων και παρουσιάζονται οι περιπτώσεις για τις οποίες θα μελετηθεί η έκβαση των μηνυμάτων. Επιπλέον, αναλύονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές και μελετώνται οι βασικές στατιστικές τους ιδιότητες με χρήση πινάκων, ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων. Τέλος εκτελείται έλεγχος της διαφοράς του μέσου και του βαθμού συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιγράφεται η μέθοδος της λογιστικής παλινδρόμησης. Επίσης, παρουσιάζονται τα πιθανοτικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Για κάθε μοντέλο πραγματοποιείται αναλυτικός σχολιασμός των στατιστικά σημαντικών μεταβλητών.

Το **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιλαμβάνει την περιγραφή της μεθόδου του αναδρομικού διαχωρισμού και την παρουσίαση των πιθανοτικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Τα δέντρα ταξινόμησης αναλύονται και αξιολογούνται με βάση τα ποσοστά συμμετοχής των μεταβλητών, την επιτυχία των προβλέψεων τους, τη δομή και το μέγεθός τους.

Στο **6<sup>ο</sup> κεφάλαιο** συνοψίζονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων και παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες που επιδρούν στην πρόκληση εσφαλμένων επικοινωνιών. Τέλος, εξετάζεται η επίδραση του CPDLC στην αποτελεσματικότητα του συστήματος επικοινωνίας σύμφωνα με τα στοιχεία που προκύπτουν από τα πιθανοτικά μοντέλα.

## 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη πιθανοτικών μοντέλων για την έκβαση των συνομιλιών μεταξύ πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας στα πλαίσια της εφαρμογής του συστήματος CPDLC. Για τον σκοπό αυτό κρίνεται αρχικά απαραίτητος ο εντοπισμός των παραγόντων που επιδρούν στην επικοινωνία μεταξύ αεροσκάφους και κέντρου ελέγχου καθώς και η ποσοτικοποίηση της επίδρασής τους. Πριν την παρουσίαση των στοιχείων, του τρόπου επεξεργασίας τους και της επιλεγόμενης μεθοδολογίας, κρίνεται απαραίτητο να γίνει αναφορά στις μελέτες ερευνητών οι οποίες έχουν ως κύριο στόχο τον εντοπισμό των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν την ομαλή πραγματοποίηση των συνομιλιών.

Ξένοι ερευνητές έχουν ασχοληθεί διεξοδικά με προβλήματα που άπτονται των εσφαλμένων επικοινωνιών, όπως καθυστέρηση ή παράλειψη του πιλότου να αποκριθεί σε μηνύματα του ελεγκτή, λανθασμένες επαναλήψεις μηνυμάτων, λανθασμένη χρήση του χαρακτηριστικού κλήσης του αεροσκάφους. Επίσης, έχουν επισημάνει τους κύριους παράγοντες που προκαλούν τις εσφαλμένες επικοινωνίες, όπως η πολυπλοκότητα του μηνύματος, η χρονική του διάρκεια, η αλληλουχία των μηνυμάτων κ.α. Στην βιβλιογραφική ανασκόπηση που θα ακολουθήσει, και η οποία ασχολείται με τις έρευνες που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν, παρατίθενται τα στοιχεία και η μεθοδολογία με την οποία συλλέγονται και διερευνώνται τα μεγέθη αυτά, καθώς και τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που προκύπτουν από τις έρευνες αυτές.

### 2.2 Έρευνες σχετικά με τα σφάλματα στις συνομιλίες

Οι έρευνες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με την πρόκληση προβληματικών επικοινωνιών μεταξύ ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας και πιλότων είναι πολλές. Ωστόσο δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς η σχέση τους με τις ανοικτές συνομιλίες

Έρευνα με χρήση εξομοιωτή πτήσεως (flight simulator) έγινε από τους **Waller et al.** (1989) με σκοπό τη σύγκριση του φωνητικού και του γραπτού μέσου

συνομιλίας και την αποτίμηση πιθανών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του συστήματος CPDLC στο περιβάλλον του πιλοτηρίου. Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένας εξομοιωτής πτήσεως του ερευνητικού κέντρου Langley και συμμετείχαν συνολικά δέκα πιλότοι, οι οποίοι σε ομάδες των δύο (κυβερνήτης - συγκυβερνήτης) εκτέλεσαν συνολικά από έξι πτήσεις διάρκειας 15 λεπτών. Οι εντυπώσεις και τα σχόλια των πιλότων για το γραπτό μέσο, η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης και ο χρόνος που απαιτήθηκε για την πραγματοποίηση των γραπτών συνομιλιών συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα δεδομένα που προέκυψαν από τη χρήση του φωνητικού μέσου.

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πως ο μέσος χρόνος πραγματοποίησης μιας γραπτής συνομιλίας είναι 19 δεύτερα, ενώ της φωνητικής είναι μόνο 8 δεύτερα. Μέρος αυτής της καθυστέρησης οφείλεται στη μικρή ταχύτητα μετάδοσης των γραπτών μηνυμάτων (απαιτούνται περίπου τέσσερα δεύτερα ανά μήνυμα), ενώ η υπόλοιπη καθυστέρηση μπορεί να εξηγηθεί από το ότι τα γραπτά μηνύματα δεν αποσπών αμέσως τη προσοχή των πιλότων. Η δυνατότητα που προσφέρει η χρήση του Data Link στους πιλότους να επιλέγουν την στιγμή που θα διαβάσουν τα γραπτά μηνύματα χωρίς πίεση χρόνου, θεωρείται από τους πιλότους ως ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του γραπτού μέσου. Ωστόσο, αποτελεί ένα από τα κρίσιμότερα μειονεκτήματα του Data Link για τους ελεγκτές, επειδή η καθυστέρηση στην επιβεβαίωση της λήψης του μηνύματος ενδέχεται να οδηγήσει σε έντονη αύξηση του φόρτου εργασίας τους. Επίσης, η ελάττωση του συνόλου των φωνητικών μηνυμάτων που μεταδίδονται στις διάφορες συχνότητες περιορίζει την ηχητική όχληση των πιλότων και το φόρτο εργασίας τους, καθώς απαιτείται μειωμένη προσοχή για το άκουσμα του χαρακτηριστικού κλήσης του αεροσκάφους. Εντούτοις, οι πιλότοι στερούνται της δυνατότητας απόκτησης χρήσιμων πληροφοριών, καθώς με αυτόν τον τρόπο δεν μπορούν να ακούσουν τις συνομιλίες των ελεγκτών με άλλα αεροσκάφη. Έντονες αμφιβολίες εκφράζονται για την παράλληλη αποστολή ενός μηνύματος σε φωνητική και γραπτή μορφή, διότι προκαλείται σύγχυση στους πιλότους και ενδέχεται να αυξήσει το φόρτο εργασίας τους. Τέλος, φαίνεται ότι είναι προτιμότερο τα χρονικώς κρίσιμα μηνύματα να αποστέλλονται φωνητικά.

Οι **Talotta et al.** (1990) πραγματοποίησαν έναν αριθμό σεναρίων εξομοίωσης του ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας και μελέτησαν τις επιπτώσεις της εφαρμογής του συστήματος Data Link ως πρόσθετο μέσο επικοινωνίας στον έλεγχο της εναέριας

κυκλοφορίας. Σκοπός της μελέτης ήταν η εκτίμηση της επίδρασης του Data Link στην αποσυμφόρηση των συχνοτήτων ραδιοεπικοινωνίας, στο φόρτο εργασίας των ελεγκτών και των πιλότων, στην απόδοση και αποτελεσματικότητα του συνολικού ελέγχου της εναέριας κυκλοφορίας και στην αποδοχή του συστήματος από τους χρήστες του. Η επικοινωνία μέσω Data Link μπορούσε να αντικαταστήσει τις φωνητικές συνομιλίες σε τέσσερις περιπτώσεις:

- ενημέρωση για τις μετεωρολογικές συνθήκες
- μεταβίβαση ελέγχου και επικοινωνίας
- εκχώρηση υψομέτρου πτήσης
- επικοινωνία μεταξύ πιλότου και ελεγκτή με τη χρήση ελεύθερου κειμένου.

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η χρήση του Data Link οδηγεί σε μεγάλη αποσυμφόρηση των συχνοτήτων ραδιοεπικοινωνίας, σε ποσοστό έως και 45%. Επίσης, η εφαρμογή του συστήματος σε μεγαλύτερο αριθμό αεροσκαφών μειώνει έντονα την ανάγκη επαναλήψεων και διευκρινίσεων σε φωνητικά μηνύματα με αποτέλεσμα την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος επικοινωνίας. Ο φόρτος εργασίας των ελεγκτών και των πιλότων δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη χρήση του νέου μέσου, ακόμη και στο σενάριο επιβραδυμένης παράδοσης των γραπτών μηνυμάτων. Τέλος, όλοι οι συμμετέχοντες στη διαδικασία της εξομοίωσης δήλωσαν ευχαριστημένοι από τον τρόπο λειτουργίας του και εξέφρασαν την πεποίθηση πως η εφαρμογή του Data Link θα μπορούσε να αντικαταστήσει τις περισσότερες λειτουργίες που εξυπηρετούνται μέσω του ασυρμάτου.

Οι **Rodgers et al.** (1993) προσπάθησαν να προσδιορίσουν τους λόγους που προκαλούν απώλειες τυπικού διαχωρισμού ή αλλιώς λειτουργικά λάθη (operational errors). Συγκεκριμένα πραγματοποίησαν δύο ξεχωριστές έρευνες στις οποίες εξέτασαν όλα τα περιστατικά λειτουργικών λαθών από το 1985 έως το 1988 στην πρώτη έρευνα και από το 1988 έως το 1991 στη δεύτερη. Τα στοιχεία προήλθαν από τα αρχεία των είκοσι κέντρων ελέγχου αεροδιαδρόμων (Air Route Traffic Control Centers, ARTCC) των Ηνωμένων Πολιτειών.

Στις δύο αυτές έρευνες εξετάστηκε η σχέση μεταξύ του αριθμού των λειτουργικών λαθών, της σοβαρότητάς τους, του φόρτου εργασίας των ελεγκτών και πέντε ακόμα παραγόντων που ενδέχεται να οδηγήσουν στη διάπραξη ενός

λειτουργικού λάθους (χρήση ενδείξεων ραντάρ, επικοινωνία με το πλήρωμα, συντονισμός μεταξύ ελεγκτών, χρήση δεδομένων, αναφορά αλλαγής βάρδιας). Ο φόρτος εργασίας των ελεγκτών εκτιμήθηκε συναρτήσει του αριθμού των αεροσκαφών και της πολυπλοκότητας της εναέριας κυκλοφορίας. Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων παρουσιάζει έντονη σχέση τόσο μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών όσο και με τον αριθμό των λειτουργικών λαθών. Ωστόσο, δεν καταδεικνύεται κάποια εξάρτηση τους με τη σοβαρότητα των παραβιάσεων του τυπικού διαχωρισμού μεταξύ αεροσκαφών. Αντίθετα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η σοβαρότητα των παραβιάσεων εξαρτάται από παράγοντες οι οποίοι αφορούν την ετοιμότητα και την προσοχή των ελεγκτών. Τέλος, τονίζεται η αναγκαιότητα για τη δημιουργία ενός κοινού πλαισίου αξιολόγησης των παραβιάσεων και του φόρτου εργασίας των ελεγκτών.

Λεπτομερής εξέταση ηχογραφημένων συνομιλιών μεταξύ ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας και πιλότων με σκοπό την ανάλυση των λαθών τους και τον εντοπισμό των παραγόντων που τα προκαλούν έγινε από τους **Cardosi** (1993, 1994), **Cardosi et al.** (1996) και **Bürki-Cohen** (1995). Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν τέσσερις ξεχωριστές έρευνες στις οποίες μελετήθηκαν αντιπροσωπευτικά δείγματα συνομιλιών, ηχογραφημένα σε τέσσερα διαφορετικά τμήματα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας: κέντρο ελέγχου αεροδιαδρόμων (Cardosi, 1993), τοπικός έλεγχος από πύργο (Cardosi, 1994), έλεγχος εδάφους από πύργο (Bürki-Cohen, 1995) και τερματική περιοχή ελέγχου με ραντάρ (Cardosi et al., 1996). Οι εσφαλμένες επικοινωνίες μελετήθηκαν συναρτήσει της πολυπλοκότητας του μηνύματος που αποστέλλει ο ελεγκτής, καθώς και του είδους των πληροφοριών που περιέχονται σε αυτό, ενώ και στις τέσσερις έρευνες ακολουθήθηκε η ίδια μέθοδος ανάλυσης. Οι πληροφορίες που αποκτώνται από τις παραπάνω έρευνες μπορούν να αξιοποιηθούν στην ανάπτυξη ενός νέου λογισμικού και στην αξιολόγηση των μεθόδων επικοινωνίας. Για παράδειγμα, γνωρίζοντας το ποσοστό των αδειών που χρειάζεται να επαναλάβουν οι ελεγκτές, είναι εφικτή η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της αποστολής γραπτών μηνυμάτων μέσω του DataLink.

Η πολυπλοκότητα του μηνύματος ορίστηκε με βάση τον αριθμό των διαφορετικών στοιχείων που περιλαμβάνονται στο μήνυμα. Ένα στοιχείο αποτελείται από μία λέξη ή ομάδα λέξεων, που λέει ο ελεγκτής, περιλαμβάνει μία νέα πληροφορία προς τον πιλότο και θεωρείται καθοριστική για την ορθή κατανόηση του

μηνύματος. Ως ξεχωριστά στοιχεία θεωρούνται μόνο οι πληροφορίες που αυξάνουν τις απαιτήσεις μνήμης. Ωστόσο, το χαρακτηριστικό κλήσης του αεροσκάφους δεν θεωρήθηκε ξεχωριστό στοιχείο, διότι αποσκοπεί μόνο στην προσέλκυση της προσοχής του πιλότου και δεν αποτελεί πληροφορία προς απομνημόνευση. Παρόλο που στην πραγματικότητα κάθε στοιχείο ανάλογα με τη φύση του επιβαρύνει σε διαφορετικό βαθμό τη μνήμη πιλότου και ελεγκτή, για τις ανάγκες της έρευνας όλα τα στοιχεία θεωρήθηκαν ισοδύναμα. Ως εσφαλμένες επικοινωνίες ορίστηκαν τα readbacks, τα οποία περιείχαν κάποιο λάθος στοιχείο ή τα μηνύματα που ζητούσαν την επανάληψη ολόκληρου ή ενός τμήματος του μηνύματος. Δεδομένου ότι οι πιλότοι σε μεγάλο ποσοστό μηνυμάτων αποκρίθηκαν με χρήση μερικών readbacks, μονολεκτικών γνωστοποιήσεων ή δεν αποκρίθηκαν καθόλου, είναι σχεδόν βέβαιο πως το πραγματικό ποσοστό των εσφαλμένων επικοινωνιών είναι διαφορετικό από αυτό που έχει υπολογιστεί.

Η **Cardosi** (1993) εξέτασε αρχικά ηχογραφημένες συνομιλίες ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας με πιλότους κατά τη διάρκεια της πτήσης (en route). Αναλύθηκαν 47 ώρες συνομιλιών από 8 διαφορετικά κέντρα ελέγχου αεροδιαδρόμων με καταγεγραμμένα 5.032 μηνύματα ελεγκτών προς πιλότους, εκ των οποίων τα 3.576 αφορούσαν άδειες (για παράδειγμα οδηγίες ελιγμών, αλλαγές πορείας, αλλαγές στη συχνότητα ασυρμάτου), ενώ τα 1.456 αποτελούσαν αιτήματα για πληροφορίες, χαιρετισμοί, επιβεβαιώσεις λήψης μηνύματος κ.α. Η επεξεργασία των στοιχείων της βάσης δεδομένων δείχνει ότι ο αριθμός των εσφαλμένων επικοινωνιών αυξάνει ανάλογα με την πολυπλοκότητα των μηνυμάτων. Το ποσοστό λαθών ήταν μικρότερο του 1%, το οποίο αν και πολύ μικρό δεν είναι αμελητέο, λόγω των σοβαρών επιπτώσεων που μπορεί να έχει μία λάθος επικοινωνία. Τα πιο συχνά λάθη παρατηρούνται σε άδειες για αλλαγή συχνότητας και άδειες διασταυρώσεως. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις ελεγκτής και πιλότος χρησιμοποιούν διαφορετικό χαρακτηριστικό κλήσης. Για τη μείωση των προβληματικών συνομιλιών η έρευνα προτείνει ότι ο αριθμός των στοιχείων του κάθε μηνύματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα τέσσερα και ότι οι πιλότοι πρέπει να χρησιμοποιούν ολόκληρο το χαρακτηριστικό κλήσης και να ζητούν πάντα την επανάληψη ενός μηνύματος, ειδικά όταν δεν είναι απολύτως βέβαιοι για το περιεχόμενό του. Επιπλέον, οι ελεγκτές οφείλουν να ενημερώνουν τους πιλότους για την παρουσία αεροσκαφών με παρόμοιο



χαρακτηριστικό κλήσης στη συχνότητα, ώστε οι πιλότοι να είναι πιο προσεκτικοί στη χρήση του.

Στη συνέχεια, η **Cardosi** (1994) εξέτασε ηχογραφημένες συνομιλίες πιλότων με ελεγκτές πύργων τοπικού ελέγχου (local control). Αναλύθηκαν 48 ώρες συνομιλιών από 10 διαφορετικούς πύργους τοπικού ελέγχου με 11.234 καταγεγραμμένα μηνύματα. Χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου περιβάλλοντος είναι ο πολύ μεγάλος αριθμός στοιχείων που εμπεριέχονται στις συνομιλίες. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τρεις έρευνες ο αριθμός των εσφαλμένων επικοινωνιών δεν επηρεάζεται από την πολυπλοκότητα των μηνυμάτων. Το ποσοστό των μηνυμάτων στα οποία οι πιλότοι αποκρίνονται με πλήρη ή μερικά readbacks αυξάνει με την αύξηση της πολυπλοκότητας τους. Σ' αυτό συμβάλλει η ετοιμότητα των πιλότων για επικοινωνία με τον πύργο ελέγχου, όση ώρα αναμένουν να προσγειωθούν ή να απογειωθούν. Επίσης, πολλές πληροφορίες αναφέρονται σε τυποποιημένες διαδικασίες με τις οποίες είναι εξοικειωμένοι οι πιλότοι, ενώ κάποιες πληροφορίες είναι διαθέσιμες και από άλλα συστήματα πληροφόρησης (για παράδειγμα ATIS). Βασικός παράγοντας διάπραξης λαθών θεωρείται η προσδοκία των πιλότων να ακούσουν ένα συγκεκριμένο μήνυμα, με αποτέλεσμα να μη διακρίνουν τις διαφορές στο μήνυμα που τελικά τους αποστέλλεται από τον ελεγκτή. Για τον ίδιο λόγο, οι ελεγκτές δυσκολεύονται να εντοπίσουν τα λάθη στα readbacks. Καθοριστική είναι και η συνύπαρξη παρόμοιων χαρακτηριστικών κλήσης στην ίδια συχνότητα ραδιοεπικοινωνίας. Τέλος, οι αιτήσεις των πιλότων προς τους ελεγκτές για επανάληψη απεσταλμένων μηνυμάτων αυξάνουν με την αύξηση της πολυπλοκότητας τους.

Αργότερα, η **Bürki-Cohen** (1995) εξέτασε ηχογραφημένες συνομιλίες πιλότων με ελεγκτές εδάφους (ground control). Αναλύθηκαν 48 ώρες συνομιλιών από 12 διαφορετικούς πύργους ελέγχου με 23.224 καταγεγραμμένα μηνύματα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι τόσο ο αριθμός των πλήρων readbacks όσο και των μονολεκτικών γνωστοποιήσεων μειώνονται σημαντικά όσο αυξάνει ο βαθμός πολυπλοκότητας των μηνυμάτων. Αντίθετα, ο αριθμός των μερικών readbacks και των μηνυμάτων που ζητούν την επανάληψη ολόκληρου ή ενός τμήματος μηνύματος αυξάνει με την αύξηση της πολυπλοκότητας των μηνυμάτων. Επίσης, τα περισσότερα λάθη εντοπίστηκαν σε άδειες τροχοδρόμησης και πορείας. Τέλος, η πρόκληση προβληματικών επικοινωνιών δεν φαίνεται να συνδέεται άμεσα με το ρυθμό

αποστολής μηνυμάτων, εκτός από την περίπτωση των λαθών hearback που αυξάνουν με την αύξηση του ρυθμού αποστολής.

Οι **Cardosi et al.** (1996) συνέχισαν τις τρεις παραπάνω έρευνες εξετάζοντας ηχογραφημένες συνομιλίες πιλότων με ελεγκτές τερματικής περιοχής ελέγχου με ραντάρ (Terminal Radar Approach Control, TRACON). Αναλύθηκαν 48 ώρες συνομιλιών από οκτώ διαφορετικές υπηρεσίες με 13.089 καταγεγραμμένα μηνύματα ελεγκτών προς πιλότους, εκ των οποίων τα 9.409 αφορούσαν άδειες. Τα συμπεράσματα είναι παραπλήσια. Υπογραμμίζεται εκ νέου η αύξηση του αριθμού των εσφαλμένων επικοινωνιών ανάλογα με την πολυπλοκότητα των μηνυμάτων, καθώς και το γεγονός ότι ενίοτε οι πιλότοι και οι ελεγκτές ακούν εσφαλμένα την άδεια που προσδοκούν να ακούσουν. Επίσης, οι πιλότοι αποδεικνύονται πιο επιμελείς στη χρήση του πλήρους readback σε αντίθεση με το πλήρες χαρακτηριστικό κλήσης. Ιδιαίτερα, όμως, στα κομβικά αεροδρόμια, όπου είναι αναπόφευκτη η παρουσία πολλών παρόμοιων χαρακτηριστικών κλήσης, η σωστή χρησιμοποίησή τους κρίνεται επιτακτική. Τα πιο συχνά λάθη παρατηρούνται σε άδειες για αλλαγή συχνότητας και άδειες για την προσαρμογή της ταχύτητας. Επιπλέον, σημαντικό είναι το γεγονός ότι μόλις το 60% των λανθασμένων readbacks εντοπίστηκαν και διορθώθηκαν από τους ελεγκτές.

Καθότι οι ηχογραφημένες συνομιλίες δεν παρέχουν πληροφορίες για τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιούνται οι λανθασμένες συνομιλίες, τις αιτίες που τις προκαλούν και τον αντίκτυπό τους στην ασφάλεια των πτήσεων, οι **Cardosi et al.** (1998) προχώρησαν στη μελέτη αναφορών από το σύστημα αναφοράς πτητικής ασφάλειας (Aviation Safety Reporting System, ASRS). Αναλύθηκαν 386 αναφορές και εντοπίστηκαν τρεις βασικές κατηγορίες λαθών. Η πιο συνηθισμένη κατηγορία περιλαμβάνει τις περιπτώσεις, όπου ο πιλότος επιβεβαιώνει τη λήψη ενός μηνύματος, επαναλαμβάνοντας λάθος τα στοιχεία του, ενώ ο ελεγκτής αδυνατεί να εντοπίσει το λάθος (readback/hearback error). Ακολουθούν οι περιπτώσεις, όπου ο πιλότος επιβεβαιώνει τμήμα μόνο του μηνύματος ή δεν αποκρίνεται καθόλου. Τέλος, η τρίτη κατηγορία λαθών αφορά περιστατικά στα οποία ο ελεγκτής αποστέλλει ένα μήνυμα με εσφαλμένα στοιχεία, ο πιλότος επιβεβαιώνει τη λήψη του, επαναλαμβάνοντας σωστά τα στοιχεία που έλαβε, και πάρα ταύτα ο ελεγκτής αδυνατεί να εντοπίσει το λάθος (hearback error type II). Οι συνηθέστεροι παράγοντες που συμβάλλουν στην πραγματοποίηση λανθασμένων συνομιλιών αφορούν στην ύπαρξη παρόμοιων

χαρακτηριστικών κλήσης στην ίδια συχνότητα, την προσδοκία των πιλότων να λάβουν μια συγκεκριμένη πληροφορία και το υψηλό φόρτος εργασίας των ελεγκτών. Τέλος, τα παραπάνω λάθη οδηγούν (με σειρά φθίνουσας συχνότητας) σε υψομετρικές παρεκκλίσεις, απώλειες τυπικού διαχωρισμού, επιχειρησιακά λάθη, όπως ορίζονται από την FAA, προσγείωση σε λάθος διάδρομο και παραβάσεις διαδρόμου.

Οι **Cardosi et al.** (2001) ερεύνησαν λανθασμένες ενέργειες πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας, προσπαθώντας να προτείνουν παρεμβάσεις που θα βελτιώσουν τη λειτουργία των πύργων ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Στην προσπάθεια αυτή πραγματοποιήθηκε αρχικά μία εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος μελετώνται έρευνες με αντικείμενο τα ανθρώπινα λάθη που συνδέονται με ενέργειες αεροσκαφών στην επιφάνεια αεροδρομίων, ενώ βρίσκονται υπό τον έλεγχο του πύργου ελέγχου. Το δεύτερο μέρος ασχολείται με τη συγχώνευση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται εντός των πύργων ελέγχου, με στόχο την απλοποίηση της εργασίας των ελεγκτών και την εξάλειψη των παραγόντων που προκαλούν προβληματικές επικοινωνίες. Στη συνέχεια εξετάζονται αναφορές (ASRS) ελεγκτών και πιλότων, αναφορές της FAA σχετικά με επιχειρησιακά λάθη του πύργου ελέγχου και εσφαλμένους χειρισμούς πιλότων, καθώς και αναφορές ατυχημάτων και άλλων περιστατικών από τον εθνικό φορέα ασφάλειας μεταφορών των ΗΠΑ (National Transportation Safety Board, NTSB). Τα δεδομένα της ανάλυσης των παραπάνω αναφορών χρησιμοποιούνται στην επαλήθευση των συμπερασμάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Τα στοιχεία που προκύπτουν φανερώνουν τον άμεσο αντίκτυπο των προβληματικών επικοινωνιών στις παραβάσεις του κανονισμού και την πρόκληση ατυχημάτων.

Οι **Lozito et al.** (2003) εξέτασαν την επίδραση της πολυπλοκότητας του συστήματος επικοινωνίας, της πίεσης του χρόνου και της σύνθεσης της αλληλουχίας διαδοχικών μηνυμάτων στις φωνητικές και γραπτές συνομιλίες μεταξύ πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας. Το σύστημα επικοινωνίας διακρίνεται σε απλό, όταν γίνεται χρήση μόνο φωνητικών ή γραπτών μηνυμάτων, και σε σύνθετο, όταν γίνεται χρήση και των δύο μέσων. Αρχικά μελετήθηκαν οι μέσοι χρόνοι αποστολής των μηνυμάτων και έγινε έλεγχος μέσω της μεθόδου της ανάλυσης διακύμανσης για την εξάρτησή τους από τους τρεις εξεταζόμενους παράγοντες: μέσο επικοινωνίας, χρονικό διάστημα μεσολάβησης και σειρά αποστολής των μηνυμάτων. Στη συνέχεια

με τη μέθοδο της ανάλυσης διακύμανσης έγινε έλεγχος για την επίδραση των τριών παραπάνω παραγόντων στην πρόκληση προβληματικών συνομιλιών.

Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένας εξομοιωτής Boeing 747-400, εξοπλισμένος με σύστημα επικοινωνίας Data Link, τα στοιχεία του οποίου εμφανίζονταν σε μία εκ των δύο οθονών του Flight Management System/Control Display Unit. Συνολικά συμμετείχαν δέκα πιλότοι, οι οποίοι, σε ομάδες των δύο, εκτέλεσαν από έξι πτήσεις διάρκειας 20-30 λεπτών (δύο πτήσεις με φωνητικές συνομιλίες, δύο με γραπτές και δύο με παράλληλη χρήση φωνητικών και γραπτών συνομιλιών). Σε κάθε σενάριο πτήσης, οι πιλότοι δέχονταν τέσσερα ζεύγη μηνυμάτων, και κάθε μήνυμα περιείχε δύο εντολές. Το δεύτερο μήνυμα του ζεύγους αποστέλλονταν είτε ανά πέντε δευτερόλεπτα (βραχύ διάστημα) είτε ανά ένα λεπτό (μακρύ διάστημα) μετά την ενέργεια αποδοχής του πρώτου μηνύματος από τον πιλότο στην περίπτωση του γραπτού μηνύματος ή μετά το readback στην περίπτωση του φωνητικού μηνύματος. Προηγούμενη έρευνα των **McGann et al.** (1998) είχε δείξει ότι στο μικτό σύστημα επικοινωνίας παρουσιάζονται δυσλειτουργίες, κυρίως όταν ένα γραπτό μήνυμα ακολουθείται από ένα φωνητικό. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί μόνο αυτή η περίπτωση, και αγνοήθηκε τελείως η αποστολή ενός γραπτού μηνύματος μετά από ένα φωνητικό.

Ο χρόνος αποστολής ενός γραπτού μηνύματος περιλαμβάνει το χρόνο που απαιτείται προκειμένου να έχει ο πιλότος πρόσβαση στο μήνυμα, να το διαβάσει και να γνωστοποιήσει στον ελεγκτή τη λήψη του. Αντίστοιχα, για τα φωνητικά μηνύματα, ο χρόνος αποστολής ορίζεται από την στιγμή που ο ελεγκτής στέλνει το προηγογραφημένο μήνυμα έως το readback από το πιλότο, συμπεριλαμβάνοντας και τις όποιες συνομιλίες για διευκρινήσεις σχετικά με το ληφθέν μήνυμα.

Οι αναλύσεις διακύμανσης του χρόνου αποστολής των μηνυμάτων οδηγούν στα εξής συμπεράσματα: στις συνομιλίες που γίνονται αποκλειστικά μέσω φωνητικών μηνυμάτων ο χρόνος αποστολής των μηνυμάτων δεν επηρεάζεται από την πίεση του χρόνου ή τη σειρά αποστολής τους. Αντίθετα, όταν οι συνομιλίες γίνονται μόνο μέσω γραπτών μηνυμάτων τότε τόσο η πίεση του χρόνου όσο και η σειρά αποστολής επηρεάζουν το χρόνο αποστολής τους. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερους χρόνους αποστολής παρουσιάζουν τα γραπτά μηνύματα μεταξύ των οποίων μεσολαβούν βραχέα χρονικά διαστήματα καθώς και αυτά που αποστέλλονται δεύτερα σε κάθε ζεύγος. Στις συνομιλίες με χρήση και των δύο μέσων η πίεση του χρόνου

ασκεί σημαντική επιρροή, επιμηκύνοντας έντονα τους χρόνους αποστολής των μηνυμάτων. Επίσης, οι πιλότοι επιβεβαίωσαν γρηγορότερα τη λήψη των φωνητικών έναντι των γραπτών μηνυμάτων, παρότι τα φωνητικά ήταν αυτά που διαδέχονταν τα γραπτά. Βασική αιτία είναι ότι οι πιλότοι καθυστερούσαν τη γνωστοποίηση λήψης ενός γραπτού μηνύματος προκειμένου να λάβουν ένα φωνητικό. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι τα πληρώματα είχαν λάβει την οδηγία να δίνουν προτεραιότητα στα φωνητικά μηνύματα. Επιπλέον, προέκυψε ότι το σύστημα επικοινωνίας επιδρά μόνο στους χρόνους αποστολής των φωνητικών μηνυμάτων, οι οποίοι είναι μεγαλύτεροι στο σύνθετο σύστημα. Οι χρόνοι αποστολής των γραπτών μηνυμάτων δεν προκύπτουν στατιστικά εξαρτημένοι από το σύστημα επικοινωνίας.

Ως πρόβλημα σε μία συνομιλία ορίστηκε κάθε ενέργεια που εκτελείται από το πλήρωμα για διευκρίνιση ενός μηνύματος. Στις φωνητικές συνομιλίες το πλήρωμα ζητάει από τον ελεγκτή την επιβεβαίωση ενός μηνύματος ή την επανάληψη του, ενώ στις γραπτές γίνεται χρήση του review log. Πολύ σημαντική παρατήρηση είναι πως στην περίπτωση των φωνητικών συνομιλιών ένα λάθος επιβαρύνει το πλήρωμα του αεροσκάφους, τους ελεγκτές και τη συχνότητα στην οποία εκτελείται η συνομιλία, ενώ στη περίπτωση των γραπτών συνομιλιών επιβαρύνεται μόνο το πλήρωμα. Οι αναλύσεις διακύμανσης των προβλημάτων έδειξαν ότι το μέσο συνομιλίας δεν επιδρά στην εμφάνιση προβλημάτων, σε αντίθεση με την πίεση του χρόνου η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των προβλημάτων. Το σύστημα επικοινωνίας επηρεάζει σημαντικά τα φωνητικά μηνύματα, τα οποία παρουσιάζουν αυξημένο ποσοστό προβλημάτων στο σύνθετο σύστημα, ενώ δεν έχει καμία επιρροή στα γραπτά μηνύματα. Φαίνεται ότι τα πληρώματα αντιμετώπιζαν μεγαλύτερες δυσκολίες στο να ακούνε ή να θυμούνται ένα φωνητικό μήνυμα στο σύνθετο σύστημα επικοινωνίας απ' ότι στο απλό.

Ο μεγαλύτερος αριθμός προβλημάτων στις φωνητικές συνομιλίες οδηγεί σε περισσότερες διευκρινίσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συχνότητα να παραμένει κατειλημμένη για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ενώ ο ελεγκτής επιβαρύνεται με περισσότερη και πολυπλοκότερη εργασία. Το γεγονός αυτό μετριάξει σε μεγάλο βαθμό το πλεονέκτημα της μόνιμης φύσης της γραπτής επικοινωνίας και της χρήσης του review log, ενώ μπορεί να καταστήσει το σύνθετο σύστημα επικοινωνίας προβληματικό. Ο κίνδυνος αυτός αυξάνεται, λαμβάνοντας υπόψη την καθυστέρηση των πληρωμάτων στη γνωστοποίηση λήψης των γραπτών μηνυμάτων. Τα πληρώματα

δίνουν προτεραιότητα στα φωνητικά μηνύματα, γεγονός που αυξάνει τον αριθμό των ανοιχτών συνομιλιών για τους ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας, και κατά συνέπεια το φόρτο εργασίας τους.

Οι **Bolic et al.** (2005) εισήγαγαν την έννοια της “νοητικής χρησιμοποίησης” (cognitive utilization) προσπαθώντας να ποσοτικοποιήσουν τη νοητική απασχόληση των ελεγκτών κατά τη διάρκεια των συνομιλιών και να προσδιορίσουν την επίδραση των ανοικτών συνομιλιών στην πρόκληση προβλημάτων στις επικοινωνίες. Μία συνομιλία θεωρείται ανοιχτή, έως ότου ληφθεί η επιβεβαίωση λήψης του μηνύματος. Η νοητική χρησιμοποίηση ορίζεται ως το άθροισμα όλων των χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια των οποίων παραμένει ανοικτή τουλάχιστον μία συνομιλία διαιρούμενο με το συνολικό χρόνο εργασίας. Το καινοτόμο αυτό μετρικό σύστημα βασίζεται στο γεγονός ότι ο ελεγκτής επιβαρύνεται νοητικά έως ότου λάβει την επιβεβαίωση λήψης του μηνύματος και πλεονεκτεί από τη “φυσική χρησιμοποίηση” διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην αξιολόγηση του συστήματος επικοινωνίας μέσω Data Link. Η φυσική χρησιμοποίηση ορίζεται ως το άθροισμα της χρονικής διάρκειας κάθε μηνύματος διαιρούμενο με το συνολικό χρόνο εργασίας, εκφράζοντας το ποσοστό κατάληψης της συχνότητας ραδιοεπικοινωνίας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της σχέσης μεταξύ φυσικής και νοητικής χρησιμοποίησης υποδηλώνουν έντονη συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις όπου το μέτρο της νοητικής χρησιμοποίησης είναι πολύ υψηλότερο από αυτό της φυσικής. Τα περιστατικά αυτά αποδεικνύεται πως είναι αποτέλεσμα της αργοπορίας των πιλότων να αποκριθούν σε κάποιο μήνυμα ή άλλων προβλημάτων επικοινωνίας. Σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρείται η συνύπαρξη πολλαπλών ανοιχτών συνομιλιών. Εφόσον, όμως, οι ανοιχτές συνομιλίες και οι προβληματικές επικοινωνίες αποτελούν σημαντικές παραμέτρους πρόκλησης άγχους και αύξησης του φόρτου εργασίας των ελεγκτών, η ικανότητα της νοητικής χρησιμοποίησης να τα συνυπολογίσει, την καθιστά ως αποτελεσματικό και αντιπροσωπευτικό σύστημα μέτρησης του φόρτου εργασίας τους.

Οι **Rakas et al.** (2007) κατασκεύασαν και μελέτησαν μία λεπτομερή βάση δεδομένων, αναλύοντας ηχογραφημένες συνομιλίες μεταξύ ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας και πιλότων. Συγκεκριμένα, εξέτασαν σαράντα δύο τριαντάλεπτα δείγματα συνομιλιών από τριάντα τρεις διαφορετικούς τομείς πέντε κέντρων ελέγχου αεροδιαδρόμων. Σκοπός της έρευνας ήταν ο εντοπισμός και η μελέτη παραγόντων

που οδηγούν σε εσφαλμένες επικοινωνίες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση της εφαρμογής του συστήματος Data Link.

Οι παράγοντες που μελετήθηκαν είναι ο αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών, η πολυπλοκότητα του μηνύματος, η διάρκεια του μηνύματος, η άφιξη του αεροσκάφους στον τομέα ή η αναχώρηση του από αυτόν, ο συνολικός αριθμός των αφικνουμένων και αναχωρούντων αεροσκαφών, ο αριθμός των εν πτήξει αεροσκαφών στον τομέα και η χωρητικότητά του. Για την στατιστική ανάλυση των δεδομένων κατασκευάστηκαν διάφορα μοντέλα παλινδρόμησης, μελετώντας τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Σημειώνεται πως όλα τα μοντέλα έγιναν με τις μεθόδους της λογιστικής και της πιθανοτικής παλινδρόμησης και τα αποτελέσματα ήταν πανομοιότυπα και για τις δύο μεθόδους.

Στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκε η πρόκληση ή μη εσφαλμένων επικοινωνιών. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν πως η αύξηση του αριθμού των ανοιχτών συνομιλιών, της διάρκειας του μηνύματος και του συνολικού αριθμού αφικνουμένων αεροσκαφών, καθώς και η άφιξη του αεροσκάφους στον τομέα αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων σε μία συνομιλία. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι τύποι εσφαλμένων επικοινωνιών αποδείχτηκαν οι καθυστερημένες αποκρίσεις και οι εσφαλμένες ακροάσεις μηνυμάτων από τον παραλήπτη. Οι δύο αυτοί τύποι εξετάστηκαν εκτενέστερα στις επόμενες τρεις περιπτώσεις. Αρχικά, συγκρίθηκαν μεταξύ τους και προέκυψε πως ο αριθμός ανοιχτών συνομιλιών έχει μεγαλύτερη επίδραση στην πρόκληση μιας καθυστερημένης απόκρισης απ' ό,τι σε μια εσφαλμένη ακρόαση. Το συμπέρασμα αυτό εξηγείται από το γεγονός πως η ύπαρξη ανοιχτών συνομιλιών προκαλεί έντονη αύξηση του φόρτου εργασίας των ελεγκτών με αποτέλεσμα να καθυστερούν να αποκριθούν στα μηνύματα.

Στην τρίτη και τέταρτη περίπτωση αναλύθηκαν οι δύο τύποι εσφαλμένων συνομιλιών σε σχέση με τους παραλήπτες των μηνυμάτων, δηλαδή τους ελεγκτές και τους πιλότους. Οι διαφορές μεταξύ των δύο παραληπτών στην εσφαλμένη ακρόαση μηνυμάτων παρατηρούνται στη χρονική διάρκεια των μηνυμάτων και στη χωρητικότητα του τομέα. Η χρονική διάρκεια των μηνυμάτων έχει μεγαλύτερες τιμές στα μηνύματα που ακούγονται λάθος από τους πιλότους σε αντίθεση με αυτά των ελεγκτών. Καθότι όμως οι πιλότοι είναι οι συχνότεροι παραλήπτες μακρών μηνυμάτων, θα ήταν λάθος να θεωρηθεί πως είναι πιο επιρρεπείς σε αυτή την κατηγορία λαθών. Αντίθετα, η χωρητικότητα του τομέα επηρεάζει την πιθανότητα να

ακουστεί εσφαλμένα ένα μήνυμα από τους ελεγκτές, διότι αύξηση της χωρητικότητας του τομέα συνεπάγεται αυξημένο ρυθμό ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ του ελεγκτή και των υπό έλεγχο αεροσκαφών, επομένως και μεγαλύτερο φόρτο εργασίας που οδηγεί σε περισσότερα σφάλματα. Για τον ίδιο λόγο η αύξηση του αριθμού των αεροσκαφών που βρίσκονται στον τομέα και του αριθμού των ανοιχτών συνομιλιών επιδρά περισσότερο στις καθυστερημένες αποκρίσεις των ελεγκτών απ' ότι αυτών των πιλότων.

Η σημασία αυτών των συμπερασμάτων είναι μεγάλη, διότι οι παραπάνω παράγοντες πιθανότατα θα συνεχίσουν να επηρεάζουν τις επικοινωνίες ελεγκτών και πιλότων και μετά την εφαρμογή του συστήματος Data Link. Επειδή ο χρόνος αποστολής των γραπτών μηνυμάτων είναι μεγαλύτερος από το χρόνο που απαιτείται για την αποστολή των φωνητικών μηνυμάτων, περεταίρω καθυστερήσεις στην αποστολή των μηνυμάτων με τη χρήση του Data Link πρέπει να αποφευχθούν. Διαφορετικά, οι καθυστερημένες αποκρίσεις ενδέχεται να καταστήσουν το σύστημα αναξιόπιστο και αναποτελεσματικό.

### 2.3 Συμπεράσματα

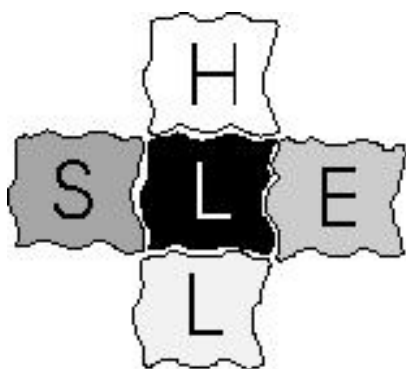
Από την παρουσίαση των παραπάνω ερευνών που αφορούν στην πρόκληση λαθών στις συνομιλίες ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας και πιλότων διαπιστώθηκε ότι έχουν γίνει πολλές προσπάθειες καταγραφής και ανάλυσης των λαθών αυτών. Ωστόσο, οι ερευνητές έχουν επικεντρώσει το ενδιαφέρον τους, κυρίως στον εντοπισμό των συνηθέστερων κατηγοριών των προβληματικών μηνυμάτων και των συνεπειών τους στον έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας. Παρότι οι έρευνες αυτές έχουν προσφέρει πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες που προκαλούν λάθη στις συνομιλίες, δεν έχει μελετηθεί ακόμα η συνδυασμένη επίδραση των παραγόντων αυτών τόσο στο φωνητικό σύστημα επικοινωνίας όσο και στο σύνθετο (χρήση του CPDLC παράλληλα με την αποστολή φωνητικών μηνυμάτων).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα των **Rakas et al.** (2007) καταδεικνύουν τη μεγάλη πιθανότητα πρόκλησης πρόσθετων λαθών, όταν υπάρχουν πολλαπλές ανοιχτές συνομιλίες. Στοιχεία από προσομοιώσεις και από τη χρήση του CPDLC στο Μάαστριχτ παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης και επιβεβαίωσης της λήψης των γραπτών μηνυμάτων σε σχέση με τα φωνητικά. Η



καθυστέρηση αυτή αναμένεται να αυξήσει τον αριθμό των ανοιχτών συνομιλιών και ενδεχομένως και των εσφαλμένων επικοινωνιών.

Εάν υποθέσουμε πως όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες παραμένουν σταθεροί παρά τη διαφορετική φύση των δύο μέσων επικοινωνίας, τότε η αύξηση του αριθμού των ανοιχτών συνομιλιών θα προκαλέσει αύξηση του αριθμού των εσφαλμένων επικοινωνιών. Η εφαρμογή, όμως, του CPDLC επιφέρει αλλαγές όχι μόνο στον τρόπο επικοινωνίας, αλλά και στον τρόπο άσκησης του ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Σύμφωνα με το ICAO SHELL MODEL (Σχήμα 2.1) τα ανθρώπινα λάθη προκαλούνται από τη συνισταμένη επίδραση όλων των στοιχείων του συστήματος μέσα στο οποίο λειτουργεί ο κάθε άνθρωπος. Καθότι όμως υπάρχει πάντα αλληλεξάρτηση μεταξύ των στοιχείων του συστήματος, είναι αδύνατη η σωστή πρόβλεψη της ανθρώπινης συμπεριφοράς μέσω της μεμονωμένης ανάλυση μίας και μόνο μεταβλητής χωρίς να ληφθεί υπόψη η επίδραση των υπολοίπων. Για το λόγο αυτό, η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την ανάλυση της επίδρασης των επιλεγόμενων μεταβλητών μέσα από τη συμμετοχή τους σε πιθανοτικά μοντέλα πρόβλεψης της έκβασης των συνομιλιών.



- (S) Software - οι κανονισμοί, διαδικασίες, έγγραφα κτλ. που αποτελούν τμήμα των τυπικών επιχειρησιακών λειτουργιών
- (H) Hardware - όλα τα στοιχεία που συνθέτουν τα εργαλεία ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας, όπως οι πίνακες οργάνων, τα συστήματα απεικόνισης, οι λειτουργικές μονάδες κτλ.
- (L) Liveware - το ανθρώπινο στοιχείο του συστήματος ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας - οι ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας, τα πληρώματα των αεροσκαφών, οι μηχανικοί, το προσωπικό συντήρησης, το προσωπικό διοίκησης κτλ.
- (E) Environment - το περιβάλλον, πολιτικό, οικονομικό και φυσικό μέσα στο οποίο λειτουργούν οι άλλες τρεις ομάδες

**Σχήμα 2.1, ICAO SHELL MODEL**

### 3 ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

#### 3.1 Περιγραφή βάσης δεδομένων

Τα δεδομένα τα οποία επεξεργάζεται η παρούσα διπλωματική εργασία προέρχονται από κασέτες ηχογραφημένων συνομιλιών της MITRE (Massachusetts Institute of Technology Research and Engineering) και της FAA (Federal Aviation Administration). Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει 42 τριαντάλεπτα δείγματα ηχογραφημένων φωνητικών συνομιλιών μεταξύ ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας και πιλότων. Τα δείγματα συλλέχθηκαν από 33 διαφορετικούς τομείς πέντε κέντρων ελέγχου αεροδιαδρόμων (Air Route Traffic Control Centre: Indianapolis [ZID], Memphis [ZME], Denver [ZDV], Dallas-Ft. Worth [ZFW] και Atlanta [ZTL]). Οι τομείς αυτοί περιλαμβάνουν τομείς πολύ υψηλού υψομέτρου (SH, επίπεδο πτήσης 330 και άνω) και υψηλού υψομέτρου (H, επίπεδο πτήσης 240 έως 330). Τα δείγματα που επιλέχθηκαν αντιπροσωπεύουν τομείς με διαφορετικά επίπεδα πτήσης (flight level, FL) και μεγέθη, και με ποικιλία στη σύνθεση και το μέγεθος της εναέριας κυκλοφορίας. Παρακάτω παρατίθενται μερικά στοιχεία από τα επιλεγμένα δείγματα των κέντρων του Memphis και της Indianapolis (Πίνακες 3.1, 3.2). Για κάθε ένα από τα 7.965 ηχογραφημένα μηνύματα της βάσης δεδομένων έχουν καταγραφεί τα στοιχεία του πίνακα 3.3.

**Πίνακας 3.1, Memphis ZME Center**

Τομέας		Χρονικό διάστημα (ZULU)	Μέγεθος τομέα
Όνομα	Υψόμετρο		
92	SH	19:15 - 19:45	μεσαίο/μεγάλο
92	SH	21:45- 22:15	μεσαίο/μεγάλο
95	SH	18:45 - 19:15	μεγάλο
96	SH	20:30 - 21:00	μεσαίο
98	SH	22:30 - 23:00	μεσαίο/μεγάλο
80	H	18:45 - 19:15	μικρό
83	H	21:15 - 21:45	μεσαίο
84	H	21:00 - 21:30	μεσαίο/μεγάλο
85	H	20:30 - 21:00	μεγάλο
87	H	19:30 - 20:00	μεσαίο/μεγάλο
89	H	18:45 - 19:15	μικρό

**Πίνακας 3.2, Indianapolis ZID Center**

Τομέας		Χρονικό διάστημα (ZULU)	Μέγεθος τομέα
Όνομα	Υψόμετρο		
19	SH	19:15 - 19:45	μεγάλο
24	SH	20:30 - 21:00	μεγάλο
32	SH	19:45 - 20:15	Μεγάλο
61	SH	21:00 - 21:30	Μεγάλο
22	H	22:00 - 22:30	Μεγάλο
22	H	19:45 - 20:15	Μεγάλο
25	H	20:00 - 20:30	Μεγάλο
26	H	20:15 - 20:45	Μεγάλο
30	H	22:00 - 22:30	μεσαίο/μεγάλο
63	H	20:00 - 20:30	Μεσαίο
62	H	21:00 - 21:30	μεσαίο/μεγάλο
62	H	19:45 - 20:15	μεσαίο/μεγάλο

**Πίνακας 3.3, Περιγραφή των στοιχείων**

Όνομα στοιχείου	Περιγραφή
sector	όνομα τομέα
corp	αποστολέας μηνύματος, πιλότος (p) ή ελεγκτής (c)
acid	Χαρακτηριστικό αεροσκάφους
text	κείμενο μηνύματος
message type	τύπος μηνύματος
open transaction	(c) μία συνομιλία, (cc) δύο ανοιχτές συνομιλίες, (ccc) τρεις ανοιχτές συνομιλίες, κτλ, (b) χρονικό διάστημα μεταξύ συνομιλιών
reasons	αίτια λανθασμένης επικοινωνίας και άλλα λάθη (τα συμπεράσματα βασίζονται στην ακρόαση των ηχογραφημένων συνομιλιών )
complexity	αριθμός στοιχείων σε ένα μήνυμα
Tt	χρόνος έναρξης του μηνύματος (σε δευτερόλεπτα)
tmin	χρόνος έναρξης του μηνύματος (σε λεπτά)
interval	χρονική διάρκεια του μηνύματος (σε δευτερόλεπτα)
arrival	(1) εάν ένα αεροσκάφος αφικνύεται σε ένα τομέα
departure	(1) εάν ένα αεροσκάφος αναχωρεί από ένα τομέα
number of a/c	αριθμός αεροσκαφών στο τομέα (με βάση την ανάλυση των
MAP	monitor alert parameter (χωρητικότητα), ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός αεροσκαφών στο τομέα ή η δηλωμένη τιμή

Από τον εναέριο χώρο που εξετάστηκε, διέρχονται κυρίως πτήσεις εσωτερικού. Η ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών κλήσης των αεροσκαφών έδειξε πως μόλις το 7% των μηνυμάτων ανταλλάχθηκαν με πληρώματα αεροσκαφών μη αμερικανικών αεροπορικών εταιριών. Για τον λόγο αυτό η εθνικότητα του

πληρώματος και η ικανότητα στην ομιλία της αγγλικής γλώσσας δεν λήφθηκε υπ' όψη στην παρούσα μελέτη.

### 3.2 Εσφαλμένες επικοινωνίες

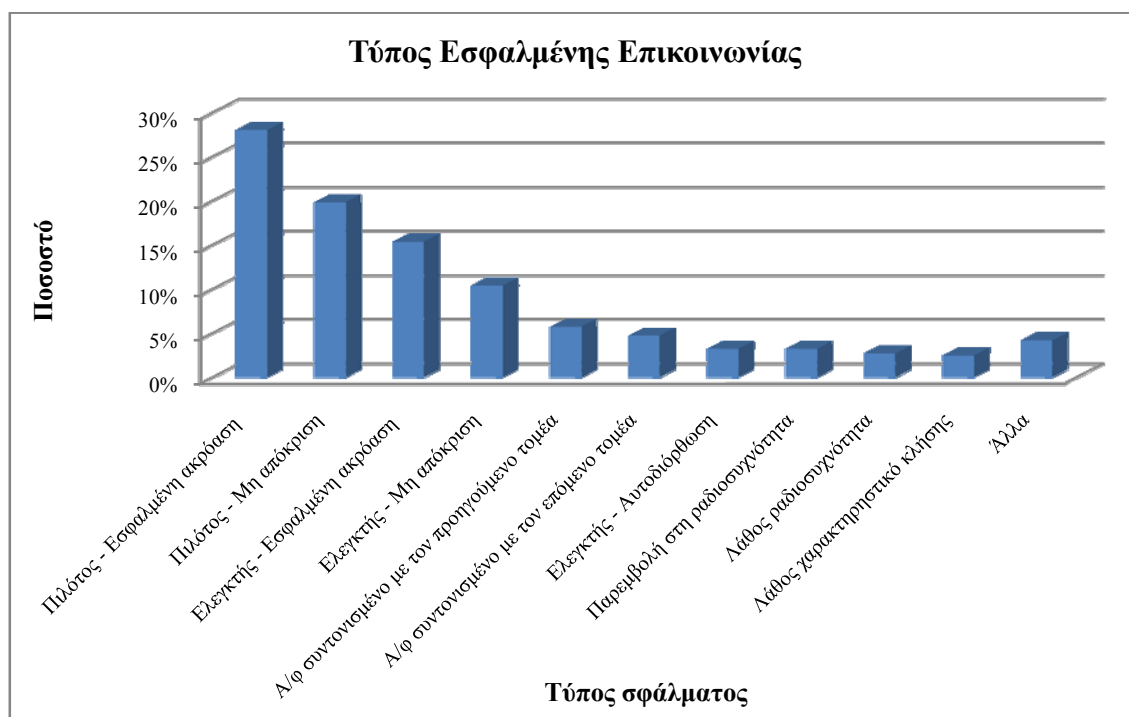
Η εσφαλμένη επικοινωνία έχει οριστεί στο μήνυμα το οποίο την προκαλεί και όχι σε αυτό που την καταδεικνύει, διότι σκοπός της παρούσας έρευνας είναι ο εντοπισμός της επίδρασης των εξεταζόμενων παραμέτρων στην έκβαση της αποστολής ενός μηνύματος. Παραδείγματος χάριν, εάν ο ελεγκτής στείλει ένα μήνυμα το οποίο υποδεικνύει τον αριθμό του υψομέτρου πτήσης στο οποίο πρέπει να πετάει το αεροσκάφος, και ο πιλότος αναφέρει διαφορετικό αριθμό κατά την επιβεβαίωση λήψης του μηνύματος, τότε ως εσφαλμένο ορίζεται το πρώτο μήνυμα που στάλθηκε από τον ελεγκτή. Παρότι το λάθος εμφανίζεται στο δεύτερο μήνυμα, εντούτοις προκλήθηκε κατά τη διάρκεια αποστολής του πρώτου μηνύματος, καθώς κατά την αποστολή του ο πιλότος δεν άκουσε ή δεν απομνημόνευσε σωστά τα στοιχεία του.

Τα μηνύματα στα οποία σημειώθηκαν εσφαλμένες επικοινωνίες ταξινομήθηκαν σύμφωνα με τα αίτια τους και τον αποστολέα τους (Διάγραμμα 3.1). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ως κυριότερες αιτίες εσφαλμένης επικοινωνίας τις ακόλουθες:

- 1) την εσφαλμένη ακρόαση μηνύματος από πιλότο
- 2) τη μη απόκριση αεροσκάφους
- 3) την εσφαλμένη ακρόαση μηνύματος από ελεγκτή
- 4) τη μη απόκριση ελεγκτή.

Ως περίπτωση εσφαλμένης ακρόασης ορίστηκε κάθε μήνυμα για το οποίο ο παραλήπτης του ζήτησε την επανάληψή του ή ανέφερε λάθος στοιχεία κατά την επιβεβαίωση της λήψης του. Ο αριθμός αυτός των εσφαλμένων επικοινωνιών είναι σίγουρα μικρότερος του πραγματικού. Αυτό συμβαίνει, διότι σε αρκετές περιπτώσεις οι πιλότοι και οι ελεγκτές αποκρίθηκαν σε μηνύματα με μονολεκτικές απαντήσεις λήψης ή επαναλαμβάνοντας τμήμα μόνο του αρχικού μηνύματος. Επομένως, δεν ήταν δυνατή η σύγκριση αυτών των μηνυμάτων για την επαλήθευση της ορθής λήψης τους και της κατανόησης των πληροφοριών τους. Οι μη αποκρίσεις περιλαμβάνουν τα μηνύματα στα οποία ο παραλήπτης τους απάντησε με μεγάλη καθυστέρηση, καθώς

και αυτά που επαναλήφθηκαν από τον αποστολέα τους προτού προηγηθεί απόκριση του παραλήπτη τους.



**Διάγραμμα 3.1,** Τύπος εσφαλμένης επικοινωνίας

Η ανάλυση των δειγμάτων έδειξε πως στις περισσότερες περιπτώσεις εσφαλμένης ακρόασης ενός μηνύματος από έναν ελεγκτή, αυτός είτε δεν άκουγε σωστά το χαρακτηριστικό του αεροσκάφους και τα στοιχεία που περιείχαν αριθμούς είτε δεν άκουγε το μήνυμα καθόλου. Παρομοίως, όταν ο παραλήπτης ήταν ο πιλότος, συνήθως έχανε την ραδιοσυχνότητα, το χαρακτηριστικό του αεροσκάφους, ή δεν άκουγε το μήνυμα καθόλου. Τόσο οι ελεγκτές όσο και οι πιλότοι αντιμετώπιζαν κυρίως δυσκολίες στη σωστή απομνημόνευση αριθμών, όταν υπήρχαν πολλές νέες πληροφορίες στο μήνυμα, ακόμα και όταν η ποιότητα του ήχου ήταν άριστη.

Αξιοσημείωτος είναι ο μεγάλος αριθμός των περιπτώσεων όπου οι πιλότοι και οι ελεγκτές δεν αποκρίθηκαν καθόλου ή αποκρίθηκαν με καθυστέρηση. Οι καθυστερημένες αποκρίσεις των πιλότων προκαλούν άγχος και όχληση στους ελεγκτές, οι οποίοι ενόσω περιμένουν την απόκριση στο μήνυμά τους, ενδέχεται να ξεκινήσουν συνομιλίες με άλλα αεροσκάφη, αυξάνοντας τη νοητική τους χρησιμοποίηση. Έρευνα των Rakas et al. (2007) με χρήση της ίδιας βάσης δεδομένων κατέδειξε πως οι ανοιχτές συνομιλίες επιδρούν περαιτέρω στην αντίδραση των ελεγκτών προκαλώντας διαδοχικές εσφαλμένες επικοινωνίες.

Επίσης, το 10% των εσφαλμένων μηνυμάτων σταλθήκαν από ελεγκτές σε αεροσκάφη τα οποία δεν είχαν συντονιστεί ακόμα στη ραδιοσυχνότητα του τομέα ή είχαν ήδη συντονιστεί στη ραδιοσυχνότητα του επόμενου τομέα ύστερα από οδηγίες του κέντρου ελέγχου. Τα μηνύματα αυτά ήταν τεχνικά αδύνατο να ληφθούν από τους πιλότους και για το λόγο αυτό δεν συμπεριλήφθηκαν στις μη αποκρίσεις μηνυμάτων.

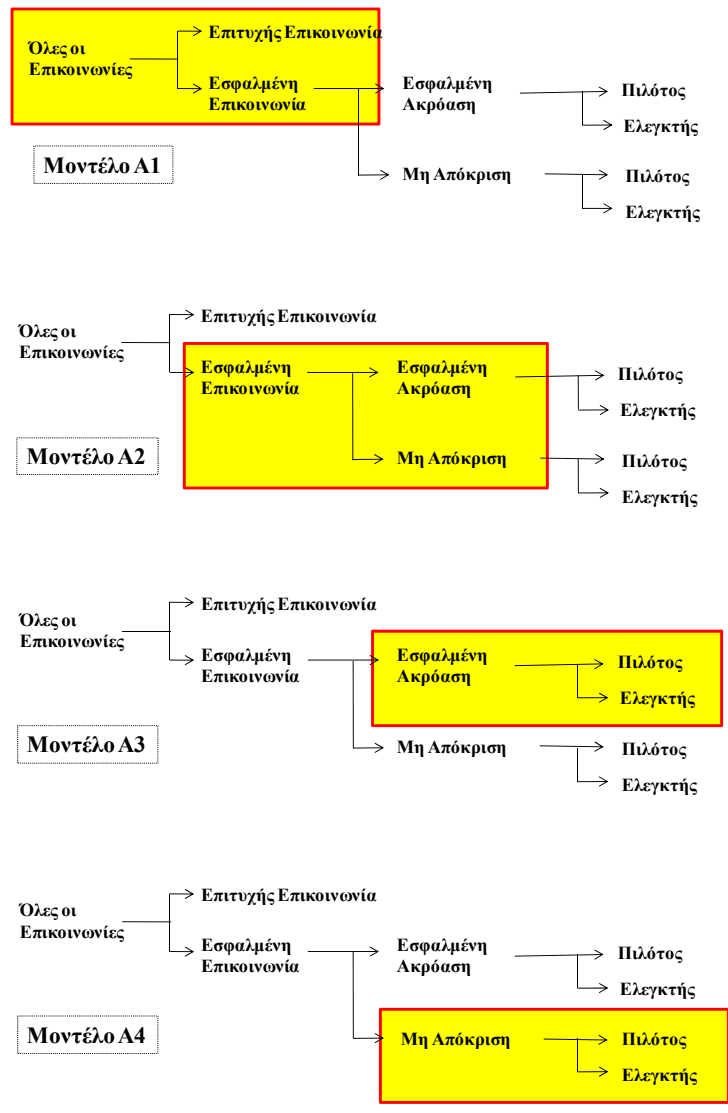
### 3.3 Περιγραφή μοντέλων

Τα μηνύματα κατηγοριοποιούνται και αναλύονται με τη χρήση δύο διαφορετικών ομάδων μοντέλων. Η πρώτη ομάδα (Rakas et al., 2007) αποτελείται από τέσσερα μοντέλα και η ανάλυση των μηνυμάτων πραγματοποιείται σε τρία επίπεδα (Εικόνα 3.1). Στο πρώτο επίπεδο (μοντέλο A1) εξετάζονται όλα τα μηνύματα τα οποία διαχωρίζονται σε 7.299 επιτυχημένες (συμβολίζονται με '0') και σε 382 εσφαλμένες (συμβολίζονται με '1') επικοινωνίες. Στο δεύτερο επίπεδο (μοντέλο A2) μελετώνται οι δύο συνηθέστεροι τύποι εσφαλμένων επικοινωνιών· οι μη αποκρίσεις (0) και οι εσφαλμένες ακροάσεις (1). Τα μηνύματα στα οποία δεν αποκρίνεται ο παραλήπτης είναι 117 και αυτά που ακούγονται εσφαλμένα είναι 168. Στο τρίτο επίπεδο (μοντέλα A3, A4) οι μη αποκρίσεις και οι εσφαλμένες ακροάσεις διακρίνονται με βάση τον παραλήπτη του κάθε μηνύματος σε εσφαλμένη ακρόαση μηνύματος με παραλήπτη πιλότο και ελεγκτή αντίστοιχα για το μοντέλο A3, και σε μη απόκριση μηνύματος με παραλήπτη πιλότο και ελεγκτή αντίστοιχα για το μοντέλο A4. Το τρίτο μοντέλο αποτελείται από τις 168 εσφαλμένες ακροάσεις οι οποίες διακρίνονται σε 62 μηνύματα με παραλήπτη ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας (0) και σε 106 μηνύματα με παραλήπτη πιλότο (1). Τέλος, στο τέταρτο μοντέλο εξετάζονται 117 μηνύματα στα οποία δεν υπήρξε απόκριση, εκ των οποίων τα 41 μηνύματα είχαν παραλήπτη ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας (0) και τα άλλα 67 είχαν παραλήπτη πιλότο (1). Σε όλα τα μοντέλα εξετάζονται οι ίδιες μεταβλητές, όπως αυτές παρουσιάστηκαν παραπάνω. Καθότι όμως η μεταβλητή 'αναχώρηση' παίρνει τιμές διάφορες του μηδενός μόνο στο πρώτο μοντέλο, στα άλλα τρία δεν λαμβάνεται υπόψη.

Παρότι τα τέσσερα αυτά μοντέλα δύναται να προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με τις διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στις συγκρινόμενες κατηγορίες μηνυμάτων, εντούτοις παρουσιάζουν μερικά σοβαρά μειονεκτήματα. Τα μοντέλα A1

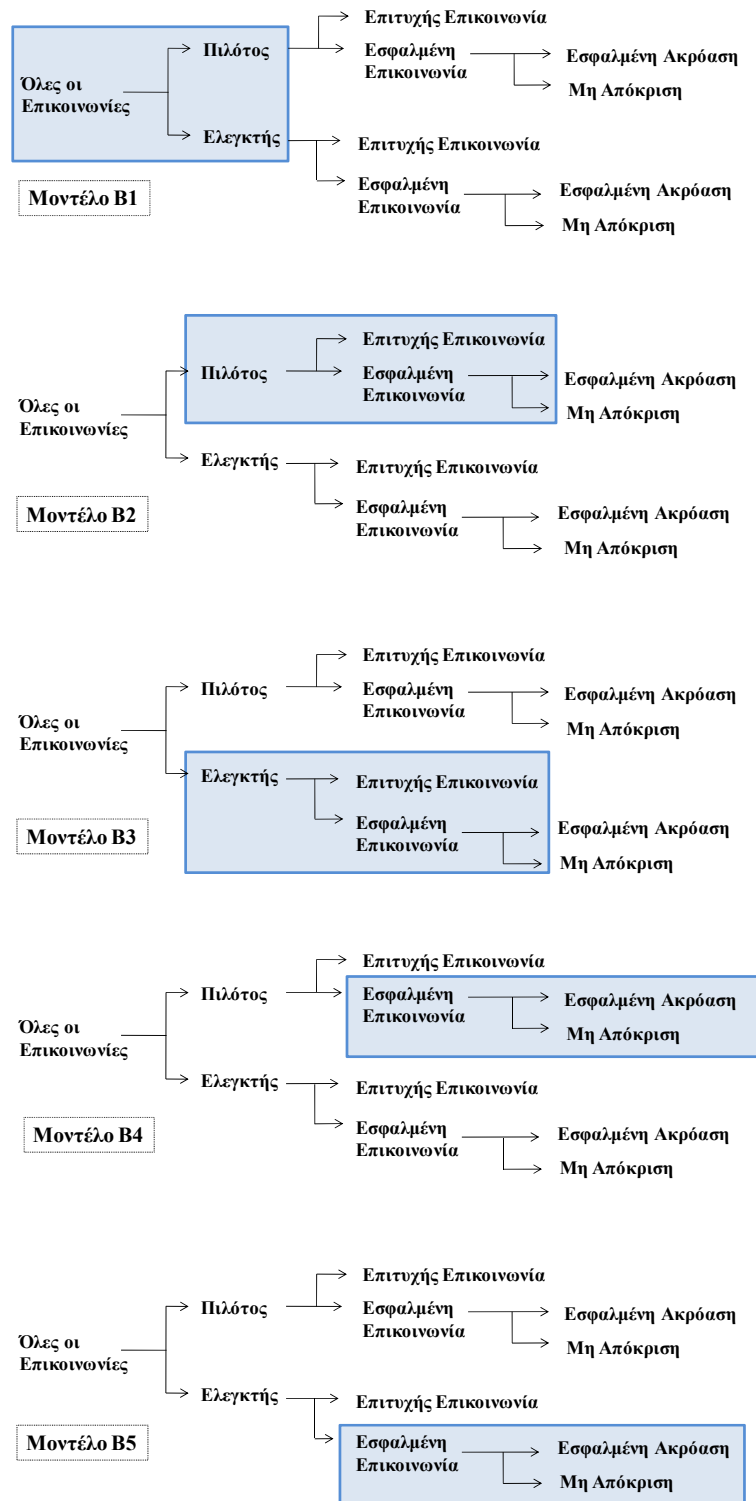
και A2 εξετάζουν το σύνολο των μηνυμάτων χωρίς να τα διαχωρίζουν ως προς τον παραλήπτη τους. Επομένως, ενώ καταδεικνύουν τις μεταβλητές που είναι στατιστικά σημαντικές για την πρόκληση εσφαλμένων επικοινωνιών στο σύνολο τους ή για ένα συγκεκριμένο τύπο σφάλματος, δεν προσδιορίζουν αν τα σφάλματα αυτά παρουσιάζονται σε όλα τα μηνύματα, ή μόνο στα μηνύματα που παραλαμβάνονται συγκεκριμένα από τους ελεγκτές ή από τους πιλότους. Για να απαντηθεί το ερώτημα αυτό, κατασκευάστηκαν τα μοντέλα A3 και A4. Όμως, στα μοντέλα αυτά συγκρίνονται μόνο οι εσφαλμένες επικοινωνίες με βάση τον παραλήπτη του μηνύματος, χωρίς να υπάρχει προηγούμενη πληροφορία για τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των πιλότων και των ελεγκτών στις συνομιλίες ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας. Επομένως, η ύπαρξη κάποιας μεταβλητής, οι τιμές της οποίας διαφέρουν σημαντικά για τους δύο παραλήπτες δεν προσφέρει καμία επιπλέον πληροφορία, καθώς οι τιμές αυτές ενδέχεται να παραμένουν ίδιες για τους δύο παραλήπτες τόσο στις επιτυχίες όσο και στις εσφαλμένες επικοινωνίες.

Για να είναι εφικτός ο υπολογισμός της επίδρασης κάθε μεταβλητής στο σύστημα επικοινωνίας κατασκευάζεται μία καινούρια ομάδα μοντέλων με σκοπό να καλύψει τις ελλείψεις της προηγούμενης (Εικόνα 3.2). Συγκεκριμένα, κατασκευάζονται πέντε μοντέλα με τα τρία επίπεδα διάκρισης, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην πρώτη ομάδα. Η βασική διαφορά έγκειται στο ότι τώρα όλα τα μηνύματα διαχωρίζονται εξαρχής με βάση τον παραλήπτη τους (μοντέλο B1). Στη συνέχεια για κάθε έναν παραλήπτη ξεχωριστά γίνεται η διάκριση σε επιτυχίες και εσφαλμένες επικοινωνίες (μοντέλο B2 για τους πιλότους και B3 για τους ελεγκτές). Στο μοντέλο B2 εξετάζονται συνολικά 3.501 μηνύματα εκ των οποίων τα 182 καταγράφονται ως εσφαλμένες επικοινωνίες, ενώ στο μοντέλο B3 τα μηνύματα αυτά είναι αντίστοιχα 3.689 και 103. Οι εσφαλμένες επικοινωνίες διακρίνονται περαιτέρω σε μη απόκριση και σε εσφαλμένη ακρόαση (μοντέλο B4 για τους πιλότους και B5 για τους ελεγκτές).



Εικόνα 3.1, Μοντέλα ομάδας A





Εικόνα 3.2, Μοντέλα ομάδας Β

### 3.4 Παρουσίαση μεταβλητών

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας η βάση δεδομένων μελετήθηκε από την αρχή και σε κάθε μήνυμα προστέθηκαν επιπλέον στοιχεία τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των τελικών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι εξής:

1. Αριθμός ανοιχτών συνομιλιών (ή νοητική χρησιμοποίηση):
  - (c,1) = μία συνομιλία
  - (cc,2) = δύο ανοιχτές συνομιλίες
  - (ccc,3) = τρεις ανοιχτές συνομιλίες
  - (cccc,4) = τέσσερις ανοιχτές συνομιλίες
2. Πολυπλοκότητα: αριθμός των στοιχείων ενός μηνύματος
3. Διάρκεια: διάρκεια μηνύματος (σε δευτερόλεπτα)
4. Άφιξη του αεροσκάφους: (1) εάν ένα αεροσκάφος αφικνύεται στον τομέα, (0) για διαφορετική περίπτωση
5. Αναχώρηση του αεροσκάφους: (1) εάν ένα αεροσκάφος αναχωρεί από τον τομέα, (0) για διαφορετική περίπτωση
6. Μεταφορά επικοινωνίας: (1) εάν ένα μήνυμα αναφέρεται στη ραδιοσυχνότητα επικοινωνίας του επόμενου τομέα, (0) για διαφορετική περίπτωση
7. Σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών
8. Σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών
9. Αριθμός αεροσκαφών
10. Αριθμός αρχικών (άφιξη) και τελικών (αναχώρηση) επαφών
11. Χωρητικότητα: monitor alert parameter (MAP)
12. Αριθμός αεροσκαφών προς χωρητικότητα
13. Αριθμός επαφών προς χωρητικότητα
14. Ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα
15. Ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα

Ο ‘αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών’ αποτελεί ουσιαστικά τμήμα ενός μετρικού συστήματος που απεικονίζει το χρόνο κατά τον οποίο ένας ελεγκτής απασχολείται νοητικά με μία συνομιλία. Το μετρικό αυτό σύστημα ονομάζεται “νοητική χρησιμοποίηση” (Bolic, 2005) και βασίζεται στο γεγονός πως ο ελεγκτής επιβαρύνεται νοητικά από μία συνομιλία καθόλο το χρονικό διάστημα που αυτή παραμένει ανοιχτή. Σημειώνεται ότι μία συνομιλία μπορεί να απαιτεί την αποστολή περισσότερων του ενός μηνύματος έως ότου ολοκληρωθεί.

Δεδομένης της εφαρμογής του συστήματος Data Link και της παράλληλης χρήσης φωνητικών και γραπτών μηνυμάτων στον έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας η ανάλυση των πολλαπλών ανοικτών συνομιλιών είναι απαραίτητη για δύο λόγους. Πρώτον, διότι τα γραπτά μηνύματα έχουν μεγαλύτερους χρόνους αποστολής και παρατηρούνται μεγάλες καθυστερήσεις στην επιβεβαίωση της λήψης τους, με αποτελεσματική διατήρηση ανοικτών συνομιλιών για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Δεύτερον, οι ανοικτές συνομιλίες βρίσκουν εφαρμογή τόσο στο φωνητικό όσο και στο γραπτό σύστημα επικοινωνίας. Επομένως, μπορούν να αποτελέσουν κοινό μέτρο αξιολόγησης και για τα δύο συστήματα.

Η ‘πολυπλοκότητα’ των μηνυμάτων ισοδυναμεί με τον αριθμό των διαφορετικών στοιχείων που περιλαμβάνονται στο μήνυμα. Οι τύποι των μηνυμάτων ορίστηκαν διαφορετικά για τους πιλότους και τους ελεγκτές, και χρησιμοποιήθηκαν για την καλύτερη κατανόηση της φύσης των επικοινωνιών, την κατασκευή σεναρίων εναέριας κυκλοφορίας και τον προσδιορισμό της πολυπλοκότητας των μηνυμάτων. Ένα στοιχείο αποτελείται από μία ομάδα λέξεων ή ψηφίων που περιέχονται στο μήνυμα και συνιστούν μία καινούρια πληροφορία, όπως διεύθυνση, επίπεδο πτήσης, συχνότητα ραδιοεπικοινωνίας, κτλ. Ως στοιχεία λαμβάνονται μόνο οι πληροφορίες που αυξάνουν τις απαιτήσεις μνήμης. Ωστόσο το χαρακτηριστικό κλήσης του αεροσκάφους δεν θεωρήθηκε ξεχωριστό στοιχείο, διότι αποσκοπεί μόνο στην προσέλκυση της προσοχής του πιλότου και δεν αποτελεί πληροφορία προς απομνημόνευση. Επίσης, παρότι στην πραγματικότητα κάθε στοιχείο ανάλογα με τη φύση του επιβαρύνει σε διαφορετικό βαθμό τη μνήμη πιλότου και ελεγκτή, για το σκοπό της μελέτης αυτής όλα τα στοιχεία θεωρήθηκαν ισοδύναμα και δεν λήφθηκε υπόψη το μέγεθος του στοιχείου, ο αριθμός των ψηφίων και η πολυπλοκότητα του περιεχομένου του. Επισημαίνεται πως οι τύποι των μηνυμάτων, δηλαδή το είδος των στοιχείων, ορίστηκαν διαφορετικά για τους πιλότους και τους ελεγκτές. Πέρα από τον

προσδιορισμό της πολυπλοκότητας των μηνυμάτων οι τύποι των μηνυμάτων χρησιμοποιήθηκαν για την καλύτερη κατανόηση της φύσης των επικοινωνιών και για την κατασκευή σεναρίων εναέριας κυκλοφορίας.

Η 'διάρκεια του μηνύματος' υπολογίζεται σε δευτερόλεπτα και αποτελεί το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την στιγμή έναρξης του ηχητικού μηνύματος έως την ολοκλήρωση του.

Η μεταβλητή 'άφιξη του αεροσκάφους' παίρνει την τιμή (1) εάν ένα αεροσκάφος αφικνύεται στον τομέα και την τιμή (0) σε διαφορετική περίπτωση.

Η μεταβλητή 'αναχώρηση του αεροσκάφους' παίρνει την τιμή (1) εάν ένα αεροσκάφος αναχωρεί από τον τομέα και την τιμή (0) σε διαφορετική περίπτωση.

Επειδή η μεταβλητή 'αναχώρηση του αεροσκάφους' έχει οριστεί να λαμβάνει την τιμή (1) μόνο για το τελευταίο μήνυμα που ανταλλάσσει το πλήρωμα του αεροσκάφους με το κέντρο ελέγχου, από την ανάλυση των δεδομένων δεν χαρακτηρίζεται κανένα από τα μηνύματα αυτά ως εσφαλμένη επικοινωνία. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, διότι η εσφαλμένη επικοινωνία ορίζεται στο μήνυμα που την προκαλεί. Επομένως τα σφάλματα επικοινωνίας που πραγματοποιούνται κατά την αναχώρηση ενός αεροσκάφους είτε έχουν οριστεί στο μήνυμα που προηγείται του τελευταίου και δεν διορθώνονται ποτέ, είτε έχουν οριστεί σε προγενέστερα μηνύματα και ενδεχομένως έχουν ήδη διορθωθεί.

Προτού αναχωρήσει ένα αεροσκάφος από έναν τομέα ελέγχου και αφιχθεί στον επόμενο, το πλήρωμά του ειδοποιείται από τον ελεγκτή για τη ραδιοσυχνότητα στην οποία πρέπει να συντονίσει τον ασύρματο προκειμένου να επικοινωνήσει με τον ελεγκτή του επόμενου τομέα. Ο αριθμός της ραδιοσυχνότητας, όμως, αποτελεί συχνή πηγή σφαλμάτων από τους πιλότους καθώς αποτελείται από 5 ψηφία στις ΗΠΑ και 6 ψηφία στην Ευρώπη. Οι πιλότοι αντιμετωπίζουν δυσκολίες τόσο στην ακρόαση του μηνύματος όσο και στη σωστή αφομοίωσή του. Επίσης, το γεγονός πως η γραπτή αποστολή του αριθμού της ραδιοσυχνότητας και η αυτόματη μεταφορά της επικοινωνίας είναι μία από τις κύριες εφαρμογές του CPDLC στο Μάαστριχτ, καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη μίας μεταβλητής που θα διακρίνει τα μηνύματα που σχετίζονται με τη μεταφορά της επικοινωνίας από τα υπόλοιπα. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε η μεταβλητή 'μεταφορά επικοινωνίας' η οποία παίρνει την τιμή (1) όταν το μήνυμα αναφέρεται στην αναχώρηση του αεροσκάφους από τον τομέα και

στο συντονισμό του στην ραδιοσυχνότητα του επόμενου τομέα. Σε διαφορετική περίπτωση η τιμή της μεταβλητής είναι (0).

Το ‘σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών’ είναι το άθροισμα των ‘αφίξεων των αεροσκαφών’ στον τομέα από την στιγμή έναρξης των ηχογραφημένων συνομιλιών έως την στιγμή αποστολής του μηνύματος. Η μαθηματική διατύπωση της μεταβλητής είναι η ακόλουθη:

$$CA_i = \sum_{j=1}^i a_j$$

όπου,

$CA_i$  το σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών τη χρονική στιγμή αποστολής του μηνύματος  $i$

$a_j$  η τιμή της μεταβλητής ‘άφιξη του αεροσκάφους’ για το μήνυμα  $j$

Αντίστοιχα το ‘σύνολο των αναχωρούντων αεροσκαφών’ είναι το άθροισμα των ‘αναχωρήσεων των αεροσκαφών’ στον τομέα από την στιγμή έναρξης των ηχογραφημένων συνομιλιών έως την στιγμή αποστολής του μηνύματος. Η μαθηματική διατύπωση της μεταβλητής είναι η ακόλουθη:

$$CD = \sum_{j=1}^i d_j$$

όπου,

$CD_i$  το σύνολο των αναχωρούντων αεροσκαφών τη χρονική στιγμή αποστολής του μηνύματος  $i$

$d_j$  η τιμή της μεταβλητής ‘αναχώρηση του αεροσκάφους’ για το μήνυμα  $j$

Οι δύο αυτές μεταβλητές χρησιμεύουν αφενός στην κατασκευή των δύο μεταβλητών που ακολουθούν, αφετέρου όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μεμονωμένα για την εκτίμηση του φόρτου εργασίας των ελεγκτών στο διάστημα που έχει προηγηθεί της αποστολής του μηνύματος καθώς και της σύνθεσης της εναέριας κυκλοφορίας. Πρέπει, όμως, να επισημανθεί ότι δεν γνωρίζουμε το χρονικό σημείο της βάρδιας των ελεγκτών στο οποίο ξεκινά το κάθε ένα ηχογραφημένο δείγμα. Επίσης, σε κάποιους τομείς υπήρξε αλλαγή βάρδιας των ελεγκτών κατά τη διάρκεια της ηχογράφησης, στοιχείο το οποίο δεν λήφθηκε υπόψη στον υπολογισμό της μεταβλητής.

Ο ‘αριθμός των αεροσκαφών’ είναι η διαφορά του ‘συνόλου των αναχωρούντων αεροσκαφών’ από το ‘σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών’ την στιγμή της αποστολής του μηνύματος συν τη διαφορά του αριθμού των διαφορετικών αεροσκαφών με τα οποία υπήρξε επικοινωνία από το ‘σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών’ την στιγμή ολοκλήρωσης του ηχογραφημένου δείγματος του τομέα. Η μεταβλητή αυτή υπολογίζει τον ακριβή αριθμό των αεροσκαφών που βρίσκονται στο τομέα και δύναται το κέντρο ελέγχου να επικοινωνήσει μαζί τους. Η μαθηματική διατύπωση της μεταβλητής είναι η ακόλουθη:

$$NA_t = (CD_t - CA_t) + (NAC - CA_T)$$

όπου,

$NA_t$  ο αριθμός των αεροσκαφών στον τομέα τη χρονική στιγμή  $t$

$CD_t$  το σύνολο των αναχωρούντων αεροσκαφών τη χρονική στιγμή  $t$

$CA_t$  το σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών τη χρονική στιγμή  $t$

$NAC$  ο αριθμός των αεροσκαφών προς ή από τα οποία στάλθηκε κάποιο μήνυμα καθόλη τη διάρκεια του ηχογραφημένου δείγματος του τομέα

$CA_T$  το σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών στο τέλος του ηχογραφημένου δείγματος του τομέα

Ο ‘αριθμός των αρχικών (άφιξη) και τελικών (αναχώρηση) επαφών’ είναι το άθροισμα του ‘συνόλου των αφικνουμένων αεροσκαφών’ με το ‘σύνολο των αναχωρούντων αεροσκαφών’. Η μαθηματική διατύπωση της μεταβλητής είναι η ακόλουθη:

$$NC_t = CD_t + CA_t$$

όπου,

$NC_t$  ο αριθμός των αρχικών και τελικών επαφών τη χρονική στιγμή  $t$

$CD_t$  το σύνολο των αναχωρούντων αεροσκαφών τη χρονική στιγμή  $t$

$CA_t$  το σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών τη χρονική στιγμή  $t$

Το ‘Monitor Alert Parameter (MAP)’ εκφράζει τη μέγιστη τιμή των αεροσκαφών που επιτρέπεται να ίπτανται ταυτόχρονα σε έναν τομέα (FAA, 2008). Η υπέρβαση της τιμής αυτής ενεργοποιεί το σύστημα ειδοποιήσεων του κέντρου ελέγχου και εκτελείται μία σειρά προκαθορισμένων ενεργειών που ποικίλλουν με βάση το βαθμό υπέρβασης. Το ‘Monitor Alert Parameter’ αποτελεί μία δυναμική μεταβλητή η οποία διαμορφώνεται από παράγοντες, όπως οι μετεωρολογικές

συνθήκες, τα βοηθήματα επικοινωνίας, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τομέα κ.α..

Ο ‘αριθμός αεροσκαφών προς χωρητικότητα’ ορίζεται ως ο ‘αριθμός των αεροσκαφών’ την στιγμή αποστολής του μηνύματος διαιρούμενος με το ‘Monitor Alert Parameter’ του τομέα.

Ο ‘αριθμός επαφών προς χωρητικότητα’ ορίζεται ως ο ‘αριθμός των αρχικών και τελικών επαφών’ την στιγμή αποστολής του μηνύματος διαιρούμενος με το ‘Monitor Alert Parameter’ του τομέα.

Το ‘ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα’ ισούται με το άθροισμά της χρονικής διάρκειας όλων των μηνυμάτων του τριαντάλεπτου δείγματος κάθε τομέα διαιρεμένου από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της έναρξης του ηχογραφημένου δείγματος έως τη χρονική στιγμή λήψης του τελευταίου ηχογραφημένου μηνύματος. Εκφράζει, επομένως, μία μέση τιμή του φόρτου εργασίας των ελεγκτών για κάθε τριαντάλεπτο δείγμα. Η μαθηματική διατύπωση της μεταβλητής είναι η ακόλουθη:

$$SFQ = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{RT_N}, \quad \text{όπου } 0 < i \leq N$$

όπου,

$SFQ$  το ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας του τομέα

$I_i$  η χρονική διάρκεια του μηνύματος  $i$  σε δευτερόλεπτα

$RT_N$  η χρονική στιγμή λήψης του τελευταίου ηχογραφημένου μηνύματος του δείγματος

$N$  αριθμός των μηνυμάτων του ηχογραφημένου δείγματος

Επειδή η κυκλοφορία σε κάθε τομέα και κατ’ επέκταση ο φόρτος εργασίας των ελεγκτών ενδέχεται να μεταβάλλονται έντονα μέσα στη διάρκεια των 30 λεπτών, κατασκευάστηκε η επιπλέον μεταβλητή ‘ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’ η οποία μελετά το ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας σε διάστημα έξι λεπτών για κάθε ένα μήνυμα ξεχωριστά. Σκοπός της μεταβλητής αυτής είναι να αποτυπώσει το φόρτο εργασίας των ελεγκτών σε ένα βραχυπρόθεσμο χρονικό διάστημα το οποίο ξεκινάει 240 δευτερόλεπτα πριν την αποστολή του μηνύματος και ολοκληρώνεται 120 δευτερόλεπτα μετά τη λήψη του.

Κρισιμότερο για την κόπωση και την αδυναμία του ελεγκτή να εκτελέσει με επιτυχία την επικοινωνία με τα αεροσκάφη θεωρείται το χρονικό διάστημα που

προηγείται της αποστολή του μηνύματος. Πάρα ταύτα, η ρύθμιση της εναέριας κυκλοφορίας απαιτεί από τους ελεγκτές τον σχεδιασμό και την πρόληψη σε βάθος χρόνου. Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η ύπαρξη ενός χρονικού διαστήματος το οποίο θα εκφράζει τη νοητική χρησιμοποίηση των ελεγκτών την στιγμή αποστολής του μηνύματος, η οποία όμως προκαλείται από τις συνομιλίες που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν αμέσως μετά. Το χρονικό αυτό διάστημα των 120 δευτερολέπτων επιλέχθηκε, έτσι ώστε να ταυτίζεται με το μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο απόκρισης των μηνυμάτων που αποστέλλονται από τους ελεγκτές προς τους πιλότους στο σύστημα CPDLC. Επίσης, συμπίπτει με το χρονικό διάστημα υπολογισμού στο σύστημα ειδοποίησης εμπλοκής σε άμεσο χρόνο (Short-Term Conflict Alert, STCA). Ο χρόνος των 240 δευτερολέπτων, που προηγείται της αποστολής του μηνύματος, επιλέχθηκε λόγω της αυξημένης σημασίας του ως ο διπλάσιος του χρόνου που έπεται της λήψης.

Για τα μηνύματα που ισχύει ο περιορισμός:

$$ST_i - 240 > 0 \quad , \quad RT_i + 120 < ST_N \quad , \quad \text{όπου } 0 < i \leq N$$

η μαθηματική διατύπωση της μεταβλητής είναι η ακόλουθη:

$$MFQ_i = \frac{\sum I_j}{360}$$

όπου,

$MFQ_i$  το ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας για το μήνυμα  $i$

$I_j$  η χρονική διάρκεια του μηνύματος  $j$  σε δευτερόλεπτα για το οποίο ισχύει:

$$RT_j > ST_i - 240 \quad , \quad ST_j < RT_i + 120$$

$RT_i$  η χρονική στιγμή λήψης του μηνύματος  $i$

$ST_i$  η χρονική στιγμή αποστολής του μηνύματος  $i$

$N$  αριθμός των μηνυμάτων του ηχογραφημένου δείγματος

Για τα υπόλοιπα μηνύματα του τριαντάλεπτου δείγματος, τα οποία δεν ικανοποιούν τον ανωτέρω περιορισμό λαμβάνεται ως τιμή ο μέσος όρος των τιμών των μηνυμάτων που τον ικανοποιούν.



## 3.5 Ανάλυση μεταβλητών

### 3.5.1 Περιγραφική Στατιστική

Προκειμένου να διευκρινιστεί η σχέση μεταξύ των μεταβλητών και η επίδρασή τους στις επικοινωνίες ελεγκτών και πιλότων, γίνεται υπολογισμός βασικών στατιστικών μεγεθών και διεξαγωγή στατιστικών ελέγχων. Αρχικά, υπολογίζονται οι μέσοι όροι και η τυπική απόκλιση για κάθε μεταβλητή. Τα υπολογισθέντα μεγέθη παρατίθενται στους πίνακες 3.6 έως 3.14. Εν συνεχεία, γίνεται έλεγχος για τη διαφορά του μέσου στα διάφορα ζεύγη πληθυσμών. Εφόσον σε όλα τα δείγματα ισχύει  $n_i > 30$ , ο στατιστικός έλεγχος που χρησιμοποιείται είναι ο εξής:

- Αρχική υπόθεση  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
- Εναλλακτική υπόθεση:  $H_A: \mu_1 - \mu_2 \neq 0_2$
- Τιμή στατιστικού ελέγχου  $T$ ,  $t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$

Τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου παρουσιάζονται στους πίνακες 3.4 και 3.5 με (1) και κίτρινο χρώμα όπου υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στους μέσους όρους των πληθυσμών για επίπεδο σημαντικότητας 5% και (0) όταν η διαφορά δεν είναι στατιστικά σημαντική. Παρατηρούμε μία έντονη ποικιλία στις μεταβλητές των οποίων οι μέσοι όροι διαφέρουν. Το γεγονός αυτό δείχνει πως οι παράγοντες του συστήματος επικοινωνίας επιδρούν με διαφορετικό τρόπο τόσο στους δύο παραλήπτες όσο και στους τύπους των σφαλμάτων που προκαλούνται.

**Πίνακας 3.4**, Στατιστικός έλεγχος της διαφοράς των μέσων των πληθυσμών

Μεταβλητές	Μοντέλο A1	Μοντέλο A2	Μοντέλο A3	Μοντέλο A4
	Επιτυχής / Εσφαλμένη	Μη απόκριση/ Εσφ. ακρόαση	Ελεγκτής / Πιλότος	Ελεγκτής / Πιλότος
Ανοιχτές συνομιλίες	1	1	0	0
Πολυπλοκότητα	1	0	0	0
Διάρκεια	1	0	1	0
Άφιξη	1	0	1	1
Αναχώρηση	1	0	0	
Μεταφορά επικοινωνίας	1	1	1	1
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	1	1	0	0
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	1	0	0	0
Αριθμός αεροσκαφών	1	1	0	1
Αριθμός επαφών	1	1	0	0
MAP	1	0	0	0
Αριθμός α/φ / MAP	1	1	0	1
Αριθμός επαφών / MAP	1	1	0	0
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0	1	0	0
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	1	1	0	0

**Πίνακας 3.5**, Στατιστικός έλεγχος της διαφοράς των μέσων των πληθυσμών

Μεταβλητές	Μοντέλο B1	Μοντέλο B2	Μοντέλο B3	Μοντέλο B4	Μοντέλο B5
	Ελεγκτής / Πιλότος	Επιτυχής / Εσφαλμένη	Επιτυχής / Εσφαλμένη	Μη απόκριση/ Εσφ. ακρόαση	Μη απόκριση/ Εσφ. ακρόαση
Ανοιχτές συνομιλίες	0	0	1	0	1
Πολυπλοκότητα	1	0	0	0	0
Διάρκεια	1	1	1	0	0
Άφιξη	1	1	1		0
Αναχώρηση	1	0	1		0
Μεταφορά επικοινωνίας	0	1	1	1	0
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	0	1	1	1	0
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	0	1	0	1	0
Αριθμός αεροσκαφών	0	0	1	0	1
Αριθμός επαφών	0	1	1	1	0
MAP	0	0	0	0	0
Αριθμός α/φ / MAP	0	0	1	0	1
Αριθμός επαφών / MAP	0	1	0	1	0
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0	0	0	1	1
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0	1	1	1	1

**Πίνακας 3.6**, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου A1

Μοντέλο A1	Όλα τα μηνύματα		Επιτυχής επικοινωνία		Εσφαλμένη επικοινωνία	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,10	0,35	1,10	0,35	1,18	0,48
Πολυπλοκότητα	1,45	0,77	1,45	0,78	1,38	0,63
Διάρκεια	2,97	1,61	2,94	1,62	3,54	1,26
Άφιξη	0,12	0,32	0,11	0,32	0,20	0,40
Αναχώρηση	0,12	0,33	0,13	0,33	0,00	0,05
Μεταφορά επικοινωνίας	0,26	0,44	0,26	0,44	0,36	0,48
Σύνολο αφικνουομένων α/φ	23,14	10,01	23,05	10,02	24,82	9,86
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	12,57	8,58	12,52	8,58	13,49	8,56
Αριθμός αεροσκαφών	10,57	4,55	10,53	4,56	11,33	4,48
Αριθμός επαφών	35,72	18,09	35,58	18,09	38,31	17,92
MAP	16,57	2,38	16,56	2,37	16,81	2,45
Αριθμός α/φ / MAP	0,65	0,27	0,65	0,27	0,69	0,26
Αριθμός επαφών / MAP	2,19	1,15	2,19	1,15	2,31	1,12
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,36	0,12	0,36	0,12	0,37	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,40	0,13	0,40	0,13	0,42	0,13

**Πίνακας 3.7**, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου A2

Μοντέλο A2	Εσφαλμένη επικοινωνία		Μη απόκριση		Εσφαλμένη ακρόαση	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,19	0,49	1,29	0,58	1,12	0,40
Πολυπλοκότητα	1,39	0,61	1,37	0,63	1,41	0,59
Διάρκεια	3,62	1,17	3,51	1,29	3,70	1,08
Άφιξη	0,25	0,43	0,24	0,43	0,25	0,44
Αναχώρηση	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01	0,08
Μεταφορά επικοινωνίας	0,39	0,49	0,30	0,46	0,45	0,50
Σύνολο αφικνουομένων α/φ	25,37	9,68	27,10	9,49	24,17	9,66
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	13,90	8,56	14,76	9,03	13,30	8,19
Αριθμός αεροσκαφών	11,47	4,45	12,34	4,48	10,87	4,34
Αριθμός επαφών	39,28	17,73	41,86	17,98	37,47	17,37
MAP	16,76	2,41	16,68	2,26	16,82	2,51
Αριθμός α/φ / MAP	0,70	0,25	0,76	0,26	0,65	0,24
Αριθμός επαφών / MAP	2,37	1,11	2,55	1,18	2,25	1,04
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,37	0,12	0,41	0,11	0,35	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,43	0,13	0,47	0,13	0,40	0,13

**Πίνακας 3.8**, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου A3

Μοντέλο A3	Εσφαλμένη ακρόαση		Ελεγκτής		Πιλότος	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,12	0,40	1,15	0,44	1,11	0,39
Πολυπλοκότητα	1,41	0,59	1,42	0,59	1,40	0,59
Διάρκεια	3,70	1,08	3,41	1,06	3,86	1,06
Άφιξη	0,25	0,44	0,71	0,46	0,00	0,00
Αναχώρηση	0,01	0,08	0,02	0,13	0,00	0,00
Μεταφορά επικοινωνίας	0,45	0,50	0,02	0,13	0,68	0,47
Σύνολο αφικνουομένων α/φ	24,17	9,66	25,71	9,41	23,33	9,73
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	13,30	8,19	14,18	7,71	12,82	8,43
Αριθμός αεροσκαφών	10,87	4,34	11,53	4,61	10,50	4,16
Αριθμός επαφών	37,47	17,37	39,89	16,57	36,15	17,73
MAP	16,82	2,51	16,95	2,21	16,75	2,67
Αριθμός α/φ / MAP	0,65	0,24	0,68	0,26	0,64	0,23
Αριθμός επαφών / MAP	2,25	1,04	2,38	1,01	2,17	1,06
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,35	0,12	0,35	0,12	0,35	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,40	0,13	0,40	0,13	0,39	0,12

**Πίνακας 3.9**, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου A4

Μοντέλο A4	Μη απόκριση		Ελεγκτής		Πιλότος	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,29	0,58	1,40	0,59	1,23	0,57
Πολυπλοκότητα	1,37	0,63	1,26	0,50	1,43	0,69
Διάρκεια	3,51	1,29	3,31	1,35	3,62	1,25
Άφιξη	0,24	0,43	0,69	0,47	0,00	0,00
Αναχώρηση	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Μεταφορά επικοινωνίας	0,30	0,46	0,00	0,00	0,46	0,50
Σύνολο αφικνουομένων α/φ	27,10	9,49	27,10	9,29	27,10	9,65
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	14,76	9,03	12,88	7,73	15,75	9,54
Αριθμός αεροσκαφών	12,34	4,48	14,21	4,57	11,35	4,12
Αριθμός επαφών	41,86	17,98	39,98	16,47	42,85	18,75
MAP	16,68	2,26	16,90	1,93	16,57	2,42
Αριθμός α/φ / MAP	0,76	0,26	0,85	0,25	0,71	0,25
Αριθμός επαφών / MAP	2,55	1,18	2,38	1,07	2,65	1,23
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,41	0,11	0,42	0,11	0,40	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,47	0,13	0,49	0,12	0,46	0,14

**Πίνακας 3.10**, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου Β1

Μοντέλο Β1	Όλα τα μηνύματα		Ελεγκτής		Πιλότος	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,10	0,35	1,10	0,36	1,10	0,35
Πολυπλοκότητα	1,45	0,77	1,40	0,58	1,50	0,92
Διάρκεια	2,97	1,61	2,69	1,43	3,24	1,72
Άφιξη	0,12	0,32	0,23	0,42	0,00	0,05
Αναχώρηση	0,12	0,33	0,24	0,43	0,00	0,03
Μεταφορά επικοινωνίας	0,26	0,44	0,26	0,44	0,27	0,45
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	23,14	10,01	23,16	10,00	23,13	10,04
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	12,57	8,58	12,65	8,55	12,50	8,62
Αριθμός αεροσκαφών	10,57	4,55	10,51	4,58	10,63	4,53
Αριθμός επαφών	35,72	18,09	35,81	18,03	35,63	18,15
MAP	16,57	2,38	16,56	2,38	16,59	2,38
Αριθμός α/φ / MAP	0,65	0,27	0,64	0,27	0,65	0,26
Αριθμός επαφών / MAP	2,19	1,15	2,20	1,14	2,19	1,15
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,36	0,12	0,36	0,12	0,36	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,40	0,13	0,40	0,13	0,40	0,13

**Πίνακας 3.11**, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου Β2

Μοντέλο Β2	Όλα τα μηνύματα		Επιτυχής επικοινωνία		Εσφαλμένη επικοινωνία	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,10	0,35	1,10	0,35	1,16	0,48
Πολυπλοκότητα	1,50	0,92	1,50	0,93	1,41	0,63
Διάρκεια	3,24	1,73	3,21	1,75	3,76	1,15
Άφιξη	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,00
Αναχώρηση	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00
Μεταφορά επικοινωνίας	0,27	0,44	0,26	0,44	0,59	0,49
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	23,14	10,03	23,05	10,03	24,89	9,85
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	12,50	8,62	12,42	8,60	14,04	9,00
Αριθμός αεροσκαφών	10,64	4,53	10,63	4,55	10,85	4,16
Αριθμός επαφών	35,64	18,15	35,47	18,12	38,93	18,41
MAP	16,58	2,38	16,58	2,37	16,67	2,56
Αριθμός α/φ / MAP	0,65	0,26	0,65	0,26	0,67	0,24
Αριθμός επαφών / MAP	2,19	1,15	2,18	1,15	2,37	1,15
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,36	0,12	0,36	0,12	0,37	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,40	0,13	0,40	0,13	0,42	0,13

**Πίνακας 3.12, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου Β3**

Μοντέλο Β3	Όλα τα μηνύματα		Επιτυχής επικοινωνία		Εσφαλμένη επικοινωνία	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,10	0,35	1,10	0,35	1,25	0,52
Πολυπλοκότητα	1,41	0,59	1,41	0,59	1,36	0,56
Διάρκεια	2,69	1,43	2,68	1,43	3,37	1,18
Αφιξη	0,23	0,42	0,22	0,41	0,70	0,46
Αναχώρηση	0,24	0,43	0,25	0,43	0,01	0,10
Μεταφορά επικοινωνίας	0,26	0,44	0,26	0,44	0,01	0,10
Σύνολο αφικνουομένων α/φ	23,15	10,00	23,06	10,00	26,27	9,34
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	12,65	8,55	12,62	8,57	13,65	7,71
Αριθμός αεροσκαφών	10,50	4,58	10,44	4,56	12,62	4,76
Αριθμός επαφών	35,80	18,03	35,69	18,06	39,92	16,45
MAP	16,56	2,37	16,55	2,38	16,93	2,10
Αριθμός α/φ / MAP	0,64	0,27	0,64	0,27	0,75	0,26
Αριθμός επαφών / MAP	2,20	1,14	2,19	1,15	2,38	1,03
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,36	0,12	0,36	0,12	0,38	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,40	0,13	0,40	0,13	0,44	0,14

**Πίνακας 3.13, Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου Β4**

Μοντέλο Β4	Εσφαλμένη επικοινωνία		Μη απόκριση		Εσφαλμένη ακρόαση	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,16	0,48	1,23	0,57	1,11	0,39
Πολυπλοκότητα	1,41	0,63	1,43	0,69	1,40	0,59
Διάρκεια	3,76	1,15	3,62	1,25	3,86	1,06
Αφιξη	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Αναχώρηση	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Μεταφορά επικοινωνίας	0,59	0,49	0,46	0,50	0,68	0,47
Σύνολο αφικνουομένων α/φ	24,89	9,85	27,10	9,65	23,33	9,73
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	14,04	9,00	15,75	9,54	12,82	8,43
Αριθμός αεροσκαφών	10,85	4,16	11,35	4,12	10,50	4,16
Αριθμός επαφών	38,93	18,41	42,85	18,75	36,15	17,73
MAP	16,67	2,56	16,57	2,42	16,75	2,67
Αριθμός α/φ / MAP	0,67	0,24	0,71	0,25	0,64	0,23
Αριθμός επαφών / MAP	2,37	1,15	2,65	1,23	2,17	1,06
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,37	0,12	0,40	0,12	0,35	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,42	0,13	0,46	0,14	0,39	0,12

**Πίνακας 3.14,** Μέσος όρος και τυπική απόκλιση των μηνυμάτων του Μοντέλου B5

Μοντέλο B5	Εσφαλμένη επικοινωνία		Μη απόκριση		Εσφαλμένη ακρόαση	
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση
Ανοιχτές συνομιλίες	1,25	0,52	1,40	0,59	1,15	0,44
Πολυπλοκότητα	1,36	0,56	1,26	0,50	1,42	0,59
Διάρκεια	3,37	1,18	3,31	1,35	3,41	1,06
Αφιξη	0,70	0,46	0,69	0,47	0,71	0,46
Αναχώρηση	0,01	0,10	0,00	0,00	0,02	0,13
Μεταφορά επικοινωνίας	0,01	0,10	0,00	0,00	0,02	0,13
Σύνολο αφικνουομένων α/φ	26,27	9,34	27,10	9,29	25,71	9,41
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	13,65	7,71	12,88	7,73	14,18	7,71
Αριθμός αεροσκαφών	12,62	4,76	14,21	4,57	11,53	4,61
Αριθμός επαφών	39,92	16,45	39,98	16,47	39,89	16,57
MAP	16,93	2,10	16,90	1,93	16,95	2,21
Αριθμός α/φ / MAP	0,75	0,26	0,85	0,25	0,68	0,26
Αριθμός επαφών / MAP	2,38	1,03	2,38	1,07	2,38	1,01
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,38	0,12	0,42	0,11	0,35	0,12
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,44	0,14	0,49	0,12	0,40	0,13

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται έλεγχος του βαθμού συσχέτισης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών για κάθε μοντέλο ξεχωριστά (Παράρτημα Α, Πίνακες Π.Α.1-Π.Α.9). Ο έλεγχος αυτός πέρα από τις πληροφορίες που προσφέρει για την αλληλεπίδραση των μεταβλητών είναι απαραίτητος για την επιτυχή χρήση της μεθόδου της λογιστικής παλινδρόμησης που θα εφαρμοστεί μετέπειτα. Εάν οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν συσχετίζονται, τότε τα αποτελέσματα των μοντέλων παλινδρόμησης θα είναι εσφαλμένα.

Ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho$  μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών  $X$  και  $Y$  εκφράζει το βαθμό στον οποίο μπορούμε να προβλέψουμε την τιμή μιας τυχαίας μεταβλητής όταν γνωρίζουμε την τιμή της άλλης. Έτσι όταν  $\rho=0$  η τιμή της τυχαίας μεταβλητής  $X$  δεν βοηθά καθόλου στην πρόβλεψη της  $Y$ , ενώ αντίθετα όταν  $|\rho|=1$  γνωρίζοντας την τιμή τυχαίας μεταβλητής  $X$  γνωρίζουμε με βεβαιότητα και την τιμή της  $Y$ . Η δειγματική συνδιακύμανση των μεταβλητών  $X$  και  $Y$  καθορίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\text{COV}_p(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{N}$$

$$\text{COV}_s(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{n - 1}$$

Ο δειγματικός (γραμμικός) συντελεστής συσχέτισης των μεταβλητών X και Y, καθορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$r = \frac{\text{COV}(X, Y)}{S_X S_Y}$$

Ο βαθμός συσχέτισης των μεταβλητών υποδεικνύει τη σχέση που μπορεί να υπάρχει ανάμεσα σε δύο διαφορετικές μεταβλητές και δίνει μια αίσθηση εξάρτησης ή ανεξαρτησίας ανάμεσα στα δύο μεγέθη που εξετάζονται. Το θετικό πρόσημο έχει την έννοια της θετικής συσχέτισης, δηλαδή αυξανόμενου του ενός μεγέθους αυξάνεται και το άλλο. Το αντίθετο συμβαίνει με την ένδειξη του αρνητικού προσήμου, το οποίο περιγράφει μια σχέση αντιστρόφως ανάλογη. Για μεγάλα δείγματα ( $n > 30$ ) σημαντικοί θεωρούνται οι συντελεστές συσχέτισης όταν  $r > 0,60$ , οπότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί στην στατιστική μία εκ των δύο συσχετισμένων μεταβλητών.

**Πίνακας 3.15, Συσχέτιση Μεβλητών**

Μεταβλητές	A	C	E	F	G	H	I	K
Εξατημένη μεταβλητή (A)								
Άφιξη (B)	A3, A4							
Αναχώρηση (C)								
Μεταφορά επικοινωνίας (D)	A3	A1, B1, B3						
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (E)								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (F)			ΌΛΑ					
Αριθμός αεροσκαφών (G)								
Αριθμός επαφών (H)			ΌΛΑ	ΌΛΑ				
Αριθμός α/φ / MAP (I)					ΌΛΑ			
Αριθμός επαφών / MAP (J)			ΌΛΑ	ΌΛΑ		ΌΛΑ		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (K)							ΌΛΑ	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (L)							A4, B5	ΌΛΑ

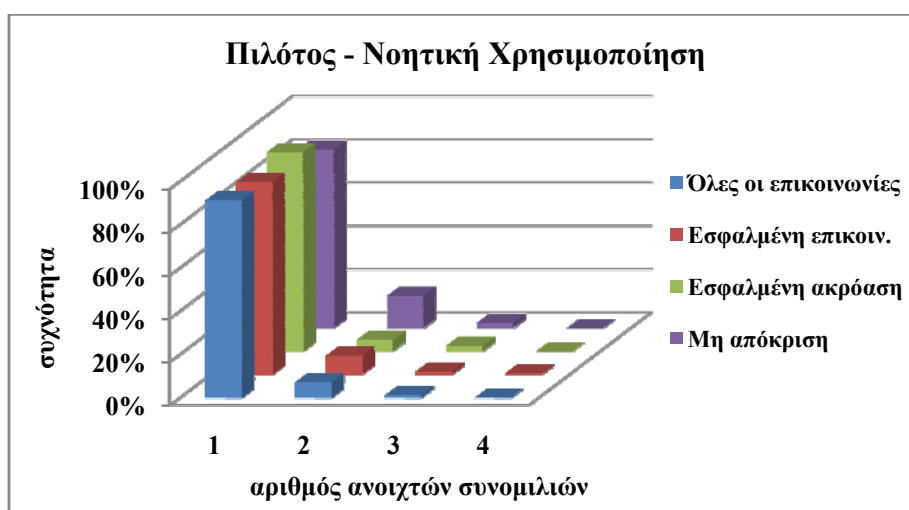
Στον πίνακα 3.15 εμφανίζονται τα μοντέλα στα οποία οι συντελεστές συσχέτισης των μεταβλητών είναι  $r > 0,60$ . Όπως αναμενόταν, οι μεταβλητές ‘σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών’, ‘σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών’, ‘αριθμός αρχικών και τελικών επαφών’ και ‘αριθμός αρχικών και τελικών επαφών προς MAP’ συσχετίζονται άμεσα. Επίσης, μεγάλη συσχέτιση υπάρχει μεταξύ των μεταβλητών ‘αριθμός αεροσκαφών’ και ‘αριθμός αεροσκαφών προς MAP’. Το ‘ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα’ συσχετίζεται με τον ‘αριθμό αεροσκαφών προς MAP’ και με το ‘ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’. Οι παρατηρήσεις αυτές ισχύουν σε όλα τα μοντέλα. Επιπλέον, στα μοντέλα A1, B1 και B3 η ‘μεταφορά επικοινωνίας’ συσχετίζεται με την ‘αναχώρηση αεροσκάφους’, ενώ το ‘ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’



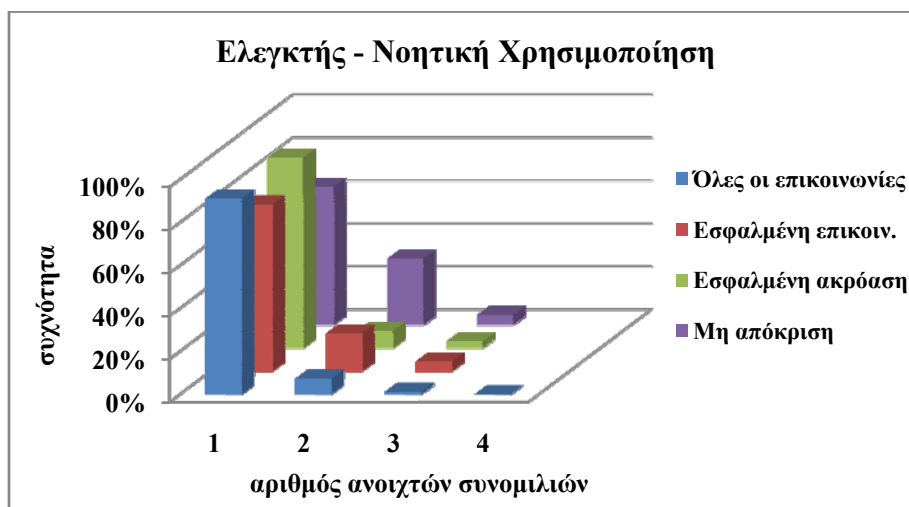
συσχετίζεται με τον 'αριθμό αεροσκαφών προς MAP' στα μοντέλα A4 και B5. Τέλος, η εξαρτημένη μεταβλητή 'παραλήπτης του μηνύματος' συσχετίζεται με την 'άφιξη αεροσκάφους' στα μοντέλα A3, A4 και με την 'μεταφορά επικοινωνίας' στο μοντέλο A3.

Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των μεταβλητών στην πρόκληση εσφαλμένων επικοινωνιών, κάθε μεταβλητή εξετάζεται και αναλύεται ξεχωριστά με τη χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων συχνοτήτων και αθροιστικών συχνοτήτων.

### 3.5.2 Αριθμός ανοιχτών συνομιλιών - νοητική χρησιμοποίηση



Διάγραμμα 3.2, Πιλότος - Νοητική Χρησιμοποίηση



Διάγραμμα 3.3, Ελεγκτής - Νοητική Χρησιμοποίηση

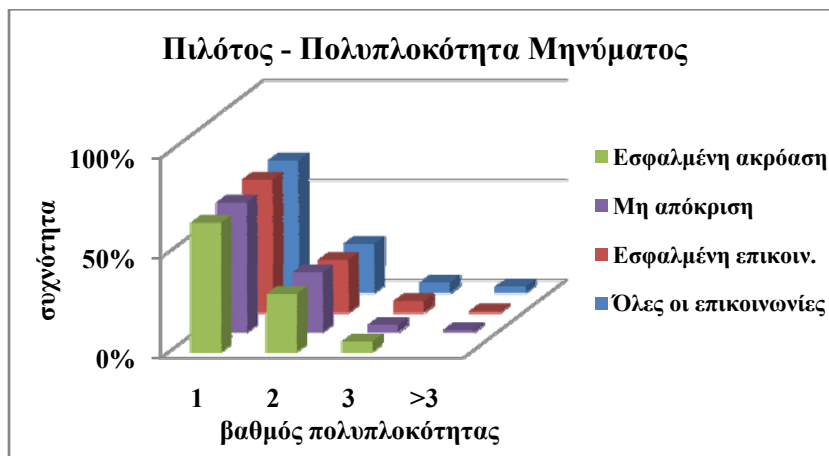
Στα διαγράμματα 3.2 και 3.3 παρατηρούμε ότι το ποσοστό των περισσοτέρων της μίας ανοιχτής συνομιλίας εμφανίζεται αρκετά υψηλότερο στις μη αποκρίσεις, ιδιαίτερα όταν οι παραλήπτες των μηνυμάτων είναι ελεγκτές. Όταν ένας ελεγκτής ανοίγει συνομιλίες ταυτόχρονα με περισσότερα από ένα αεροσκάφη, αυξάνεται ο φόρτος εργασίας του και κατ' επέκταση η νοητική του χρησιμοποίηση, με αποτέλεσμα να αδυνατεί να αποκριθεί άμεσα σε ορισμένα μηνύματα ή να αποκρίνεται με καθυστέρηση (Rakas, 2007). Σε αυτό συμβάλλει και η αύξηση του ποσοστού κατάληψης της ραδιοσυχνότητας επικοινωνίας που εξηγεί εν μέρει την επίδραση των ανοιχτών συνομιλιών στις καθυστερημένες αποκρίσεις των πιλότων, οι οποίοι προσπαθούν να επικοινωνήσουν με τον ελεγκτή αλλά αδυνατούν, διότι η ραδιοσυχνότητα είναι κατειλημμένη. Οι εσφαλμένες ακροάσεις των ελεγκτών και των πιλότων δε φαίνεται να επηρεάζονται από τον αριθμό των ανοιχτών συνομιλιών.

### 3.5.3 Πολυπλοκότητα μηνύματος

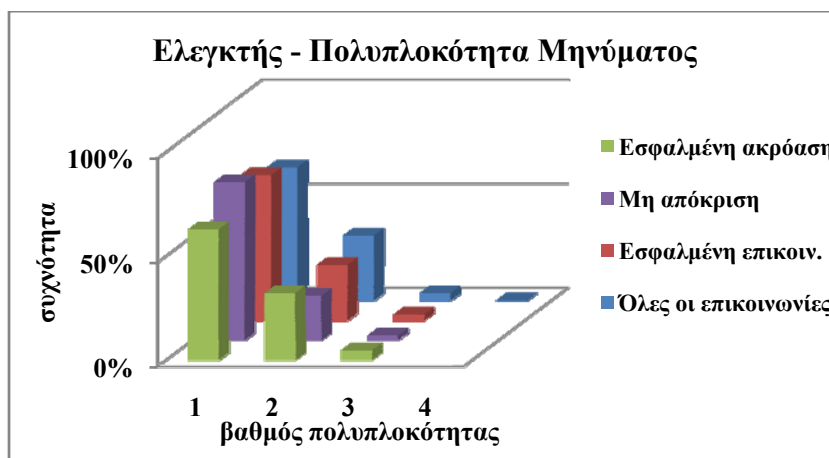
Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 3.4 και 3.5, η 'πολυπλοκότητα του μηνύματος' καταλαμβάνει σχεδόν τα ίδια ποσοστά σε όλες τις περιπτώσεις. Η μοναδική διαφορά εντοπίζεται ανάμεσα στις εσφαλμένες ακροάσεις και τις μη αποκρίσεις των ελεγκτών. Το ποσοστό των μηνυμάτων με βαθμό πολυπλοκότητας μεγαλύτερο του ένα είναι μειωμένο στις μη αποκρίσεις των ελεγκτών σε σχέση με τις εσφαλμένες ακροάσεις των ελεγκτών και με το σύνολο των μηνυμάτων. Βασική αιτία ενδέχεται να είναι η μεγαλύτερη προσοχή που δίνουν οι ελεγκτές στα πολυπλοκότερα μηνύματα, καθώς ο μεγαλύτερος αριθμός πληροφοριών που μεταφέρουν τα καθιστά κρισιμότερα για την ασφάλεια του εναέριου χώρου.

Στις συνομιλίες ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας και πιλότων η πολυπλοκότητα του μηνύματος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα πρόκλησης σφαλμάτων. Με εξαίρεση την τερματική περιοχή ελέγχου, αύξηση της πολυπλοκότητας ενός μηνύματος οδηγεί σε αυξημένη πιθανότητα πρόκλησης σφαλμάτων (Cardosi, 1993), (Cardosi, 1994), (Bürki-Cohen, 1995), (Cardosi et al., 1996). Πάρα ταύτα, η ανάλυση των δεδομένων μας δεν υποστηρίζει κάποια εμφανή συσχέτιση της πολυπλοκότητας με τις εσφαλμένες επικοινωνίες. Είκοσι τέσσερις από τους σαράντα δύο τομείς που εξετάστηκαν παρουσιάζουν μεγαλύτερο μέσο όρο πολυπλοκότητας στις επιτυχείς επικοινωνίες απ' ό,τι στις εσφαλμένες (Διάγραμμα 3.6). Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός, πως η πολυπλοκότητα έχει οριστεί ως ο

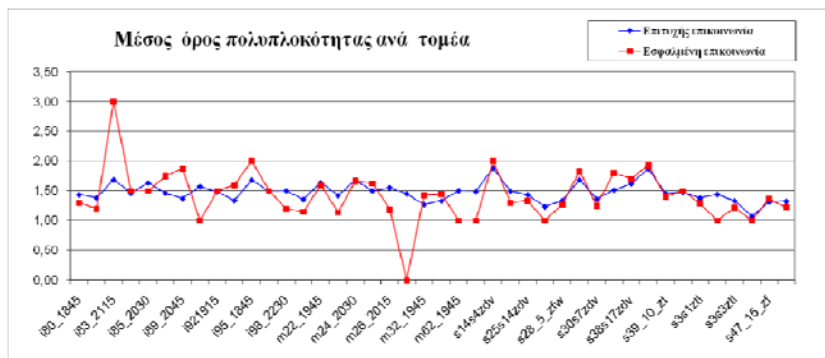
αριθμός των στοιχείων που περιλαμβάνονται σε ένα μήνυμα, ανεξάρτητα από το μέγεθος και την πολυπλοκότητά τους. Επομένως η πολυπλοκότητα δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ιδιαίτερα αξιόπιστο μέτρο αξιολόγησης του μεγέθους των μηνυμάτων και αντί αυτής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η διάρκεια του μηνύματος, καθώς, όπως φαίνεται και στους πίνακες συσχέτισης, τα δύο αυτά μεγέθη αλληλοεξαρτώνται.



Διάγραμμα 3.4, Πιλότος - Πολυπλοκότητα Μηνύματος



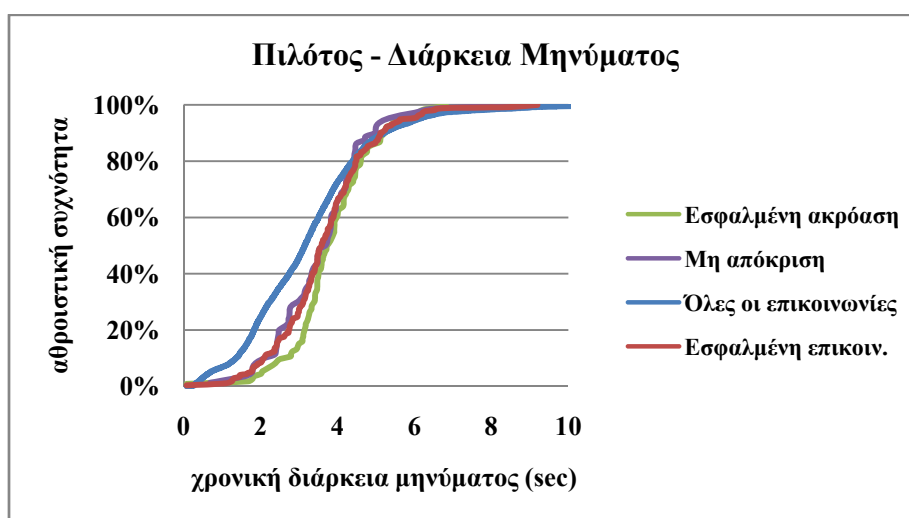
Διάγραμμα 3.5, Ελεγκτής - Πολυπλοκότητα Μηνύματος



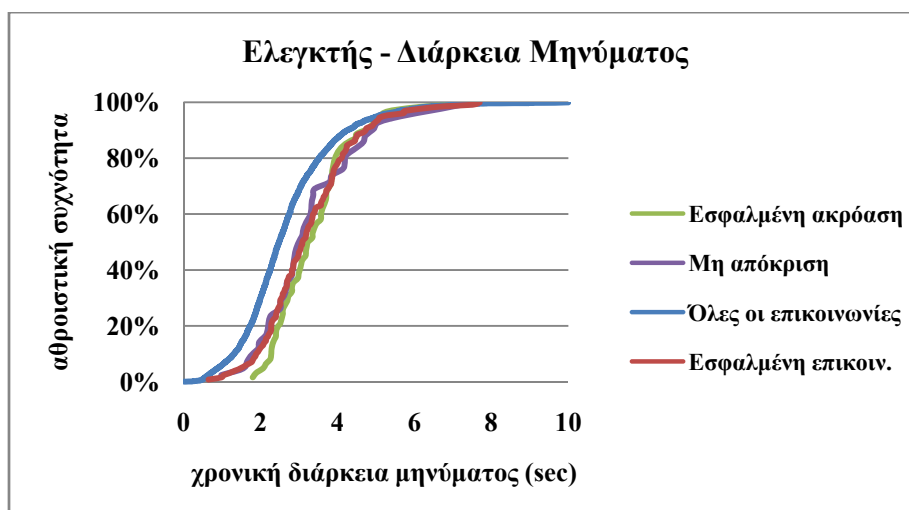
Διάγραμμα 3.6, Μέσος όρος πολυπλοκότητας μηνυμάτων ανά τομέα

### 3.5.4 Διάρκεια μηνύματος

Σύμφωνα με τα διαγράμματα 3.7 και 3.8 η αύξηση της διάρκειας ενός μηνύματος αυξάνει την πιθανότητα πρόκλησης εσφαλμένων επικοινωνιών τόσο για τους ελεγκτές όσο και για τους πιλότους. Η μεγαλύτερη επίδραση της διάρκειας των μηνυμάτων παρατηρείται στις εσφαλμένες ακροάσεις, ιδιαίτερα όταν ο παραλήπτης του μηνύματος είναι ελεγκτής. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς όσο περισσότερο διαρκεί ένα μήνυμα τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να μην ακουστεί κάποιο τμήμα του σωστά από τον παραλήπτη.



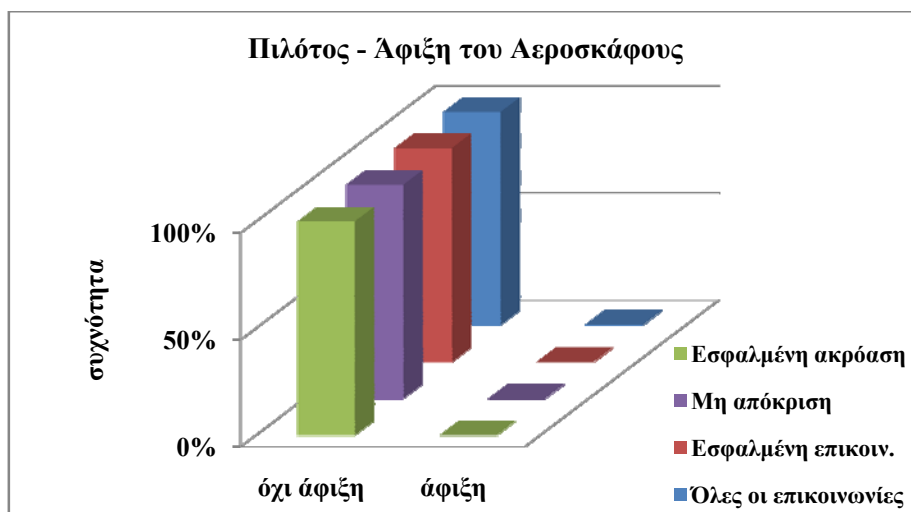
Διάγραμμα 3.7, Πιλότος - Διάρκεια Μηνύματος



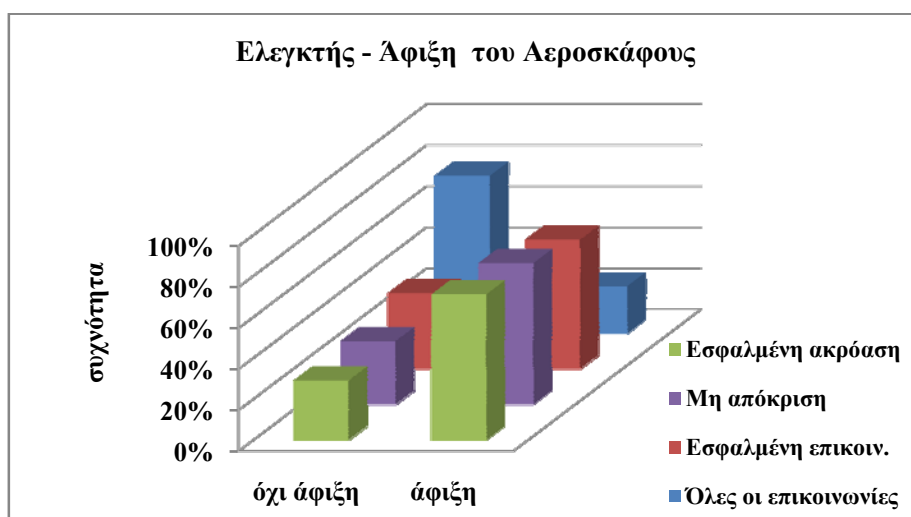
Διάγραμμα 3.8, Ελεγκτής - Διάρκεια Μηνύματος

### 3.5.5 Άφιξη του αεροσκάφους

Ενώ τα μηνύματα από αεροσκάφη που εισέρχονται στον τομέα και πραγματοποιούν την πρώτη τους επικοινωνία με τον πύργο ελέγχου αποτελούν το 22% των συνολικών μηνυμάτων (Διάγραμμα 3.10), όταν τα μηνύματα αποστέλλονται από το κέντρο ελέγχου προς το αεροσκάφος, το ποσοστό αυτό είναι σχεδόν μηδενικό (Διάγραμμα 3.9). Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός πως η άφιξη του αεροσκάφους λαμβάνεται υπόψη για το πρώτο μόνο μήνυμα, το οποίο σχεδόν πάντα αποστέλλεται από τον πιλότο προς το κέντρο ελέγχου. Επομένως η μεταβλητή ‘άφιξη του αεροσκάφους’ δύναται να προσφέρει πληροφορίες μόνο για τους ελεγκτές και όχι για τους πιλότους. Στα μηνύματα που λαμβάνουν οι ελεγκτές και καταλήγουν σε εσφαλμένες επικοινωνίες, το ποσοστό του 22% τριπλασιάζεται και ανέρχεται στο 71% και στο 69% για τις περιπτώσεις εσφαλμένης ακρόασης και μη απόκρισης αντίστοιχα. Η μεγάλη αυτή διαφορά καταδεικνύει πως οι ελεγκτές είναι πολύ επιρρεπείς σε λάθη όταν επικοινωνούν για πρώτη φορά με ένα αεροσκάφος, διότι όταν ένα αεροσκάφος εισέρχεται σε έναν τομέα, ανταλλάσσει με το κέντρο ελέγχου μηνύματα με αυξημένη πολυπλοκότητα και πολλές αριθμητικές πληροφορίες.

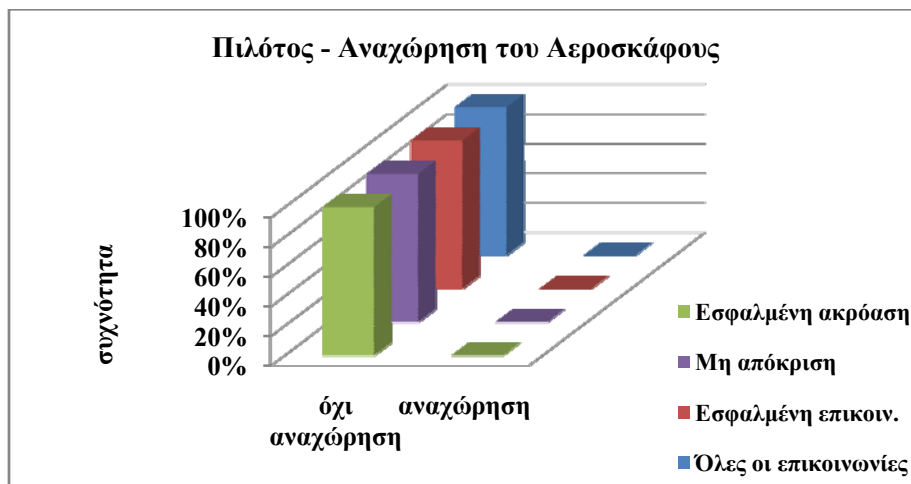


Διάγραμμα 3.9, Πιλότος - Άφιξη του Αεροσκάφους

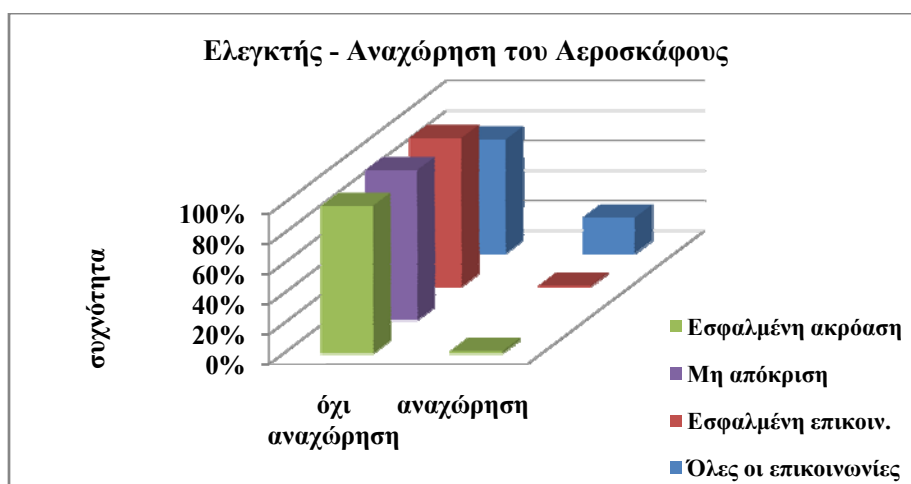


Διάγραμμα 3.10, Ελεγκτής - Άφιξη του Αεροσκάφους

### 3.5.6 Αναχώρηση του αεροσκάφους



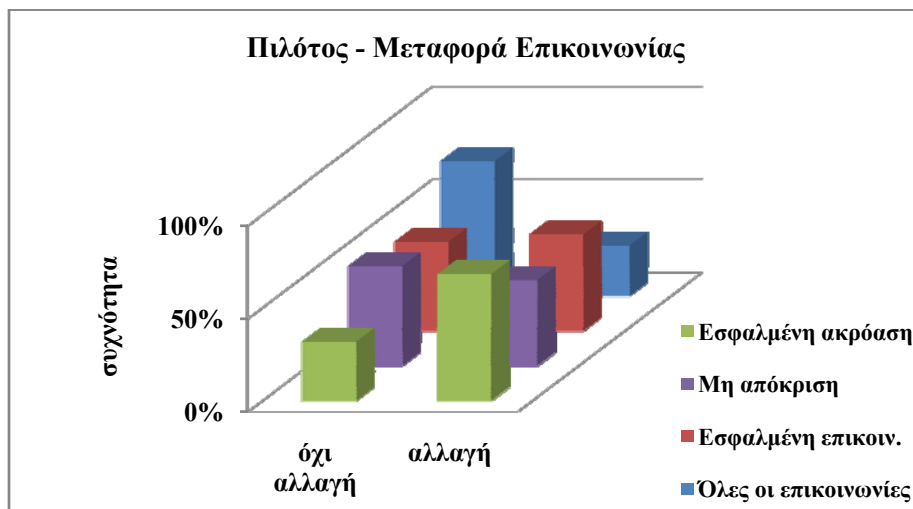
Διάγραμμα 3.11, Πιλότος - Αναχώρηση του Αεροσκάφους



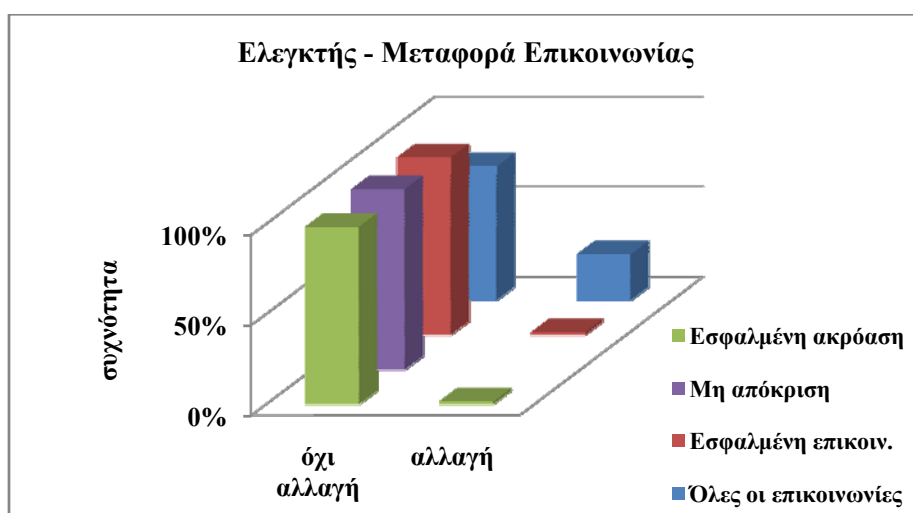
Διάγραμμα 3.12, Ελεγκτής - Αναχώρηση του Αεροσκάφους

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η μεταβλητή 'αναχώρηση του αεροσκάφους' έχει οριστεί να λαμβάνει την τιμή (1) μόνο για το τελευταίο μήνυμα που ανταλλάσσει το πλήρωμα του αεροσκάφους με το κέντρο ελέγχου. Από την ανάλυση των δεδομένων (Διαγράμματα 3.11, 3.12) δεν εμφανίζεται κανένα από τα μηνύματα αυτά ως εσφαλμένη επικοινωνία. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, διότι οι εσφαλμένες επικοινωνίες έχουν οριστεί στο μήνυμα που τις προκαλεί και όχι σε αυτό που τις καταδεικνύει. Επομένως τα σφάλματα επικοινωνίας που πραγματοποιούνται κατά την αναχώρηση ενός αεροσκάφους είτε έχουν οριστεί στο μήνυμα που προηγείται του τελευταίου και δεν διορθώνονται ποτέ, είτε έχουν οριστεί σε προγενέστερα μηνύματα και ενδεχομένως έχουν ήδη διορθωθεί.

## 3.5.7 Μεταφορά επικοινωνίας



Διάγραμμα 3.13, Πιλότος – Μεταφορά Επικοινωνίας

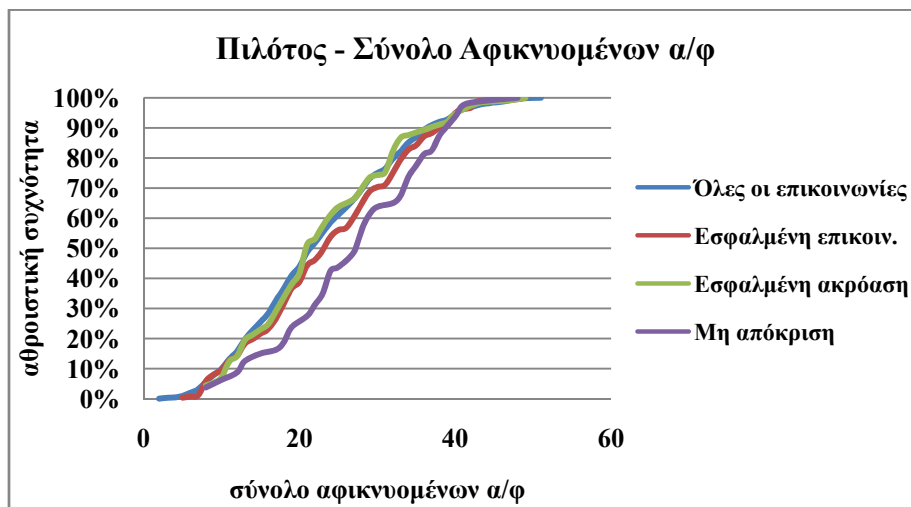


Διάγραμμα 3.14, Ελεγκτής – Μεταφορά Επικοινωνίας

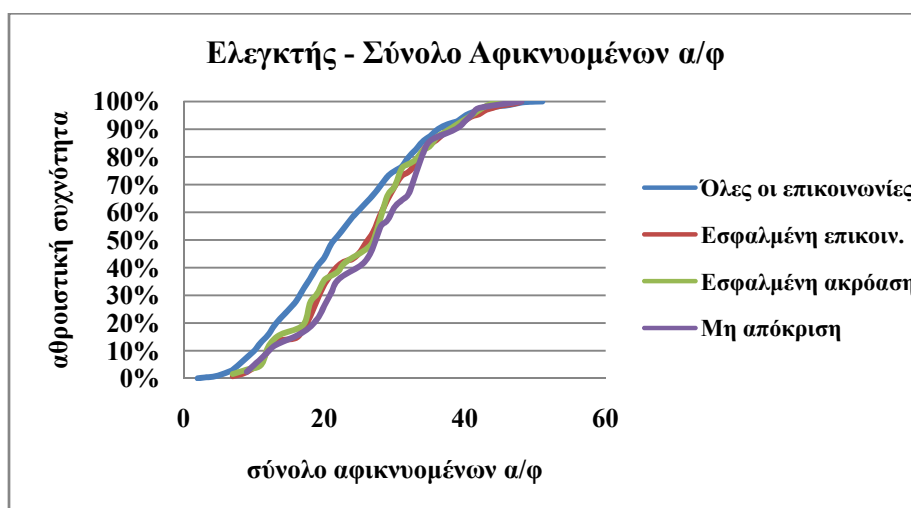
Περισσότερα από τα μισά μηνύματα που λαμβάνονται από πιλότους και καταλήγουν σε εσφαλμένες επικοινωνίες πραγματοποιούνται κατά την ενημέρωση του πληρώματος του αεροσκάφους για τη ραδιοσυχνότητα επικοινωνίας με τον επόμενο τομέα (Διάγραμμα 3.13). Το ποσοστό αυτό των εσφαλμένων επικοινωνιών είναι 52% και ανέρχεται στο 68% για τις εσφαλμένες ακροάσεις. Όταν ο τύπος σφάλματος είναι η μη απόκριση του πιλότου το αντίστοιχο ποσοστό είναι 46%. Το ποσοστό των εσφαλμένων επικοινωνιών που πραγματοποιούνται με υπαιτιότητα των ελεγκτών είναι σχεδόν μηδενικό (Διάγραμμα 3.14). Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν την αδυναμία των πιλότων να ακούσουν και να αφομοιώσουν σωστά όλα τα ψηφία του αριθμού της ραδιοσυχνότητας.



## 3.5.8 Σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών



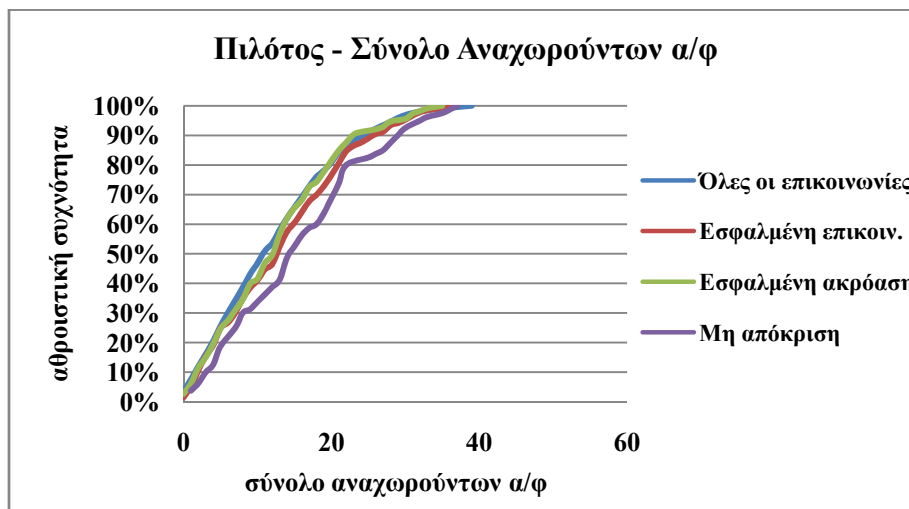
Διάγραμμα 3.15, Σύνολο Αφικνουμένων Αεροσκαφών



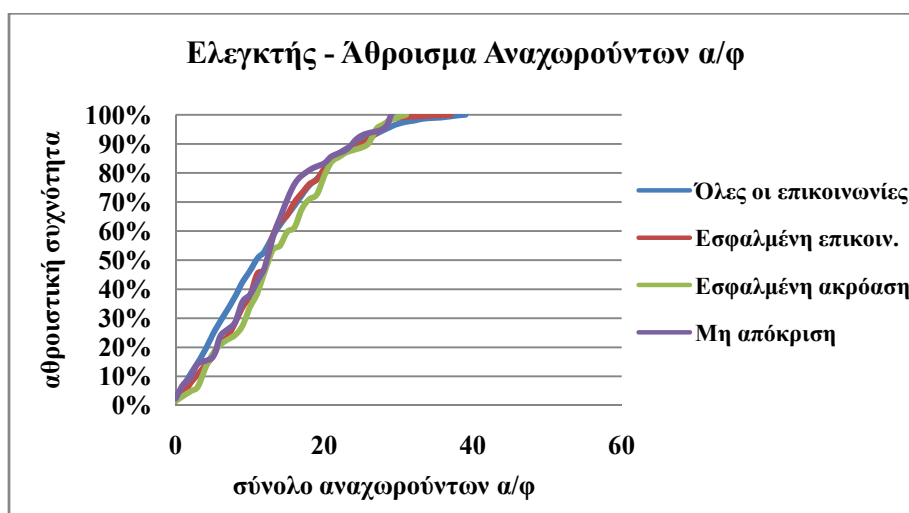
Διάγραμμα 3.16, Σύνολο Αφικνουμένων Αεροσκαφών

Το 'σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών' επιδρά στις μη αποκρίσεις των πιλότων, καθώς αύξηση του αριθμού των αεροσκαφών προκαλεί αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης ενός τέτοιου σφάλματος (Διάγραμμα 3.15). Πιθανή αιτία ενδέχεται να είναι η αύξηση του ποσοστού κατάληψης της ραδιοσυχνότητας επικοινωνίας, καθώς αυξάνει το μέγεθος της εναέριας κυκλοφορίας. Όσον αφορά τα μηνύματα με παραλήπτη ελεγκτή, η αύξηση του αριθμού των αφικνουμένων αεροσκαφών προκαλεί αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης τόσο των εσφαλμένων αποκρίσεων όσο και των μη αποκρίσεων (Διάγραμμα 3.16).

## 3.5.9 Σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών



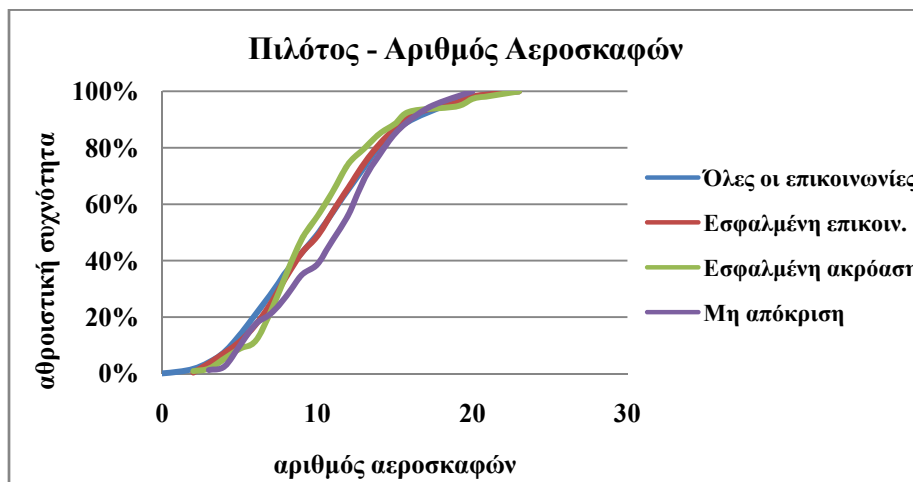
Διάγραμμα 3.17, Πιλότος - Σύνολο Αναχωρούντων αεροσκαφών



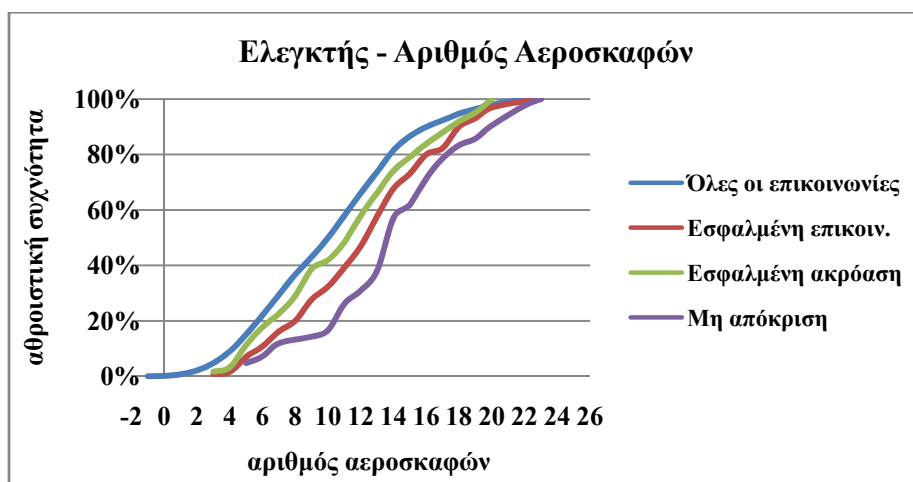
Διάγραμμα 3.18, Ελεγκτής - Σύνολο Αναχωρούντων αεροσκαφών

Η μεταβλητή ‘σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών’ παρουσιάζει μικρή επίδραση στις μη αποκρίσεις των μηνυμάτων που λαμβάνονται από τους πιλότους (Διάγραμμα 3.17). Η αύξηση της τιμής της συνεπάγεται αύξηση της πιθανότητας να μην αποκριθεί ο πιλότος, ενώ δεν εμφανίζεται καμία επιρροή στην πρόκληση των εσφαλμένων ακροάσεων. Οι ελεγκτές δεν φαίνεται να επηρεάζονται από την τιμή της μεταβλητής (Διάγραμμα 3.18).

## 3.5.10 Αριθμός αεροσκαφών



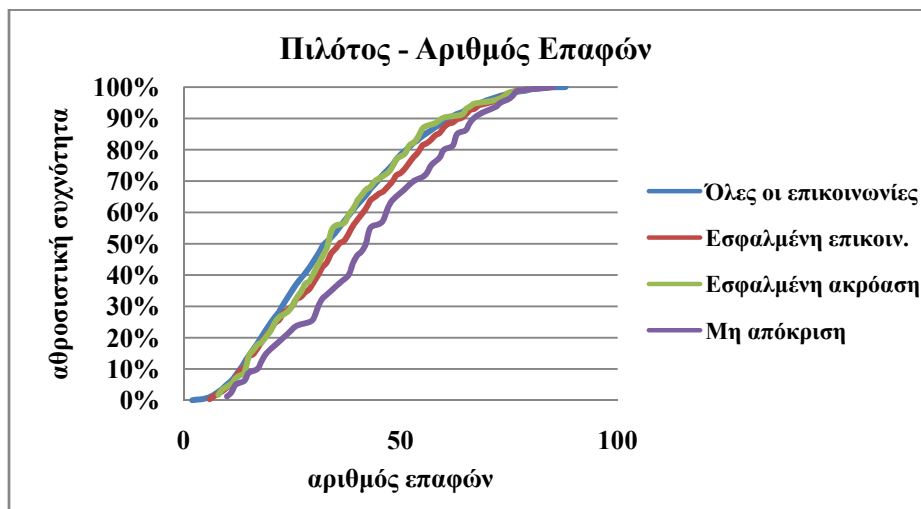
Διάγραμμα 3.19, Πιλότος - Αριθμός Αεροσκαφών



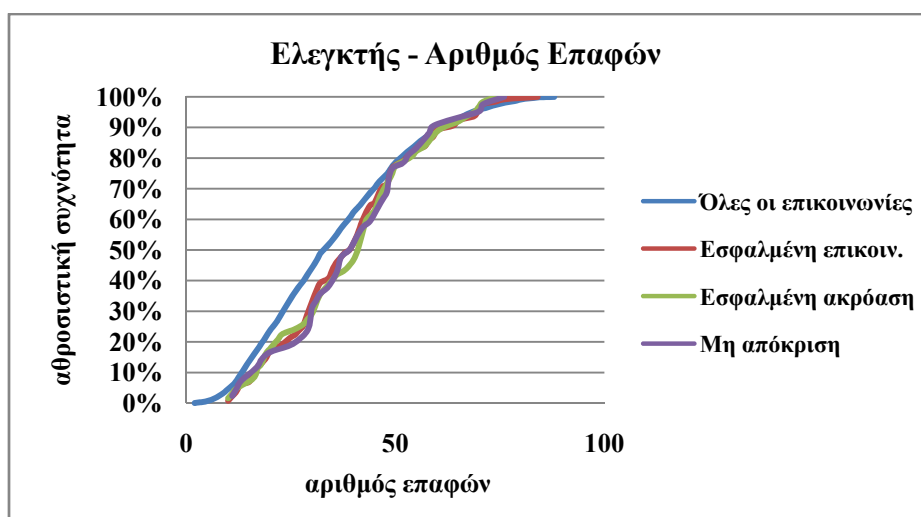
Διάγραμμα 3.20, Ελεγκτής - Αριθμός Αεροσκαφών

Η επίδραση του 'αριθμού των αεροσκαφών' στην πρόκληση λαθών από τους πιλότους είναι αμελητέα (Διάγραμμα 3.19). Αντίθετα, όταν οι παραλήπτες των μηνυμάτων είναι ελεγκτές, η επιρροή της μεταβλητής είναι μεγάλη και η αύξηση της τιμής της οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης εσφαλμένων επικοινωνιών (Διάγραμμα 3.20). Η πιο έντονη αύξηση εμφανίζεται στην περίπτωση των μη αποκρίσεων, διότι όσο περισσότερα αεροσκάφη έχει ένας ελεγκτής υπό τον έλεγχο του τόσο αυξάνει η νοητική του χρησιμοποίηση. Επίσης ο μεγαλύτερος αριθμός αεροσκαφών έχει ως συνέπεια την ύπαρξη περισσότερων ανοιχτών συνομιλιών, που, όπως έχει αναφερθεί, αποτελούν καθοριστικό παράγοντα πρόκλησης καθυστερημένων αποκρίσεων από τους ελεγκτές.

## 3.5.11 Αριθμός αρχικών και τελικών επαφών



Διάγραμμα 3.21, Πιλότος - Αριθμός Αρχικών και Τελικών Επαφών

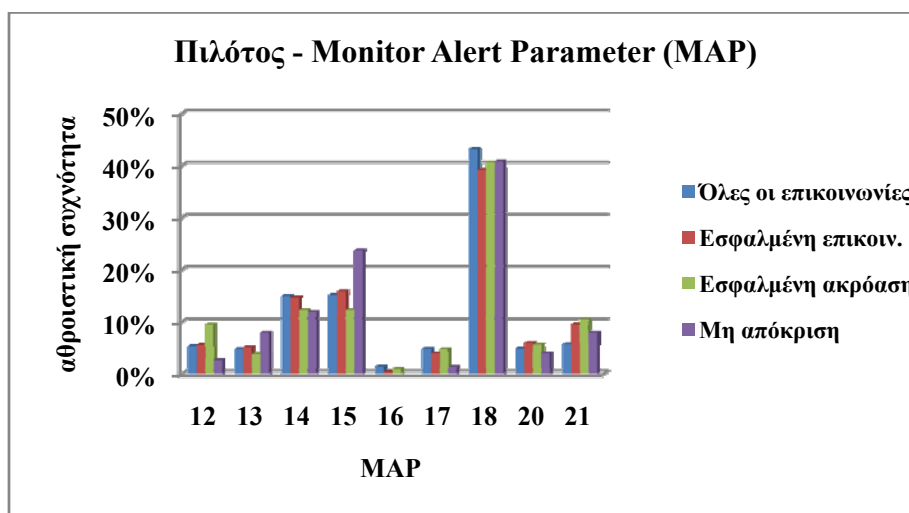


Διάγραμμα 3.22, Ελεγκτής - Αριθμός Αρχικών και Τελικών Επαφών

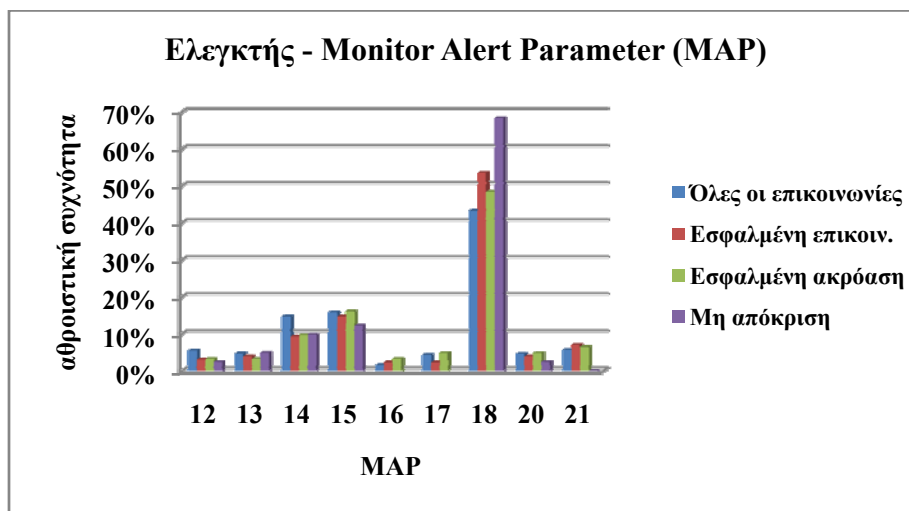
Ο 'αριθμός των αρχικών και τελικών επαφών' επηρεάζει τους πιλότους οδηγώντας σε αύξηση της πιθανότητας μη απόκρισης σε κάποιο μήνυμα, καθώς αυξάνει η τιμή της μεταβλητής (Διάγραμμα 3.21). Η αύξηση αυτή στον αριθμό των μη αποκρίσεων, ενδέχεται να οφείλεται στα υψηλά ποσοστά κατάληψης των συχνοτήτων ραδιοεπικοινωνίας λόγω αυξημένης εναέριας κυκλοφορίας. Στην περίπτωση αυτή, οι πιλότοι είτε αδυνατούν είτε επιλέγουν εσκεμμένα να μην αποκριθούν άμεσα σε κάποιο μήνυμα, για να μην επιβαρύνουν περαιτέρω τη συχνότητα. Στην περίπτωση όπου παραλήπτης του μηνύματος είναι ελεγκτής,

εμφανίζεται αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης εσφαλμένων επικοινωνιών για αύξηση της τιμής της μεταβλητής από το διάστημα μεταξύ 10 και 50 επαφών (Διάγραμμα 3.22).

### 3.5.12 Χωρητικότητα: monitor alert parameter (MAP)



Διάγραμμα 3.23, Πιλότος - Monitor Alert Parameter (MAP)

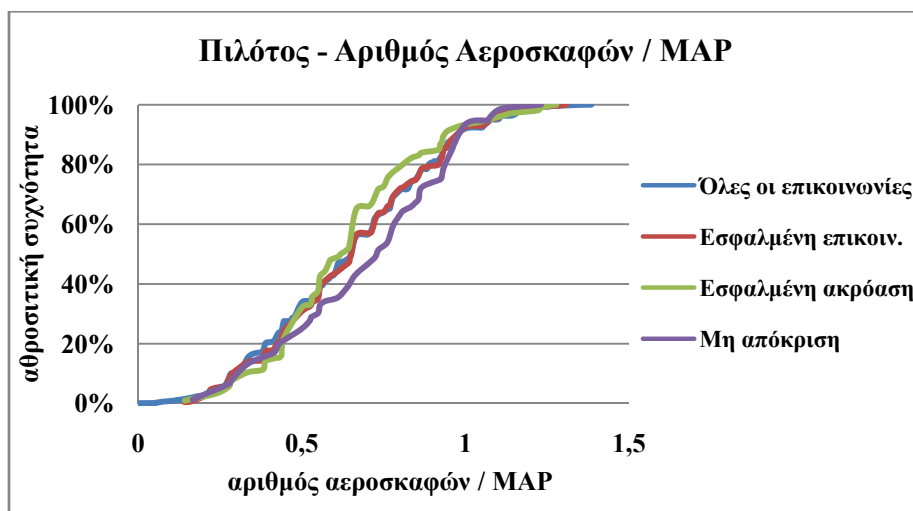


Διάγραμμα 3.24, Ελεγκτής - Monitor Alert Parameter (MAP)

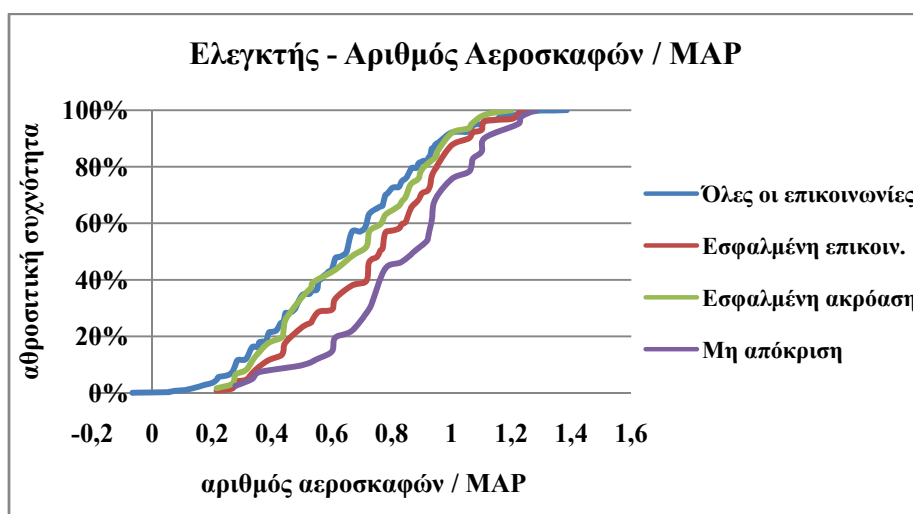
Στα διαγράμματα 3.23 και 3.24 παρατηρούμε πως όλες οι επικοινωνίες ακολουθούν την ίδια σχεδόν κατανομή ως προς τη χωρητικότητα του τομέα ανεξαρτήτως της τελικής τους έκβασης. Αποκλίσεις υπάρχουν, αλλά είναι περισσότερο τυχαίες και δεν παρουσιάζονται συγκεκριμένες τάσεις. Για το λόγο αυτό

συμπεραίνουμε πως στους τομείς που εξετάστηκαν δεν υπήρξε κάποια συσχέτιση της χωρητικότητάς τους με τις εσφαλμένες επικοινωνίες.

### 3.5.13 Αριθμός αεροσκαφών προς MAP



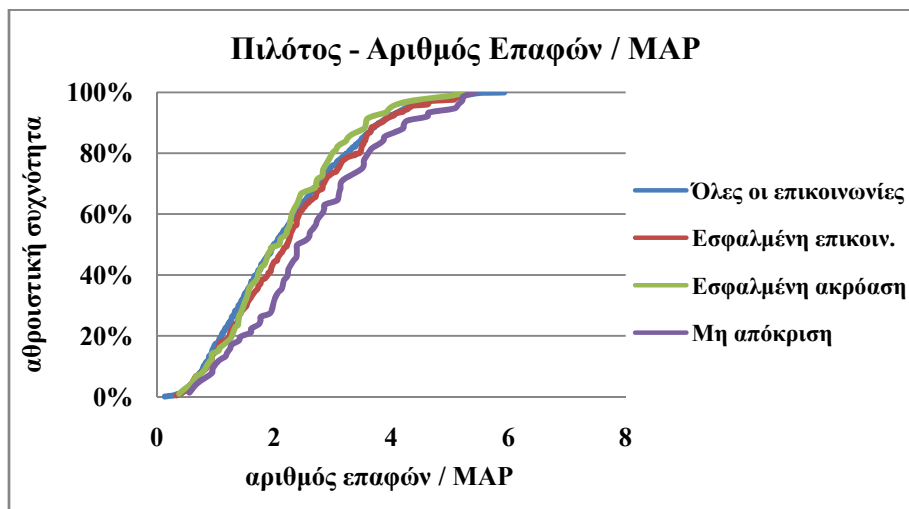
Διάγραμμα 3.25, Πιλότος - Αριθμός Αεροσκαφών / MAP



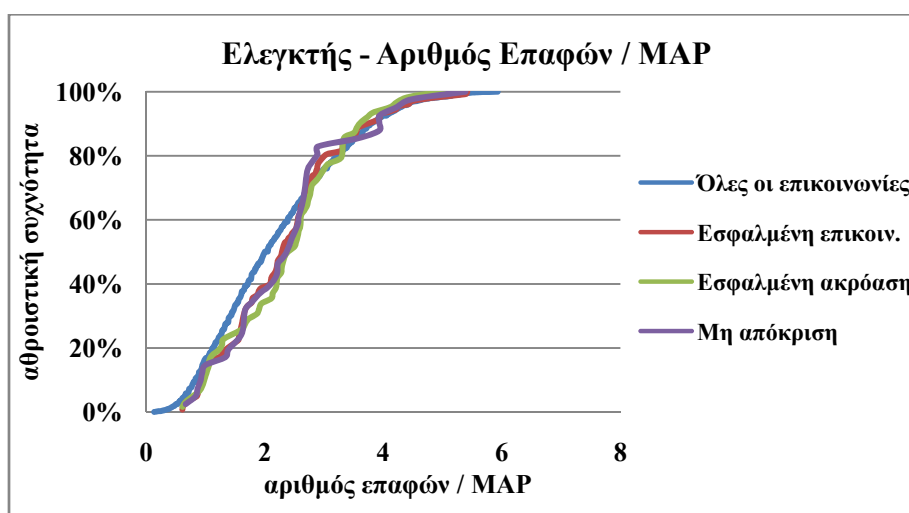
Διάγραμμα 3.26, Ελεγκτής - Αριθμός Αεροσκαφών / MAP

Τα διαγράμματα για τη μεταβλητή 'αριθμός αεροσκαφών προς χωρητικότητα' (Διαγράμματα 3.25 και 3.26) είναι ανάλογα των διαγραμμάτων του 'αριθμού αεροσκαφών' (Διαγράμματα 3.19 και 3.20). Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η χωρητικότητα του τομέα δεν επιδρά στην έκβαση των επικοινωνιών, επομένως τα συμπεράσματα για τον αριθμό των αεροσκαφών επεκτείνονται και στην παράγωγο μεταβλητή του.

## 3.5.14 Αριθμός αρχικών και τελικών επαφών προς MAP



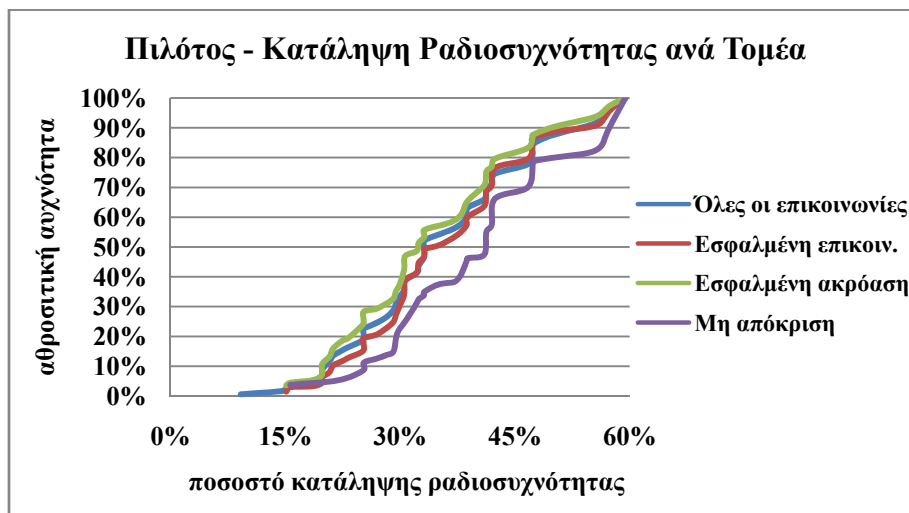
Διάγραμμα 3.27, Πιλότος - Αριθμός Επαφών / MAP



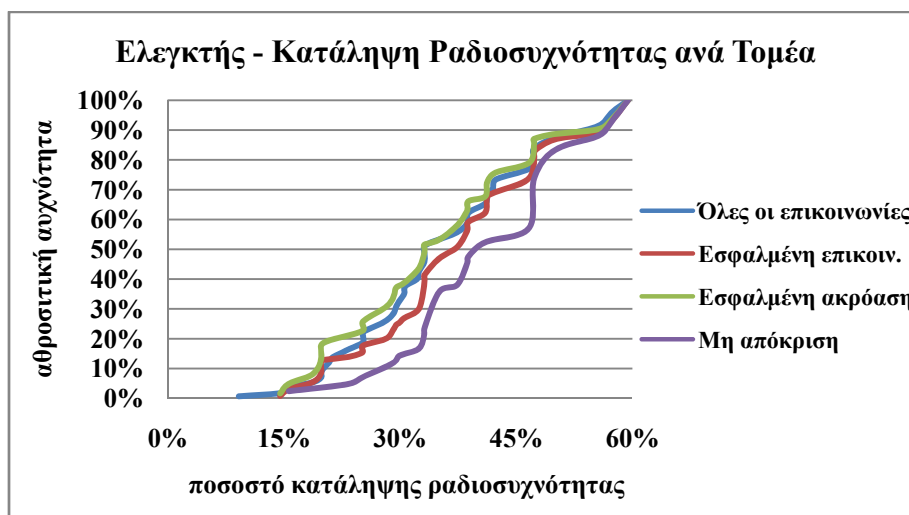
Διάγραμμα 3.28, Ελεγκτής - Αριθμός Επαφών / MAP

Όπως και προηγουμένως, τα συμπεράσματα για τον 'αριθμό αρχικών και τελικών επαφών' επεκτείνονται και στην παράγωγο μεταβλητή 'αριθμός αρχικών και τελικών επαφών προς MAP' (Διαγράμματα 3.27 και 3.28).

### 3.5.15 Κατάληψη ραδιοσυχνότητας ανά τομέα



Διάγραμμα 3.29, Πιλότος - Κατάληψη Ραδιοσυχνότητας ανά Τομέα

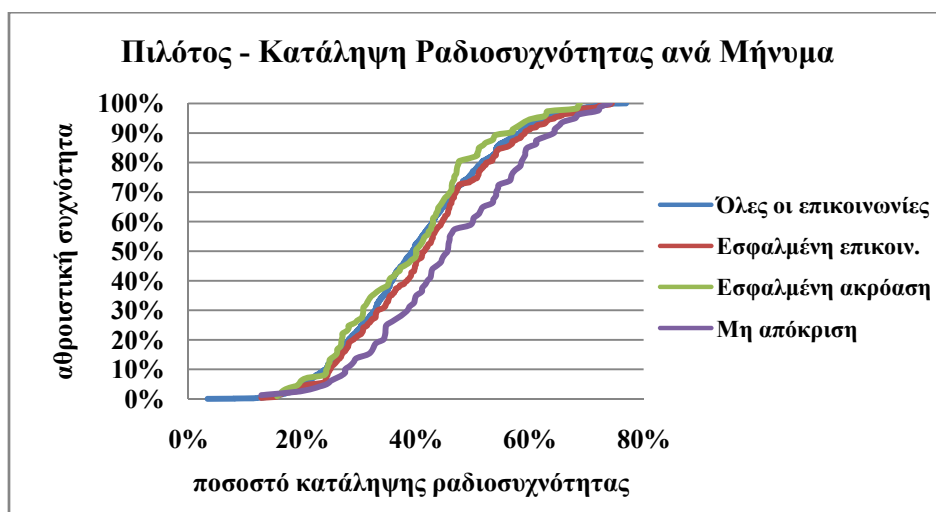


Διάγραμμα 3.30, Ελεγκτής - Κατάληψη Ραδιοσυχνότητας ανά Τομέα

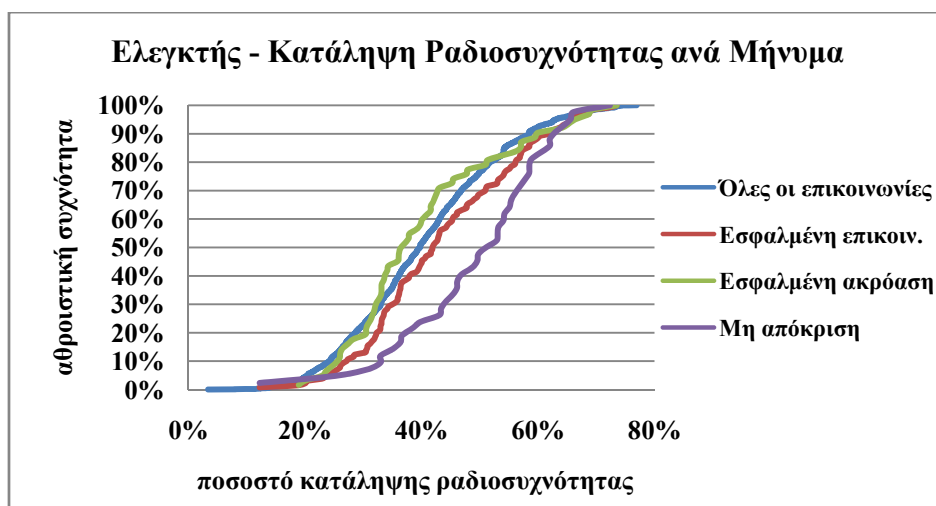
Οι καμπύλες αθροιστικών συχνοτήτων του 'ποσοστού κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα' (Διαγράμματα 3.29 και 3.30) είναι παρόμοιες για τους ελεγκτές και τους πιλότους. Οι εσφαλμένες ακροάσεις ακολουθούν την καμπύλη του συνόλου των επικοινωνιών και δεν επηρεάζονται καθόλου από την τιμή της μεταβλητής. Αντίθετα αύξηση της τιμής του ποσοστού κατάληψης της ραδιοσυχνότητας σε έναν τομέα συνεπάγεται αύξηση της πιθανότητας να μην αποκριθούν οι παραλήπτες των μηνυμάτων.



### 3.5.16 Κατάληψη ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα



Διάγραμμα 3.31, Πιλότος – Κατάληψη Ραδιοσυχνότητας ανά Μήνυμα



Διάγραμμα 3.32, Ελεγκτής - Κατάληψη Ραδιοσυχνότητας ανά Μήνυμα

Στα διαγράμματα 3.31 και 3.32 παρατηρούμε ότι αύξηση του ποσοστού κατάληψης της ραδιοσυχνότητας σε περίοδο τεσσάρων λεπτών πριν και δύο λεπτών μετά την αποστολή ενός μηνύματος προκαλεί αύξηση της πιθανότητας να μην αποκριθούν οι ελεγκτές και οι πιλότοι στο μήνυμα αυτό. Η μεγαλύτερη επίδραση εμφανίζεται στους ελεγκτές. Τα αποτελέσματα αυτά ταυτίζονται με εκείνα των μεταβλητών ‘αριθμός ανοιχτών συνομιλιών’ και ‘ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα’. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, το αυξημένο ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας συνεπάγεται υψηλό φόρτο εργασίας για τους ελεγκτές, με αποτέλεσμα να μην προλαβαίνουν να αποκριθούν σε όλα τα

μηνύματα. Επίσης οι πιλότοι δεν αποκρίνονται έγκαιρα, πιθανότητα για να μη διακόψουν άλλες ανοιχτές συνομιλίες. Τέλος, οι εσφαλμένες ακροάσεις φαίνεται πως δεν επηρεάζονται.

## 4 ΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ (Logistic Regression)

### 4.1 Περιγραφή της μεθόδου

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, η επίδραση των μεταβλητών εξετάζεται βάσει εννέα μοντέλων που συνιστούν δύο διαφορετικές ομάδες. Για κάθε μοντέλο έχουν ήδη υπολογιστεί ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση όλων των μεταβλητών και έχουν γίνει έλεγχοι της διαφοράς του μέσου στα διάφορα ζεύγη πληθυσμών και του βαθμού συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών. Τα γραφήματα κατανομής συχνοτήτων των μεταβλητών, που κατασκευάστηκαν και αναλύθηκαν, παρουσιάζουν το είδος της επίδρασης τους στο σύστημα επικοινωνίας, αλλά δεν επαρκούν για τον υπολογισμό του μεγέθους της επίδρασης αυτής και της στατιστικής αξιοπιστίας των συμπερασμάτων. Για τον σκοπό αυτό κάθε μοντέλο θα αναλυθεί στατιστικά με τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης.

Η Λογιστική Παλινδρόμηση είναι μια τεχνική ανάλυσης προβλημάτων, όπου μία ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές καθορίζουν το αποτέλεσμα το οποίο έχει μόνο δύο πιθανά εναλλακτικά ενδεχόμενα: (1), (0). Εκείνο που προκύπτει από τη λογιστική παλινδρόμηση δεν είναι μία ακριβής αριθμητική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής, αλλά η πιθανότητα το ενδεχόμενο που εξάγεται να δηλώνει το ένα γεγονός ή το εναλλακτικό του. Επομένως, απαιτείται η κατηγοριοποίηση των εξαρτημένων μεταβλητών σε ζεύγη τιμών (0, 1).

Στη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης η εξαρτημένη μεταβλητή  $y$  εκφράζεται από τον φυσικό λογάριθμο του λόγου της πιθανότητας  $P_i$  να συμβεί το ένα γεγονός προς την πιθανότητα  $(1-P_i)$ , να συμβεί το εναλλακτικό του και μαθηματικά αποδίδεται από τον εξής τύπο:

$$y = \log\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = a + b_i \cdot x_i$$

Όπου  $a$  σταθερά (constant) και  $b_i$  οι συντελεστές (coefficient estimate) των ανεξάρτητων μεταβλητών  $x_i$ , όπου  $i = 1, \dots, n$  το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών. Επισημαίνεται ότι, ενώ η πιθανότητα  $P$  παίρνει τιμές από 0 έως 1, ο φυσικός λογάριθμος  $\log(P/(1 - P))$  κυμαίνεται μεταξύ μείον άπειρο και συν άπειρο.

Με απλό μετασχηματισμό της παραπάνω σχέσης προκύπτει:

$$\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = e^{a+b_i \cdot x_i} = e^a \cdot e^{b_i \cdot x_i}$$

Όταν η τιμή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής  $x_i$ , αυξάνεται κατά μία μονάδα, ενώ όλες οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές, τότε ο νέος λόγος πιθανοτήτων  $[P_i/(1 - P_i)]^*$  προκύπτει ως εξής:

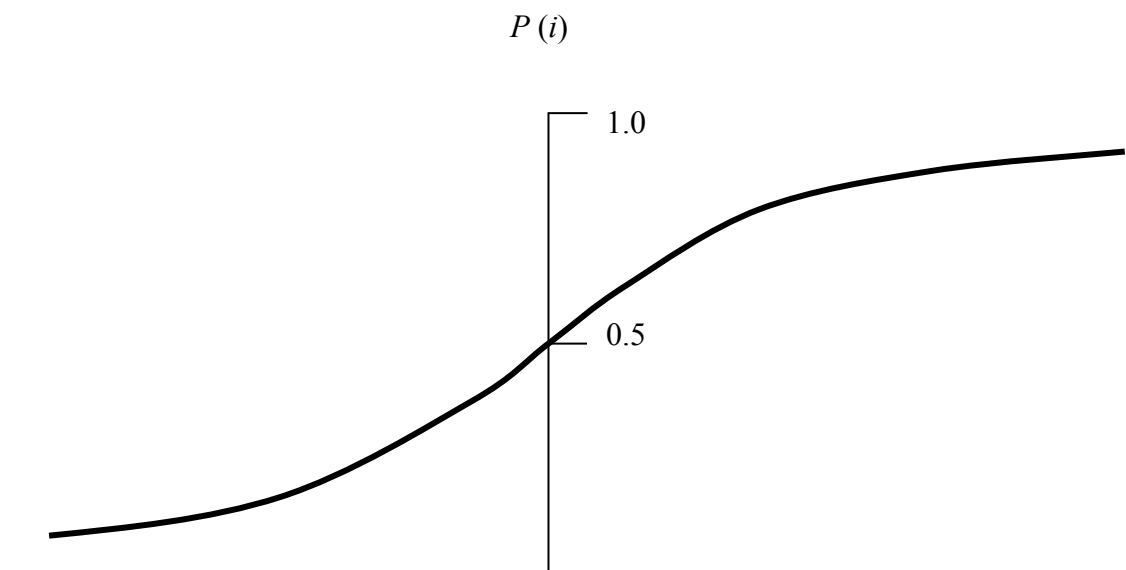
$$\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right)^* = e^{a+b_i \cdot (x_i+1)} = e^a \cdot e^{b_i \cdot x_i} \cdot e^{b_i} = \left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) \cdot e^{b_i}$$

Δηλαδή όταν η τιμή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής  $x_i$  αυξάνεται κατά μία μονάδα, ενώ όλες οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές, ο νέος λόγος των πιθανοτήτων  $[P_i/(1 - P_i)]^*$  είναι ίσος με τον προηγούμενο λόγο πιθανοτήτων  $P_i/(1 - P_i)$  πολλαπλασιασμένο με τον όρο  $e^{b_i}$  ή  $\exp(b_i)$ . Ο παράγοντας  $e^{b_i}$  ονομάζεται λόγος πιθανοτήτων (odds ratio, OR) και λαμβάνει τιμές από μηδέν έως άπειρο.

Με τη θεώρηση ότι  $P_i$  είναι η πιθανότητα να συμβεί το γεγονός (1), ενώ  $1 - P_i$  είναι η πιθανότητα να συμβεί το γεγονός (0), από τη σχέση:

$$\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right)^* = \left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) \cdot e^{b_i}$$

προκύπτει ότι όταν το OR είναι μεγαλύτερο της μονάδας είναι περισσότερο πιθανό να συμβεί το γεγονός (1), ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι περισσότερο πιθανό να συμβεί το γεγονός (0).



**Σχήμα 4.1**, Συνάρτηση Κατανομής Πιθανότητας Λογιστικής Κατανομής

$$\beta_1 X_{1n} - \beta_2 X_{2n}$$

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται γραφικά η καμπύλη του λογιστικού μοντέλου το οποίο έχει δύο ασύμπτωτα σημεία, ένα ελάχιστο στην τιμή 0 και ένα μέγιστο στην τιμή 1. Έτσι, οι εκτιμούμενες πιθανότητες του μοντέλου της λογιστικής παλινδρόμησης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1, το οποίο αποτελεί ένα ρεαλιστικό επίπεδο κατανομών. Αυτή η συμπεριφορά του λογιστικού μοντέλου αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι άλλων στατιστικών μεθόδων παλινδρόμησης όπως η γραμμική παλινδρόμηση στην οποία οι εκτιμήσεις μπορεί να κυμαίνονται έξω από το εύρος 0-1. Η μεγαλύτερη κλίση της κατανομής παρουσιάζεται στο σημείο  $P = 1/2$ . Αυτό συνεπάγεται ότι οι μεταβολές στις ανεξάρτητες μεταβλητές μέσω της κατανομής, θα έχουν μεγαλύτερη επιρροή στην πιθανότητα επιλογής μιας εναλλακτικής λύσης.

Για τον καθορισμό των μεταβλητών, που είναι στατιστικά σημαντικές, χρησιμοποιείται ο δείκτης t-value (συντελεστής  $\beta$ /standard error) που αντικατοπτρίζει το επίπεδο στο οποίο η μεταβολή του συστηματικού σφάλματος είναι στατιστικώς σημαντική. Η οριακή τιμή του t-value ( $t^*$ ) για τα διάφορα επίπεδα σημαντικότητας  $\alpha$  είναι η τιμή πέρα από την οποία κρίνεται απορριπτέα η μηδενική υπόθεση  $H_0$ . Αν  $t\text{-value} > t^*$ , η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και το αποτέλεσμα του ελέγχου κρίνεται σημαντικό. Η τιμή του t-value είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, διότι συμβάλλει στο να εξαχθούν συμπεράσματα για το αν η επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη μεταβλητή είναι στατιστικώς σημαντική ή όχι. Στα λογιστικά μοντέλα παλινδρόμησης, που παρουσιάζονται στη συνέχεια, ως κρίσιμη τιμή του t-value ( $t^*$ ) επιλέγεται το 1,645 για διάστημα εμπιστοσύνης 90%.

Η ανάπτυξη των μοντέλων της λογιστική παλινδρόμησης έγινε με τη χρήση του στατιστικού προγράμματος LIMDEP.

## 4.2 Ανάλυση των μοντέλων

### 4.2.1 Μοντέλο A1

**Πίνακας 4.1**, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο A1

Μοντέλο A1: Επιτυχής επικοινωνία (0) – Εσφαλμένη επικοινωνία (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σταθερά	-4,490	-0,134	-19,420	0,000
Ανοιχτές συνομιλίες	0,412	0,012	3,595	0,000
Διάρκεια	0,073	0,002	2,550	0,011
Άφιξη	0,981	0,043	6,906	0,000
Αναχώρηση	-4,729	-0,053	-4,701	0,000
Μεταφορά επικοινωνίας	1,265	0,052	10,114	0,000
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	1,205	0,036	2,897	0,004
διορθωμένο $\rho^2$	0,078			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	7190	0	100%	
1	382	0	0%	
Συνολικό ποσοστό			95%	

**Πίνακας 4.2**, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης

Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Αριθμός αεροσκαφών	0,025	0,001	2,117	0,034
Σύνολο αφιγκυομένων α/φ	0,012	0,000	2,216	0,027
Αριθμός α/φ / MAP	0,407	0,012	1,989	0,047

Όπως προκύπτει από το βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης (Πίνακας 4.1) οι μεταβλητές που επηρεάζουν την έκβαση μιας συνομιλίας και την καθιστούν ανεπιτυχή, ανεξαρτήτως του παραλήπτη και του τύπου σφάλματος είναι ο ‘αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών’, η ‘διάρκεια του μηνύματος’, η ‘άφιξη’ και η ‘αναχώρηση του αεροσκάφους’, η ‘μεταφορά της επικοινωνίας’ και η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’. Μάλιστα, όλες οι μεταβλητές είναι στατιστικά σημαντικές για διάστημα εμπιστοσύνης μεγαλύτερο του 99%. Αύξηση της τιμής τους προκαλεί αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης εσφαλμένων επικοινωνιών. Εξαιρέση αποτελεί η ‘αναχώρηση αεροσκάφους’, διότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν έχει οριστεί καμία εσφαλμένη επικοινωνία στο τελευταίο μήνυμα που αποστέλλεται προτού αναχωρήσει ένα αεροσκάφος από τον τομέα. Η πιο έντονη επιρροή

εμφανίζεται για τη ‘μεταφορά επικοινωνίας’, την ‘άφιξη’ και την ‘αναχώρηση αεροσκάφους’. Παρόλ’ αυτά η επίδραση όλων των μεταβλητών είναι πολύ μικρή και οι προβλέψεις για τις εσφαλμένες επικοινωνίες είναι απολύτως λανθασμένες.

Από τα υπόλοιπα μοντέλα λογιστικής παλινδρόμησης (Πίνακας 4.2), ως στατιστικά σημαντικές μεταβλητές προέκυψαν ο ‘αριθμός των αεροσκαφών’, το ‘σύνολο αφικνυόμενων αεροσκαφών’ και ο ‘αριθμός των αεροσκαφών προς MAP’. Αύξηση της τιμής τους συνδέεται με αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης εσφαλμένων επικοινωνιών.

#### 4.2.2 Μοντέλο A2

**Πίνακας 4.3,** Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο A2

Μοντέλο A2: Μη απόκριση (0) – Εσφαλμένη ακρόαση (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σταθερά	2,807	0,675	5,455	0,000
Ανοιχτές συνομιλίες	-0,515	-0,124	-1,968	0,049
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	-4,171	-1,003	-4,209	0,000
διορθωμένο ρ <sup>2</sup>	0,056			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	54	63	46%	
1	29	139	83%	
Συνολικό ποσοστό			68%	

**Πίνακας 4.4,** Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης

Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Μεταφορά επικοινωνίας	0,661	0,156	2,498	0,012
Αριθμός επαφών	-0,012	-0,003	-1,686	0,092
Αριθμός α/φ / MAP	-1,300	-0,313	-2,536	0,011
Αριθμός επαφών / MAP	-0,282	-0,068	-2,456	0,014
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	-0,026	-0,006	-1,762	0,078
Αριθμός αεροσκαφών	-0,058	-0,014	-1,986	0,047
Κατάληψη ρ/σ τομέα	-3,958	-0,952	-3,677	0,000

Όταν συγκρίνονται οι εσφαλμένες ακρόασεις με τις μη αποκρίσεις χωρίς να υπάρχει διαχωρισμός των μηνυμάτων με βάση τον παραλήπτη τους, οι μεταβλητές

που αποτελούν το βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης είναι ο 'αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών' και η 'κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα' (Πίνακας 4.3). Αύξηση της τιμής τους προκαλεί αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης μη αποκρίσεων έναντι των εσφαλμένων ακροάσεων. Το ίδιο ισχύει και για τις μεταβλητές των υπολοίπων μοντέλων (Πίνακας 4.4), οι οποίες είναι 'η μεταφορά της επικοινωνίας', 'ο αριθμός των αρχικών και τελικών επαφών', 'ο αριθμός των αεροσκαφών προς MAP', 'ο αριθμός των επαφών προς MAP', 'το σύνολο των αναχωρούντων αεροσκαφών', 'ο αριθμός των αεροσκαφών' και 'η κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα'. Το ποσοστό σωστών προβλέψεων για τις εσφαλμένες ακροάσεις είναι πολύ υψηλό (83%) σε αντίθεση με το ποσοστό για τις μη αποκρίσεις που είναι μόλις 46%. Παρατηρούμε λοιπόν πως παρόλο που ο αριθμός των μηνυμάτων που συγκρίνονται είναι σχεδόν ίδιος, η αποτελεσματικότητα του μοντέλου πρόβλεψης είναι μικρή.

#### 4.2.3 Μοντέλο A3

**Πίνακας 4.5**, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο A3

Μοντέλο A3: Ελεγκτής (0) - Πιλότος (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σταθερά	3,248	0,007	3,192	0,001
Αφιξη	-33,260	-0,927	0,000	1,000
Μεταφορά επικοινωνίας	4,404	0,024	3,768	0,000
Σύνολο αφιγκυομένων α/φ	-0,109	0,000	-2,748	0,006
διορθωμένο $\rho^2$	0,666			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	51	11	82%	
1	4	102	96%	
Συνολικό ποσοστό			91%	

**Πίνακας 4.6**, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης

Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Κατάληψη $\rho/\sigma$ μηνύματος	3,478	0,470	1,909	0,056
Αριθμός επαφών	-0,047	-0,006	-3,015	0,003



Όταν οι εσφαλμένες ακροάσεις διακρίνονται ως προς τον παραλήπτη που δεν ακούει σωστά το μήνυμα, οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές του βέλτιστου μοντέλου (Πίνακας 4.5) είναι η ‘άφιξη αεροσκάφους’, η ‘μεταφορά επικοινωνίας’ και το ‘σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών’. Η άφιξη του αεροσκάφους συνεπάγεται σημαντική αύξηση της πιθανότητας, υπαίτιος για την εσφαλμένη ακρόαση του μηνύματος να είναι ο ελεγκτής, ενώ αύξηση των υπολοίπων δύο μεταβλητών αυξάνει την πιθανότητα ο υπεύθυνος για το σφάλμα να είναι ο πιλότος.

Από τα υπόλοιπα μοντέλα (Πίνακας 4.6) ως στατιστικά σημαντικές προκύπτουν οι μεταβλητές ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’ και ο ‘αριθμός των αρχικών και τελικών επαφών’. Αύξηση της τιμής της πρώτης μεταβλητής οδηγεί σε έντονη αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης των μη αποκρίσεων με υπαιτιότητα των πιλότων ενώ για τη δεύτερη ισχύει το αντίστροφο.

Η ικανότητα του μοντέλου να παρέχει σωστές προβλέψεις είναι εξαιρετική με συνολικό ποσοστό επιτυχίας 91%. Το ποσοστό σωστών προβλέψεων για τους ελεγκτές είναι 82% και για τους πιλότους 96%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την άφιξη του αεροσκάφους υπεύθυνοι για τις εσφαλμένες επικοινωνίες είναι αποκλειστικά οι ελεγκτές, ενώ κατά τη φάση μεταφοράς της επικοινωνίας υπεύθυνοι είναι στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων οι πιλότοι. Επομένως, η συμμετοχή αυτών των δύο μεταβλητών στο τελικό μοντέλο είναι καθοριστική για τα παραπάνω ποσοστά επιτυχίας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί η εξής παρατήρηση. Στη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης, αρκετά σημαντικές μεταβλητές (κυρίως δυαδικές) εμφανίζουν συχνά υπερβολικά μεγάλο τυπικό σφάλμα με αποτέλεσμα η τιμή του στατιστικού ελέγχου  $t$  να τείνει στο μηδέν (Menard, 2002). Αυτό οδηγεί στον εσφαλμένο χαρακτηρισμό των μεταβλητών αυτών ως μη σημαντικές ανεξαρτήτως διαστήματος εμπιστοσύνης. Στις περιπτώσεις αυτές, η συμβολή των μεταβλητών στα μοντέλα προτείνεται να αξιολογείται με βάση τον έλεγχο του λόγου των πιθανοτήτων (likelihood ratio test) (Agresti, 1996). Για το λόγο αυτό, παρόλο που η μεταβλητή ‘άφιξη αεροσκάφους’ έχει τιμή  $t$ -value ίση με μηδέν, κρίνεται απολύτως απαραίτητη στη συμμετοχή του τελικού μοντέλου σύμφωνα με τον έλεγχο του λόγου πιθανοτήτων αλλά και με βάση τα ποσοστά των προβλέψεων.

## 4.2.4 Μοντέλο A4

Πίνακας 4.7, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο A4

Μοντέλο A4: Ελεγκτής (0) - Πιλότος (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σταθερά	-0,080	-0,004	-0,056	0,956
Πολυπλοκότητα	1,085	0,059	1,708	0,088
Άφιξη	-34,213	-1,000	0,000	1,000
Μεταφορά επικοινωνίας	30,755	0,999	0,000	1,000
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	-0,478	-0,026	-2,026	0,043
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	0,542	0,029	2,213	0,027
Αριθμός α/φ / MAP	6,835	0,369	1,590	0,112
διορθωμένο $\rho^2$	0,578			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	30	11	73%	
1	4	72	95%	
Συνολικό ποσοστό			87%	

Το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης που παρουσιάζεται στον πίνακα 4.7, καταδεικνύει ως στατιστικά σημαντικές μεταβλητές στη σύγκριση μεταξύ των δύο παραληπτών που ευθύνονται για τη μη απόκριση σε ένα μήνυμα την 'πολυπλοκότητα του μηνύματος', την 'άφιξη αεροσκάφους', τη 'μεταφορά επικοινωνίας', το 'σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών', το 'σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών' και τον 'αριθμό των αεροσκαφών προς MAP'. Αύξηση της τιμής των μεταβλητών οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας να μην αποκρίνεται ο πιλότος έναντι του ελεγκτή. Εξαίρεση αποτελούν η 'άφιξη του αεροσκάφους' και το 'σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών'.

Τα ποσοστά των σωστών προβλέψεων βρίσκονται σε πολύ υψηλά επίπεδα, εξαιτίας της συμμετοχής των μεταβλητών 'άφιξη αεροσκάφους' και 'μεταφορά επικοινωνίας', όπως και στο Μοντέλο A3, παρά το γεγονός ότι έχουν τιμές t-value ίσες με μηδέν. Το συνολικό ποσοστό επιτυχίας είναι 87% και τα επιμέρους ποσοστά είναι 73% για τους ελεγκτές και 95% για τους πιλότους.

#### 4.2.5 Μοντέλο B1

Οι μεταβλητές των οποίων οι τιμές εμφανίζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές, όταν τα μηνύματα διακρίνονται ως προς το παραλήπτη τους (Πίνακας 4.8), είναι η ‘πολυπλοκότητα του μηνύματος’, η διάρκεια του μηνύματος’, η ‘άφιξη αεροσκάφους’, ‘η αναχώρηση αεροσκάφους’, ‘η μεταφορά επικοινωνίας’, το ‘σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών’ και η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η μεταβλητή ‘άφιξη’ λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα για το πρώτο μήνυμα που ανταλλάζει ένα αεροσκάφος με το κέντρο ελέγχου, αφού αφιχθεί στον τομέα και αντίστοιχα η μεταβλητή ‘αναχώρηση’ για το τελευταίο μήνυμα που λαμβάνεται προτού το αεροσκάφος αναχωρήσει. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, όμως, τόσο το πρώτο όσο και το τελευταίο μήνυμα αποστέλλονται από το αεροσκάφος προς το κέντρο ελέγχου. Επομένως, όταν μία εκ των δύο μεταβλητών λαμβάνει τιμή ίση με ένα, η πιθανότητα ο παραλήπτης του μηνύματος να είναι ελεγκτής αυξάνει σε σημαντικό βαθμό.

Αντίθετα, η αύξηση της πολυπλοκότητας και της διάρκειας του μηνύματος αυξάνει την πιθανότητα ο παραλήπτης του μηνύματος να είναι ο πιλότος, διότι αυτοί είναι οι αποδέκτες των μακρών μηνυμάτων που περιέχουν εντολές πορείας και την ραδιοσυχνότητα επικοινωνίας του τομέα που ακολουθεί. Παρόλου που τα μηνύματα αυτά θα έπρεπε να επαναλαμβάνονται ολόκληρα, έτσι ώστε και οι δύο πλευρές να λαμβάνουν μηνύματα ίδιου περιεχομένου και ίσης χρονικής διάρκειας, στην πλειοψηφία τους οι επιβεβαιώσεις είναι συντομότερες των αρχικών μηνυμάτων.

Επίσης, αύξηση της ‘κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’ προκαλεί αύξηση της πιθανότητας το μήνυμα να αποστέλλεται από πιλότο και να παραλαμβάνεται από ελεγκτή. Το αντίστροφο ισχύει για το ‘σύνολο των αφικνουμένων αεροσκαφών’, καθώς και για τη μεταβλητή ‘αριθμός αρχικών και τελικών επαφών’ που εμφανίζεται στατιστικά σημαντική σε εναλλακτικό μοντέλο παλινδρόμησης για αυτή την κατηγορία (Πίνακας 4.9).

Όσον αφορά τις προβλέψεις του μοντέλου παλινδρόμησης, ενώ προβλέπονται με πολύ μεγάλη επιτυχία τα μηνύματα που παραλαμβάνονται από τους πιλότους (91%), όταν ο παραλήπτης είναι ελεγκτής το ποσοστό των σωστών προβλέψεων μειώνεται στο 56%.

**Πίνακας 4.8**, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B1

Μοντέλο B1: Ελεγκτής (0) - Πιλότος (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σταθερά	-0,101	-0,023	-0,864	0,387
Πολυπλοκότητα	0,216	0,049	4,302	0,000
Διάρκεια	0,150	0,034	6,203	0,000
Άφιξη	-4,935	-0,487	-16,102	0,000
Αναχώρηση	-8,333	-0,599	-14,030	0,000
Μεταφορά επικοινωνίας	2,270	0,513	16,795	0,000
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	0,006	0,001	1,954	0,051
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	-1,040	-0,238	-4,179	0,000
διορθωμένο ρ <sup>2</sup>	0,344			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	2123	1695	56%	
1	327	3427	91%	
Συνολικό ποσοστό			73%	

**Πίνακας 4.9**, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης

Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Αριθμός επαφών	0,003	0,001	1,728	0,084

#### 4.2.6 Μοντέλο B2

Οι μεταβλητές που έχουν στατιστικά σημαντική επιρροή στη πρόκληση εσφαλμένων επικοινωνιών από τους πιλότους, όταν αυτές εξετάζονται στο σύνολό τους και δεν διακρίνονται ανάλογα με το είδος του σφάλματος (Πίνακας 4.10), είναι ‘η μεταφορά επικοινωνίας’, το ‘σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών’, το ‘σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών’, το ‘Monitor Alert Parameter’, ο ‘αριθμός των αεροσκαφών προς MAP’ και η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’. Με εξαίρεση το ‘σύνολο των αναχωρούντων αεροσκαφών’, αύξηση της τιμής των υπολοίπων μεταβλητών οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης εσφαλμένων επικοινωνιών.

Τέλος, παρατηρούμε ότι το ποσοστό των σωστών προβλέψεων για τις εσφαλμένες επικοινωνίες είναι μηδέν, διότι το λογιστικό μοντέλο παλινδρόμησης προβλέπει πως όλα τα μηνύματα θα έχουν επιτυχή έκβαση.

**Πίνακας 4.10**, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B2

Μοντέλο B2: Επιτυχής επικοινωνία (0) – Εσφαλμένη επικοινωνία (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z > z ]
Σταθερά	-7,761	-0,289	-4,628	0,000
Μεταφορά επικοινωνίας	1,503	0,081	9,532	0,000
Σύνολο αφικνυομένων α/φ	-0,281	-0,010	-2,107	0,035
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	0,290	0,011	2,167	0,030
MAP	0,217	0,008	2,170	0,030
Αριθμός α/φ / MAP	4,238	0,158	1,938	0,053
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	1,755	0,065	2,324	0,020
διορθωμένο ρ <sup>2</sup>	0,062			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	3501	0	100%	
1	182	0	0%	
Συνολικό ποσοστό				95%

#### 4.2.7 Μοντέλο B3

Όταν τα μηνύματα που εξετάζονται, παραλαμβάνονται από τους ελεγκτές και διακρίνονται με βάση την έκβαση τους σε επιτυχείς ή εσφαλμένες επικοινωνίες, οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές του βέλτιστου μοντέλου παλινδρόμησης (Πίνακας 4.11) είναι ο ‘αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών’, η ‘άφιξη αεροσκάφους’, η ‘μεταφορά επικοινωνίας’, ο ‘αριθμός αεροσκαφών’, η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα’ και η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’. Από τα υπόλοιπα μοντέλα της κατηγορίας αυτής (Πίνακας 4.12) ως στατιστικά σημαντικές μεταβλητές προκύπτουν το ‘σύνολο αφικνυόμενων αεροσκαφών’, το ‘σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών’ και ο ‘αριθμός αεροσκαφών προς MAP’. Μείωση της τιμής των μεταβλητών ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα’, ‘σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών’ και ‘μεταφορά επικοινωνίας’ συνεπάγεται αύξηση της πιθανότητας να έχει επιτυχή έκβαση ένα μήνυμα. Για τις υπόλοιπες μεταβλητές ισχύει το αντίστροφο. Το ποσοστό των σωστών προβλέψεων για τις εσφαλμένες επικοινωνίες είναι μηδέν, όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση που συγκρίνονται οι επιτυχείς με τις εσφαλμένες επικοινωνίες.

**Πίνακας 4.11**, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο Β3

Μοντέλο Β3: Επιτυχής επικοινωνία (0) – Εσφαλμένη επικοινωνία (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σταθερά	-5,982	-0,059	-12,625	0,000
Ανοιχτές συνομιλίες	0,606	0,006	2,972	0,003
Αφιξη	1,817	0,033	8,014	0,000
Μεταφορά επικοινωνίας	-2,715	-0,018	-2,668	0,008
Αριθμός αεροσκαφών	0,069	0,001	2,580	0,010
Κατάληψη ρ/σ τομέα	-2,991	-0,029	-2,003	0,045
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	3,306	0,032	2,490	0,013
διορθωμένο $\rho^2$	0,150			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	3689	0	100%	
1	103	0	0%	
Συνολικό ποσοστό				97%

**Πίνακας 4.12**, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης

Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σύνολο αφιγκυομένων α/φ	0,069	0,001	2,595	0,009
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	-0,065	-0,001	-2,253	0,024
Αριθμός α/φ / MAP	1,184	0,012	2,259	0,024

#### 4.2.8 Μοντέλο B4

Όταν ο παραλήπτης του μηνύματος είναι πιλότος και συγκρίνονται οι εσφαλμένες ακροάσεις με τις μη αποκρίσεις, οι μεταβλητές που επηρεάζουν τον τύπο του σφάλματος και συμμετέχουν στο βέλτιστο μοντέλο παλινδρόμησης (Πίνακας 4.13), είναι ο ‘αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών’, ‘η μεταφορά επικοινωνίας’, το ‘σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών’ και η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’. Από τα υπόλοιπα μοντέλα παλινδρόμησης (Πίνακας 4.14) ως στατιστικά σημαντικές μεταβλητές προκύπτουν η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα’, ο ‘αριθμός των επαφών’ και ο ‘αριθμός των επαφών προς MAP’. Με εξαίρεση την μεταβλητή ‘μεταφορά επικοινωνίας’, αύξηση της τιμής των υπολοίπων μεταβλητών προκαλεί αύξηση της πιθανότητας ο τύπος του σφάλματος να είναι μη απόκριση. Το ποσοστό σωστών προβλέψεων για τις εσφαλμένες ακροάσεις φτάνει το 78% σε αντίθεση με το ποσοστό για τις μη αποκρίσεις που είναι μόλις 53%.

**Πίνακας 4.13**, Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B4

Μοντέλο B4: Μη απόκριση (0) – Εσφαλμένη ακρόαση (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σταθερά	2,199	0,530	3,105	0,002
Ανοιχτές συνομιλίες	-0,569	-0,137	-1,692	0,091
Μεταφορά επικοινωνίας	1,083	0,260	3,067	0,002
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	-0,049	-0,012	-2,560	0,010
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	-2,608	-0,628	-2,040	0,041
διορθωμένο ρ <sup>2</sup>	0,066			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	40	36	53%	
1	23	83	78%	
Συνολικό ποσοστό			68%	

**Πίνακας 4.14**, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης

Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Κατάληψη ρ/σ τομέα	-3,164	-0,761	-2,294	0,022
Αριθμός επαφών	-0,025	-0,006	-2,665	0,008
Αριθμός επαφών / MAP	-2,443	-0,588	-1,718	0,086

### 4.2.9 Μοντέλο B5

Στην περίπτωση που εξετάζονται οι μη αποκρίσεις και οι εσφαλμένες ακροάσεις των ελεγκτών οι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές του βέλτιστου μοντέλου (Πίνακας 4.15) είναι ο ‘αριθμός των αεροσκαφών’, ‘ο αριθμός των αρχικών και τελικών επαφών’ και ‘η κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’. Από τα υπόλοιπα μοντέλα παλινδρόμησης (Πίνακας 4.16) ως στατιστικά σημαντικές μεταβλητές προκύπτουν ο ‘αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών’, ‘το σύνολο των αναχωρούντων αεροσκαφών’ και η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα’. Αύξηση του αριθμού των αρχικών και τελικών επαφών και του συνόλου των αναχωρούντων αεροσκαφών προκαλεί αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης εσφαλμένων ακροάσεων έναντι των μη αποκρίσεων. Για τις υπόλοιπες μεταβλητές ισχύει το αντίστροφο. Το ποσοστό σωστών προβλέψεων για τις εσφαλμένες ακροάσεις είναι 81% σε αντίθεση με το ποσοστό για τις μη αποκρίσεις που είναι μόλις 56%.

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η αύξηση του φόρτου εργασίας των ελεγκτών επιδρά στην επικοινωνία τους με τους πιλότους κυρίως μέσω της αδυναμίας τους να αποκριθούν στα μηνύματα που λαμβάνουν.

**Πίνακας 4.15,** Βέλτιστο μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για το Μοντέλο B5

Μοντέλο B5: Μη απόκριση (0) – Εσφαλμένη ακρόαση (1)				
Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Σταθερά	3,167	0,740	3,470	0,001
Αριθμός αεροσκαφών	-0,109	-0,025	-1,909	0,056
Αριθμός επαφών	0,038	0,009	2,324	0,020
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	-6,306	-1,473	-2,920	0,004
διορθωμένο ρ <sup>2</sup>	0,092			
Πραγματικές τιμές	Προβλέψεις		Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	0	1		
0	23	18	56%	
1	12	50	81%	
Συνολικό ποσοστό			71%	



**Πίνακας 4.16**, Μεταβλητές υπολοίπων μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης

Μεταβλητή	Συντελεστής	Marginal effect	t-value	P[ Z >z]
Ανοιχτές συνομιλίες	-0,830	-0,195	-1,927	0,054
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	0,083	0,019	2,474	0,013
Κατάληψη ρ/σ τομέα	-4,121	-0,971	-1,790	0,073

### 4.3 Συμπεράσματα

Όπως βλέπουμε στους πίνακες 4.17 και 4.18, η μεταβλητή με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στην έκβαση των συνομιλιών είναι η ‘μεταφορά της επικοινωνίας’, ενώ έπονται η ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’, το ‘σύνολο αφικνυόμενων αεροσκαφών’, το ‘σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών’, ο ‘αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών’ και η ‘άφιξη του αεροσκάφους’. Οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται είτε στο περιεχόμενο του μηνύματος, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τη στιγμή αποστολής του (άφιξη αεροσκάφους, μεταφορά επικοινωνίας), είτε στο μέγεθος της εναέριας κυκλοφορίας και τον φόρτο εργασίας των ελεγκτών. Αντίθετα, μηδαμινή είναι η επίδραση του μεγέθους (πολυπλοκότητα και διάρκεια) ενός μηνύματος.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι πιλότοι είναι πολύ επιρρεπείς στην εσφαλμένη απομνημόνευση των ραδιοσυχνοτήτων επικοινωνίας εξαιτίας των πολλών ψηφίων τους. Ενώ για τους πιλότους τα περισσότερα σφάλματα πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια των τελικών συνομιλιών, προτού αναχωρήσει το αεροσκάφος από τον τομέα, η μεγαλύτερη πιθανότητα πρόκλησης σφαλμάτων από τους ελεγκτές εμφανίζεται στην πρώτη επικοινωνία του αεροσκάφους με το κέντρο ελέγχου ύστερα από την άφιξη του. Καθότι τα μηνύματα αυτά δεν περιέχουν πολλές και σύνθετες πληροφορίες προς επεξεργασία, συμπεραίνουμε πως βασική αιτία πρόκλησης αυτής της κατηγορίας σφαλμάτων αποτελεί η μειωμένη προσοχή των ελεγκτών στα μηνύματα, που δεν αποτελούν άμεση απάντηση σε δικά τους μηνύματα. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι η πρώτη επικοινωνία του αεροσκάφους με το κέντρο ελέγχου πραγματοποιείται πάντα από τους πιλότους, ενώ τις υπόλοιπες τις ξεκινούν πρωτίστως οι ελεγκτές.

Επίσης, διαπιστώνουμε ότι η αύξηση του μεγέθους της εναέριας κυκλοφορίας δεν επηρεάζει μόνο τους ελεγκτές αλλά και τους πιλότους. Όσον αφορά στους πρώτους, είναι αναμενόμενο πως ο μεγαλύτερος αριθμός διερχομένων αεροσκαφών, ανταλλασσόμενων μηνυμάτων και ανοιχτών συνομιλιών αυξάνει τον φόρτο εργασίας και την κόπωσή τους με άμεση επίπτωση στην ικανότητα απόκριση τους. Όσον αφορά όμως στους πιλότους, η αυξημένη πιθανότητα μη απόκρισης μπορεί να οφείλεται είτε στη μη ακρόαση του μηνύματος εξαιτίας της έντονης δραστηριότητας στη ραδιοσυχνότητα επικοινωνίας είτε στην αδυναμία χρήσης της ραδιοσυχνότητας για την αποστολή της απόκρισης λόγω κατάληψής της.

Τέλος, συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος της λογιστικής παλινδρόμησης δεν ενδείκνυται για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης, όταν ο αριθμός των παρατηρήσεων ενός εκ των δύο εναλλακτικών ενδεχομένων που μελετώνται είναι πολλαπλάσιος του άλλου ( $n_0 \gg n_1$ ).

**Πίνακας 4.17, Αποτελέσματα λογιστικής παλινδρόμησης για την ομάδα Α**

	Μοντέλο Α1	Μοντέλο Α2	Μοντέλο Α3	Μοντέλο Α4
	Επιτυχής (-)	Μη απόκριση (-)	Ελεγκτής (-)	
	Εσφαλμένη (+)	Εσφ. ακρόαση (+)	Πιλότος (+)	
Ανοιχτές συνομιλίες	+	-		
Πολυπλοκότητα				+
Διάρκεια	+			
Άφιξη	+		-	-
Αναχώρηση	-			
Μεταφορά επικοινωνίας	+	+	+	+
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	+		+	-
Σύνολο αναχωρούντων α/φ		-		+
Αριθμός αεροσκαφών	+	-		
Αριθμός επαφών		-	-	
MAP				
Αριθμός α/φ / MAP		-		+
Αριθμός επαφών / MAP		-		
Κατάληψη ρ/σ τομέα		-		
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	+	-	+	

**Πίνακας 4.18, Αποτελέσματα λογιστικής παλινδρόμησης για την ομάδα Β**

	Μοντέλο Β1	Μοντέλο Β2	Μοντέλο Β3	Μοντέλο Β4	Μοντέλο Β5
	Ελεγκτής (-)	Επιτυχής επικοινωνία (-)	Μη απόκριση (-)		
	Πιλότος (+)	Εσφαλμένη επικοινωνία (+)	Εσφαλμένη ακρόαση (+)		
Ανοιχτές συνομιλίες			+	-	-
Πολυπλοκότητα	+				
Διάρκεια	+				
Άφιξη	-		+		
Αναχώρηση	-				
Μεταφορά επικοινωνίας	+	+	-	+	
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	+	-	+		
Σύνολο αναχωρούντων α/φ		+	-	-	+
Αριθμός αεροσκαφών			+		-
Αριθμός επαφών	+			-	+
MAP		+			

	Μοντέλο B1	Μοντέλο B2	Μοντέλο B3	Μοντέλο B4	Μοντέλο B5
	Ελεγκτής (-)	Επιτυχής επικοινωνία (-)		Μη απόκριση (-)	
	Πιλότος (+)	Εσφαλμένη επικοινωνία (+)		Εσφαλμένη ακρόαση (+)	
Αριθμός α/φ / ΜΑΡ		+	+		
Αριθμός επαφών / ΜΑΡ				-	
Κατάληψη ρ/σ τομέα			-	-	-
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	-	+	+	-	-

## 5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΔΡΟΜΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ

### 5.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η Μέθοδος Αναδρομικού Διαχωρισμού (Recursive Partitioning Methodology, RPM) είναι μία μη παραμετρική μέθοδος ταξινόμησης που χρησιμοποιεί δένδροειδείς δομές. Η μέθοδος παράγει ένα σύνολο κανόνων αποφάσεων, με βάση ένα υποσύνολο του πληθυσμού, που χρησιμοποιείται για την εκμάθηση του αλγορίθμου. Οι κανόνες αυτοί απεικονίζονται με τη μορφή ενός δυαδικού δέντρου αποφάσεων, όπου κάθε εσωτερικός κόμβος είναι ένας κόμβος δυαδικής απόφασης. Από την παραπάνω περιγραφή γίνεται φανερό ότι RPM είναι μια δυαδική μέθοδος, διότι οι πατρικοί κόμβοι έχουν πάντα ακριβώς δύο απογόνους και αναδρομική, επειδή η διαδικασία μπορεί να επαναλαμβάνεται συνεχώς θέτοντας τις ακόλουθες δύο ερωτήσεις:

(1) ποιά από τις ανεξάρτητες μεταβλητές πρέπει να επιλεγεί για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση της ετερογένειας της εξαρτημένης μεταβλητής;

(2) ποιά τιμή των επιλεγμένων ανεξάρτητων μεταβλητών (είτε αυτές είναι διακριτές, είτε συνεχείς) θα προκαλέσει τη μέγιστη δυνατή μείωση της ετερογένειας της εξαρτημένης μεταβλητής;

Αυτά τα δύο βήματα επαναλαμβάνονται χρησιμοποιώντας μια αριθμητική διαδικασία αναζήτησης, έως ότου ικανοποιηθεί η εκάστοτε συνθήκη τερματισμού. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος που παρουσιάζεται εφαρμόζεται μόνο σε διακριτές εξαρτημένες μεταβλητές. Ωστόσο, παρόμοια μέθοδος έχει αναπτυχθεί για συνεχείς εξαρτημένες μεταβλητές από τους Washington και Wolf (1997) και Washington (2000).

Για τη μαθηματική διατύπωση της διαδικασίας επίλυσης που ακολουθεί η RPM, ας θεωρήσουμε μια τυχαία (πολύ)μεταβλητή  $(y, \mathbf{x})$  όπου  $\mathbf{x}$  είναι το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών και  $y$  η εξαρτημένη μεταβλητή που λαμβάνει τιμές σε ένα σύνολο πρότερων κλάσεων  $\{1, \dots, j, \dots, J\}$ . Ένα δέντρο ταξινόμησης αρχικά συνίσταται από ένα μόνο αρχικό κόμβο ( $n$ ) στον οποίο εμπεριέχονται όλες οι παρατηρήσεις του δείγματος εκμάθησης (derivation set). Για κάθε μία ανεξάρτητη μεταβλητή  $x_i$ , αναζητείται ο διαχωρισμός του συνόλου που θα μεγιστοποιήσει την

καθαρότητα (ομοιογένεια) της κλάσης. Οι συνεχείς μεταβλητές χωρίζονται κατά σειρά και οι κατηγορικές μεταβλητές με διαχωρισμό του συνόλου των δυνατών τιμών τους. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο κόμβος  $n$  διαχωρίζεται σε δύο απόγονους,  $v_L$  και  $v_R$ , ως προς την εν λόγω ανεξάρτητη μεταβλητή  $x_i$ , η οποία από όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές, δίνει τη μεγαλύτερη μείωση στην ετερογένεια κλάσης (ή ισοδύναμα μεγιστοποιεί την καθαρότητα κλάσης). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτός ο διαχωρισμός εφαρμόζεται αναδρομικά σε κάθε φύλλο.

Ο σκοπός αυτού του αλγορίθμου είναι να δημιουργήσει ένα δέντρο, για το οποίο ο κάθε κόμβος να είναι πιο ομογενής από τον πατρικό. Αυστηρότερα, ορίζουμε την μη καθαρότητα (ανομοιογένεια) κάθε κόμβου ως εξής:

$$h(v) = f[p(1|v), \dots, p(J|v)] \quad (1)$$

όπου  $f$  είναι η συνάρτηση μη καθαρότητας,  $p(j|v)$  το ποσοστό της κλάσης  $j$  στον κόμβο  $v$  και  $J$  ο αριθμός των κλάσεων. Ένας διαχωρισμός του κόμβου  $v$  σε  $v_L$  και  $v_R$  σημαίνει ότι ένα ποσοστό  $p_L$  των περιπτώσεων του  $v$  πηγαίνουν στον  $v_L$  και ένα ποσοστό  $p_R$  στον  $v_R$ . Η μείωση της μη καθαρότητας που προκύπτει από τον διαχωρισμό δίνεται ως

$$Dh(s, v) = h(v) - p_L \times h(v_L) + p_R \times h(v_R) \quad (2)$$

Ως μέτρο της μη καθαρότητας, χρησιμοποιούμε το δείκτη ανομοιομορφίας Gini (Breiman et al. 1984):

$$f[p(1|v), \dots, p(J|v)] = \sum_{j=1}^J p(j|v)^2 \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) υποδηλώνει ότι για έναν κόμβο, του οποίου ο δείκτης μη καθαρότητας ισούται με μηδέν, όλες οι παρατηρήσεις του κόμβου έχουν την ίδια έκβαση. Για παράδειγμα, κάθε πρόσωπο που περιλαμβάνεται στον κόμβο ταξιδεύει με το λεωφορείο (επιλογή μέσου). Αντίστοιχα, ο λιγότερο 'καθαρός' κόμβος είναι αυτός του οποίου τα μέλη είναι εξ ίσου μοιρασμένα σε διαφορετικά μέσα. Για παράδειγμα το ένα τρίτο του κόμβου ταξιδεύει με το λεωφορείο, το ένα τρίτο με το Μετρό, και το ένα τρίτο με αυτοκίνητο.

Όταν μια αταξινόμητη περίπτωση (π.χ. ένα άτομο) διασχίζει ένα δέντρο απόφασης από τον αρχικό κόμβο (ρίζα) μέχρι έναν τερματικό κόμβο (φύλλο) ακολουθώντας την διαδρομή που είναι σύμφωνη με τις τιμές των χαρακτηριστικών

αυτού του ατόμου, κατηγοριοποιείται στη συχνότερα παρατηρούμενη κλάση μεταξύ των περιπτώσεων που έχουν οριστεί στον τερματικό κόμβο. Πιθανώς το πιο κρίσιμο βήμα της εν λόγω μεθόδου είναι ο τρόπος που γίνεται ο διαχωρισμός. Ο βέλτιστος διαχωρισμός  $s^*$  είναι αυτός που θα μεγιστοποιήσει την εξίσωση (2) ως προς όλους τους πιθανούς διαχωρισμούς όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών. Δηλαδή, αν  $S$  μια καθορισμένη κλάση κάποιων πιθανών διαχωρισμών, ο βέλτιστος διαχωρισμός  $s^*$  ορίζεται από τη σχέση  $Dh(s^*, u) = \max_{s \in S} Dh(S, u)$ .

Τα δέντρα αποφάσεων μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο υποομάδες: μονοπαραγοντικά (univariate) και πολυπαραγοντικά (multivariate) δέντρα αποφάσεων. Στα μονοπαραγοντικά δένδρα τα όρια της απόφασης σε κάθε κόμβο του δέντρου ορίζονται από ένα μόνο χαρακτηριστικό των δεδομένων εισόδου. Σε κάθε κόμβο, τα δεδομένα χωρίζονται σε απόγονους των κόμβων με βάση ενός μόνο χαρακτηριστικού τους. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα χωρίζονται απαντώντας ερωτήματα όπως "Είναι  $x_m \leq c$ ?" για κάθε πραγματικό αριθμό  $c$  (αν  $x_m$  είναι συνεχής) και "Κάνει  $x_m \in B$ ?" (αν  $x_m$  είναι μια κατηγορηματική μεταβλητή), όπου  $B$  μπορεί να είναι οποιοσδήποτε συνδυασμός όλων των ξένων μεταξύ τους υποσύνολων  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_L\}$ , δηλαδή, το σύνολο των διαφορετικών τιμών της κατηγορικής μεταβλητής. Τα πολυπαραγοντικά δέντρα είναι παρόμοια με τα μονοπαραγοντικά, αλλά η διαδικασία διάσπασης σε κάθε κόμβο μπορεί να βασίζεται σε περισσότερα χαρακτηριστικά των δεδομένων εισόδου. Συγκεκριμένα, σε κάθε κόμβο του δέντρου υπολογίζεται ένα σύνολο γραμμικών διαχωριστικών συναρτήσεων (LDF). Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις συναρτήσεις υπολογίζονται με βάση το σύνολο δεδομένων μάθησης.

Η μέθοδος αναδρομικού διαχωρισμού (RPM) προσφέρει ένα σύνολο ελκυστικών τεχνικών ιδιοτήτων (Karlaftis, 2004):

1. είναι μη παραμετρική και δεν απαιτεί την εισαγωγή συναρτησιακών σχέσεων
2. δεν απαιτεί την εκ των προτέρων επιλογή των μεταβλητών, διότι χρησιμοποιεί μια διαδοχική μέθοδο για τον καθορισμό των βέλτιστων κανόνων διαχωρισμού
3. τα αποτελέσματά της δεν επηρεάζονται από μονοτονικούς μετασχηματισμούς των ανεξάρτητων μεταβλητών
4. διαχειρίζεται βάσεις δεδομένων με σύνθετη (μη ομοιογενή) δομή

5. είναι εξαιρετικά εύρωστη όσον αφορά την διαχείριση ακραίων δεδομένων
6. χρησιμοποιεί κάθε δυνατό συνδυασμό κατηγορικών και ποιοτικών (διακριτών) μεταβλητών
7. δεν επηρεάζεται από τη συσχέτιση των ανεξάρτητων μεταβλητών

Επιπροσθέτως, η μεθοδολογία αναδρομικού διαχωρισμού (RPM) δίνει προβλέψεις για την έκβαση της ανεξάρτητης μεταβλητής ( $y$ ), ενσωματώνοντας τους βέλτιστους κανόνες διαχωρισμού σε μία αλληλουχία κριτηρίων 'if-then', απλοποιώντας τη μελέτη και σύγκριση διαφορετικών τακτικών.

## 5.2 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

### 5.2.1 Κριτήρια επιλογής των δέντρων ταξινόμησης

Η ανάπτυξη των πιθανοτικών μοντέλων έγινε μέσω του προγράμματος CART (Classification And Regression Trees). Για κάθε ένα από τα εννέα εξεταζόμενα μοντέλα αναπτύχθηκαν δεκάδες δέντρα ταξινόμησης αξιοποιώντας στο μέγιστο τις δυνατότητες του προγράμματος. Η επιλογή του τελικού δέντρου για κάθε μοντέλο έγινε με βάση τα εξής κατά σειρά κριτήρια:

1. Μεγιστοποίηση του ποσοστού επιτυχών προβλέψεων **εκτός του δείγματος** για κάθε ένα εκ των δύο εναλλακτικών ενδεχομένων
2. Μεγιστοποίηση του ποσοστού επιτυχών προβλέψεων **εντός του δείγματος** για κάθε ένα εκ των δύο εναλλακτικών ενδεχομένων
3. Μεγιστοποίηση του ελαχίστου αριθμού των παρατηρήσεων των τερματικών κόμβων
4. Ελαχιστοποίηση του αριθμού των τερματικών κόμβων του δέντρου

Ο έλεγχος των προβλέψεων για παρατηρήσεις εκτός του δείγματος έγινε με τη μέθοδο 10-Fold Cross Validation που προσφέρεται από το πρόγραμμα CART. Βασική ιδέα της μεθόδου είναι κάθε παρατήρηση του δείγματος να συμπεριλαμβάνεται τόσο στον έλεγχο εντός του δείγματος όσο και σε αυτόν εκτός δείγματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαίρεση του συνολικού δείγματος σε δέκα επιμέρους υποσύνολα και την επανάληψη της διαδικασίας ανάπτυξης του τελικού



δέντρου δέκα φορές. Σε κάθε επανάληψη εννέα από τα υποσύνολα χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των βέλτιστων κριτηρίων διαχωρισμού και το εναπομείναν υποσύνολο για τον έλεγχο των προβλέψεων. Όταν οι επαναλήψεις ολοκληρωθούν και εξαχθεί το τελικό δέντρο, τα επιμέρους ποσοστά προβλέψεων συμψηφίζονται και υπολογίζεται το εκτός του δείγματος ποσοστό των προβλέψεων.

Κατά τη διαδικασία ανάπτυξης των βέλτιστων δέντρων προέκυψαν οι παρακάτω παρατηρήσεις σχετικά με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε:

- Αύξηση του αριθμού των τερματικών κόμβων προκαλεί κατά κανόνα αύξηση του ποσοστού επιτυχών προβλέψεων εντός του δείγματος και μείωση του αντίστοιχου ποσοστού εκτός του δείγματος. Αυτό συμβαίνει, διότι οι διαχωρισμοί του δέντρου διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας τις εντός του δείγματος παρατηρήσεις. Όσο περισσότερα επίπεδα διαχωρισμού υπάρχουν, τόσο περισσότεροι τερματικοί κόμβοι δημιουργούνται. Παράλληλα, όμως, μειώνεται ο αριθμός των παρατηρήσεων στους κατώτερους θυγατρικούς κόμβους και κατ' επέκταση μειώνεται και το μέγεθος των δειγμάτων βάσει των οποίων γίνεται ο διαχωρισμός τους. Τα πολύ μικρά όμως δείγματα παύουν να είναι αντιπροσωπευτικά των ιδιοτήτων του αρχικού πληθυσμού και για το λόγο αυτό τα ποσοστά επιτυχίας για τις εκτός του δείγματος παρατηρήσεις είναι μειωμένα.
- Η αφαίρεση μεταβλητών, που έχουν υψηλό ποσοστό συμμετοχής σε ένα μοντέλο ταξινόμησης, από τη λίστα των ανεξάρτητων μεταβλητών στο πρόγραμμα CART ενδέχεται να οδηγήσει στην ανάπτυξη δέντρων με υψηλότερα ποσοστά επιτυχών προβλέψεων. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το ποσοστό συμμετοχής μίας μεταβλητής εκφράζει τη συνεισφορά της μεταβλητής στην ανάπτυξη του μοντέλου όχι μόνο ως πρωτεύον διαχωριστή (primary splitter) αλλά και ως αναπληρωτή (surrogate). Οι αναπληρωτές διαχωριστές είναι οι μεταβλητές εκείνες που αυξάνουν την ομοιογένεια ενός κόμβου, αλλά σε μικρότερο βαθμό από τους πρωτεύοντες, οι οποίοι και επιλέγονται.

### 5.2.2 Παρουσίαση και ανάλυση των δέντρων ταξινόμησης

Συνήθως, τα μοντέλα που αναπτύσσονται με τη μέθοδο RPM είναι μακροσκελή και σύνθετα. Η ακριβής μαθηματική τους διατύπωση είναι δύσκολη και αμφιβόλου χρησιμότητας. Για το λόγο αυτό, το λογισμικό CART χρησιμοποιεί δένδροειδής απεικονίσεις για την παρουσίαση των μοντέλων, οι οποίες είναι ευκολότερο να μελετηθούν. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θεωρείται σκόπιμο να αναλυθούν διεξοδικά και τα εννέα μοντέλα που αναπτύχθηκαν. Ωστόσο, θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν δύο επιλεγμένα δέντρα ταξινόμησης, αυτά των μοντέλων B2 και B3, καθώς κρίθηκε πως παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σχετικά με την έκβαση των εσφαλμένων επικοινωνιών. Τα υπόλοιπα επτά δέντρα επισυνάπτονται στο παράρτημα Β.

#### *Επεξήγηση μεταβλητών στα δέντρα ταξινόμησης:*

COGNITIV: Αριθμός ανοιχτών συνομιλιών

COMPLEXI: Πολυπλοκότητα μηνύματος

INTERVAL: Διάρκεια μηνύματος

ARRIVAL: Άφιξη του αεροσκάφους

DEPART: Αναχώρηση του αεροσκάφους

TRANSFER: Μεταφορά επικοινωνίας

CUMARRIV: Σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών

CUMDEP: Σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών

NUMAC: Αριθμός αεροσκαφών

CONTACTS: Αριθμός αρχικών και τελικών επαφών

MAP: Monitor Alert Parameter

VC1: Αριθμός αεροσκαφών προς χωρητικότητα

VC2: Αριθμός επαφών προς χωρητικότητα

SECTOR: Ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά τομέα

MESSAGE: Ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα

## Μοντέλο B2

Το μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης του μοντέλου B2 στο οποίο εξετάζεται η επιτυχία της έκβασης των μηνυμάτων που παραλαμβάνονται από τους πιλότους, (Σχήμα 5.1) αποτελείται από 17 εσωτερικούς κόμβους (μπλε χρώμα) και 18 τερματικούς κόμβους (κόκκινο χρώμα). Σε κάθε εσωτερικό κόμβο αναγράφεται το κριτήριο διαχωρισμού. Εάν οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών μιας παρατήρησης ικανοποιούν το κριτήριο διαχωρισμού, η παρατήρηση κατατάσσεται στο δεξί θυγατρικό κόμβο. Διαφορετικά, κατατάσσεται στον αριστερό θυγατρικό κόμβο. Η κλάση κάθε κόμβου εκφράζει την προβλεπόμενη έκβαση των παρατηρήσεων του κόμβου, εάν δεν ακολουθήσουν περαιτέρω διαχωρισμοί.

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζεται η σημαντικότητα κάθε μεταβλητής.

- Η πρώτη σε σειρά σημασίας μεταβλητή είναι η ‘διάρκεια του μηνύματος’. Αυτό σημαίνει ότι η εξαρτημένη μεταβλητή είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη ως προς τη διάρκεια των μηνυμάτων της οποίας μικρή αλλαγή έχει σημαντική επίδραση στην επιτυχή ή μη έκβαση των μηνυμάτων που παραλαμβάνονται από τους πιλότους.
- Η δεύτερη σε σειρά σημασίας μεταβλητή είναι η ‘μεταφορά της επικοινωνίας’ με ποσοστό 75%. Αυτό δείχνει πως η αναφορά στη ραδιοσυχνότητα επικοινωνίας του επόμενου τομέα στον οποίο θα εισέλθει το αεροσκάφος είναι καθοριστικής σημασίας για την έκβαση της επικοινωνίας.
- Την τρίτη και τέταρτη θέση στην ταξινόμηση σημαντικότητας καταλαμβάνουν οι μεταβλητές ‘σύνολο αφικνουμένων αεροσκαφών’ και ‘αριθμός αρχικών και τελικών επαφών’. Συμμετέχουν όμως με ποσοστά 23% και 21% αντίστοιχα, που είναι κατά πολύ μικρότερα από τα ποσοστά των δύο προηγούμενων μεταβλητών. Πρέπει να σημειωθεί πως η μεταβλητή ‘αριθμός αρχικών και τελικών επαφών’ δεν εμφανίζεται στο επιλεγόμενο δέντρο ταξινόμησης. Ωστόσο, αποτέλεσε σημαντικό αναπληρωτή διαχωριστή .
- Από την πέμπτη έως την ενδέκατη θέση εμφανίζονται οι μεταβλητές ‘σύνολο αναχωρούντων αεροσκαφών’, ‘ποσοστό κατάληψης ραδιοσυχνότητας ανά τομέα’, ‘αριθμός αρχικών και τελικών επαφών προς MAP’, ‘αριθμός αεροσκαφών’, ‘ποσοστό κατάληψης ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’ και ‘αριθμός αεροσκαφών προς MAP’. Η συμμετοχή τους όμως στην τελική έκβαση των συνομιλιών είναι αρκετά μικρή, σε ποσοστό μεταξύ 13% και 19%.

- Οι υπόλοιπες μεταβλητές έχουν από ελάχιστη έως μηδενική επίδραση στη διαμόρφωση του δέντρου.

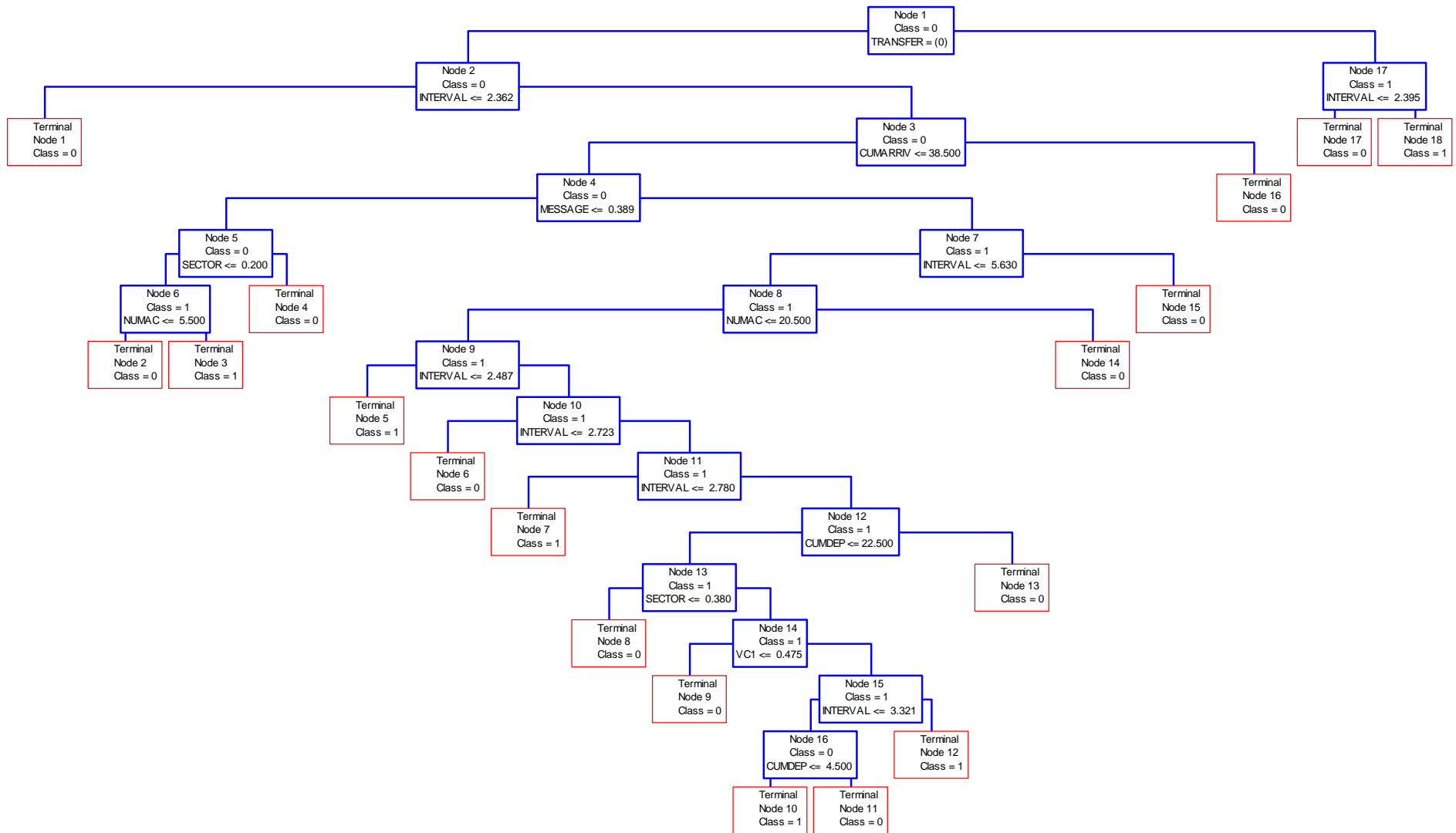
Τα ποσοστά επιτυχούς ταξινόμησης του δέντρου αυτού (Πίνακας 5.2) για τις εντός του δείγματος παρατηρήσεις είναι 66% για την επιτυχή επικοινωνία και 86% για την εσφαλμένη. Ο έλεγχος των προβλέψεων εκτός του δείγματος εμφανίζει ποσοστά επιτυχίας 67% τόσο για την επιτυχή όσο και την εσφαλμένη επικοινωνία. Η μείωση αυτή είναι αναμενόμενη δεδομένου του μεγέθους του δέντρου, καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα κριτήρια διαχωρισμού των δέντρων προκύπτουν με βάση τις εντός του δείγματος παρατηρήσεις.

**Πίνακας 5.1, Σημαντικότητα μεταβλητών για το Μοντέλο B2**

Μεταβλητή	Συμμετοχή μεταβλητής	
Διάρκεια	100	
Μεταφορά επικοινωνίας	75,44	
Σύνολο αφικνυομένων α/φ	23,07	
Αριθμός επαφών	21,63	
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	18,78	
Κατάληψη ρ/σ τομέα	15,94	
Αριθμός επαφών / MAP	15,84	
Αριθμός αεροσκαφών	15,43	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	13,57	
Αριθμός αεροσκαφών / MAP	13,56	
MAP	5,7	
Πολυπλοκότητα	0,13	
Ανοιχτές συνομιλίες	0	
Άφιξη	0	
Αναχώρηση	0	

**Πίνακας 5.2, Προβλέψεις Μοντέλου B2**

	Ποσοστό σωστών προβλέψεων	
	Εντός δείγματος	Εκτός δείγματος
Επιτυχής επικοινωνία	66%	67%
Εσφαλμένη επικοινωνία	86%	67%



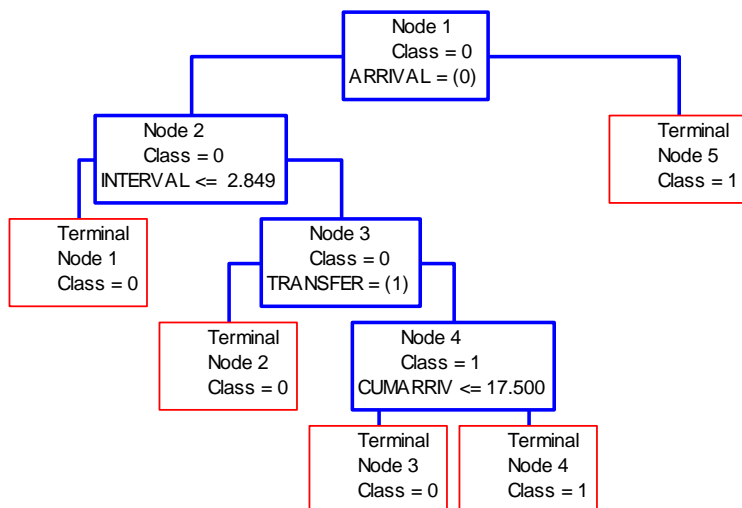
Σχήμα 5.1, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου B2

### Μοντέλο B3

Το μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης του μοντέλου B3 (Σχήμα 5.2) εξετάζει την επιτυχία της έκβασης των μηνυμάτων που παραλαμβάνονται από τους ελεγκτές. Το δέντρο αυτό έχει αρκετά μικρότερο μέγεθος από το δέντρο του μοντέλου B2, καθώς αποτελείται από μόλις 4 εσωτερικούς και 5 τερματικούς κόμβους. Τα ποσοστά συμμετοχής των μεταβλητών στην ανάπτυξη του μοντέλου (Πίνακας 5.3) παρουσιάζονται παρακάτω.

- Η πρώτη σε σειρά σημασίας μεταβλητή είναι η ‘άφιξη του αεροσκάφους’. Αυτό δείχνει πως είναι καθοριστικής σημασίας για την έκβαση μίας επικοινωνίας εάν το μήνυμα που μελετάται είναι το πρώτο μετά την είσοδο του αεροσκάφους στον τομέα ή όχι.
- Η δεύτερη σε σειρά σημασίας μεταβλητή είναι η ‘μεταφορά της επικοινωνίας’ με ποσοστό 69%. Αυτό σημαίνει πως η αναφορά στη ραδιοσυχνότητα επικοινωνίας του επόμενου τομέα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή ή μη έκβαση της συνομιλίας.
- Οι επόμενες δύο κατά σειρά σημαντικότητας μεταβλητές παρουσιάζουν ποσοστά συμμετοχής της τάξης του 62%-63%. Αυτές είναι η ‘αναχώρηση του αεροσκάφους’ και η ‘διάρκεια του μηνύματος’. Παρατηρούμε και πάλι το πολύ υψηλό ποσοστό συμμετοχής ενός αναπληρωτή διαχωριστή, ο οποίος όμως δεν εμφανίζεται καθόλου στο τελικό δέντρο ταξινόμησης.
- Την πέμπτη και έκτη θέση στην ταξινόμηση σημαντικότητας καταλαμβάνουν οι μεταβλητές ‘αριθμός αεροσκαφών προς MAP’ και ‘αριθμός αεροσκαφών’. Συμμετέχουν όμως με ποσοστά 23% και 21% αντίστοιχα που είναι κατά πολύ μικρότερα από τα ποσοστά των δύο προηγούμενων μεταβλητών.
- Τέλος, οι υπόλοιπες μεταβλητές έχουν από ελάχιστη έως μηδενική επίδραση στη διαμόρφωση του δέντρου.

Τα ποσοστά επιτυχούς ταξινόμησης του δέντρου αυτού (Πίνακας 5.4) για τις εντός του δείγματος παρατηρήσεις είναι 68% για την επιτυχή επικοινωνία και 86% για την εσφαλμένη. Ο έλεγχος των προβλέψεων εκτός του δείγματος εμφανίζει ποσοστά επιτυχίας 72% για την επιτυχή επικοινωνία και 77% για την εσφαλμένη.



Σχήμα 5.2, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου B3

Πίνακας 5.3, Σημαντικότητα μεταβλητών για το Μοντέλο B3

Μεταβλητή	Συμμετοχή μεταβλητής	
Άφιξη	100	
Μεταφορά επικοινωνίας	68,81	
Αναχώρηση	63,78	
Διάρκεια	62,27	
Αριθμός αεροσκαφών / MAP	21,91	
Αριθμός αεροσκαφών	20,25	
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	3,59	
Ανοιχτές συνομιλίες	3,2	
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	3,09	
Αριθμός επαφών	2,71	
Αριθμός επαφών / MAP	1,37	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	0,62	
Πολυπλοκότητα	0,53	
Κατάληψη ρ/σ τομέα	0,01	
MAP	0	

Πίνακας 5.4, Προβλέψεις Μοντέλου B3

Ποσοστό σωστών προβλέψεων		
	Εντός δείγματος	Εκτός δείγματος
Επιτυχής επικοινωνία	68%	72%
Εσφαλμένη επικοινωνία	86%	77%

### 5.2.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στους πίνακες 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται τα ποσοστά συμμετοχής των μεταβλητών και η σειρά κατάταξής τους για τα εννέα μοντέλα. Στον πίνακα 5.7 καταγράφονται τα ποσοστά επιτυχίας των προβλέψεων κάθε μοντέλου για τη μέθοδο αναδρομικού διαχωρισμού και τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης. Από την ανάλυση των στοιχείων αυτών προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα.

- Η πιο σημαντική μεταβλητή στο σύνολο των μοντέλων είναι η ‘μεταφορά της επικοινωνίας’ και ακολουθεί η ‘άφιξη του αεροσκάφους’. Τα αποτελέσματα αυτά ταυτίζονται με εκείνα της λογιστικής παλινδρόμησης αλλά και της στατιστικής ανάλυσης, όπως παρουσιάστηκαν στο **κεφάλαιο 3**.
- ‘Το ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’ έχει πολύ μεγάλη σημαντικότητα ως μεταβλητή, ιδιαίτερα στην περίπτωση που ερευνάται μία εσφαλμένη συνομιλία ως προς τον τύπο του σφάλματος.
- Η μεταβλητή ‘διάρκεια μηνύματος’ εμφανίζεται να έχει μεγάλη σημαντικότητα στα περισσότερα μοντέλα που αναπτύχθηκαν. Υπενθυμίζουμε ότι από τα μοντέλα της λογιστικής παλινδρόμησης δεν προέκυψε συσχέτιση μεταξύ της διάρκειας των μηνυμάτων και της έκβασης των συνομιλιών.
- Οι μεταβλητές που περιγράφουν το μέγεθος της εναέριας κυκλοφορίας δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά συμμετοχής στα εξεταζόμενα μοντέλα. Από τις μεταβλητές αυτές ξεχωρίζουν ‘ο αριθμός των αφικνουμένων αεροσκαφών’, ‘ο αριθμός των αρχικών και τελικών επαφών’ και ‘ο αριθμός αεροσκαφών προς MAP’.
- Ο αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών δεν εμφανίζεται να έχει επίδραση στην έκβαση των επικοινωνιών. Με βάση όμως τα αποτελέσματα των μοντέλων της λογιστικής παλινδρόμησης και της στατιστικής ανάλυσης του κεφαλαίου 3 αναμενόταν το αντίθετο.
- Η μέθοδος αναδρομικού διαχωρισμού προσέφερε πολύ ικανοποιητικά ποσοστά επιτυχών προβλέψεων για τα περισσότερα μοντέλα. Τα χαμηλότερα ποσοστά για τις εκτός του δείγματος παρατηρήσεις είναι της τάξης του 65% (Μοντέλο A2) και τα υψηλότερα της τάξης του 90%. Για τις παρατηρήσεις εντός του δείγματος τα ποσοστά είναι αρκετά υψηλότερα. Υπενθυμίζεται πως το βασικό κριτήριο



επιλογής των δέντρων ήταν τα ποσοστά επιτυχίας εκτός του δείγματος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να απορριφθούν για κάθε ένα από τα εννέα εξεταζόμενα μοντέλα δέντρα ταξινόμησης με ποσοστά επιτυχών προβλέψεων για τις εντός του δείγματος παρατηρήσεις άνω του 85%-90%. Συμπεραίνουμε, επομένως, ότι η μέθοδος αναδρομικού διαχωρισμού είναι πολύ πιο αποτελεσματική ως μέθοδος πρόβλεψης σε σχέση με τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης.

**Πίνακας 5.5,** Συγκριτικός πίνακας προβλέψεων

Ποσοστό σωστών προβλέψεων				
Μοντέλο		Μέθοδος		
		Λογιστική παλινδρόμηση	RPM	
			Εντός δείγματος	Εντός δείγματος
A1	Επιτυχής επικοινωνία	100%	70%	66%
	Εσφαλμένη επικοινωνία	0%	80%	67%
A2	Μη απόκριση	46%	85%	65%
	Εσφαλμένη ακρόαση	83%	71%	65%
A3	Ελεγκτής	82%	89%	87%
	Πιλότος	96%	94%	94%
A4	Ελεγκτής	73%	98%	90%
	Πιλότος	95%	88%	78%
B1	Ελεγκτής	56%	74%	74%
	Πιλότος	91%	78%	74%
B2	Επιτυχής επικοινωνία	100%	66%	86%
	Εσφαλμένη επικοινωνία	0%	67%	67%
B3	Επιτυχής επικοινωνία	100%	68%	72%
	Εσφαλμένη επικοινωνία	0%	86%	77%
B4	Μη απόκριση	53%	88%	66%
	Εσφαλμένη ακρόαση	78%	88%	65%
B5	Μη απόκριση	56%	98%	71%
	Εσφαλμένη ακρόαση	81%	84%	74%

**Πίνακας 5.6**, Ποσοστό συμμετοχής μεταβλητών για τα μοντέλα της ομάδας A

	Μοντέλο A1		Μοντέλο A2		Μοντέλο A3		Μοντέλο A4	
	Ανοιχτές συνομιλίες	1	14*	43	7	0	13	1
Πολυπλοκότητα	0	15	0	11	0	13	0	14
Διάρκεια	99	2	Αφαιρέθηκε		18	3	4	8
Αφιξη	7	13	0	11	88	2	100	1
Αναχώρηση	100	1	0	11	0	13	0	14
Μεταφορά επικοινωνίας	31	6	0	11	100	1	17	2
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	32	4	37	9	11	4	3	12
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	25	8	51	5	5	9	5	5
Αριθμός αεροσκαφών	20	10	41	8	3	10	3	10
Αριθμός επαφών	31	5	71	3	11	5	5	6
MAP	12	12	0	10	0	12	14	3
Αριθμός α/φ / MAP	28	7	66	4	5	8	8	4
Αριθμός επαφών / MAP	35	3	50	6	8	6	4	7
Κατάληψη ρ/σ τομέα	24	9	85	2	2	11	3	11
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	13	11	100	1	7	7	3	9

\* σειρά κατάταξης μεταβλητών

**Πίνακας 5.7**, Ποσοστό συμμετοχής μεταβλητών για τα μοντέλα της ομάδας B

	Μοντέλο B1		Μοντέλο B2		Μοντέλο B3		Μοντέλο B4		Μοντέλο B5	
	Ανοιχτές συνομιλίες	0	15*	0	13	3	8	9	10	18
Πολυπλοκότητα	3	7	0	12	1	13	3	11	0	12
Διάρκεια	23	4	100	1	62	4	38	7	33	6
Αφιξη	100	1	0	13	100	1	Αφαιρέθηκε		0	13
Αναχώρηση	78	2	0	13	64	3	Αφαιρέθηκε		0	13
Μεταφορά επικοινωνίας	47	3	75	2	69	2	2	12	0	13
Σύνολο αφικνουμένων α/φ	1	11	23	3	4	7	100	1	40	4
Σύνολο αναχωρούντων α/φ	1	14	19	5	3	9	49	5	33	7
Αριθμός αεροσκαφών	1	9	15	8	20	6	34	8	41	3
Αριθμός επαφών	1	13	22	4	3	10	75	2	31	8
MAP	1	12	6	11	0	15	20	9	7	11
Αριθμός α/φ / MAP	2	8	14	10	22	5	40	6	43	2
Αριθμός επαφών / MAP	1	10	16	7	1	11	55	4	34	5
Κατάληψη ρ/σ τομέα	4	5	16	6	0	14	58	3	31	9
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος	4	6	14	9	1	12	Αφαιρέθηκε		100	1

\* σειρά κατάταξης μεταβλητών

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων και παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες που επιδρούν στην πρόκληση εσφαλμένων επικοινωνιών. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση του CPDLC στην αποτελεσματικότητα του συστήματος επικοινωνίας. Τέλος, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την έκβαση των συνομιλιών.

### 6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας συμπεραίνουμε πως η επιτυχής ή μη έκβαση των συνομιλιών μεταξύ πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας εξαρτάται πρωτίστως από το περιεχόμενο του μηνύματος και το φόρτο εργασίας των ελεγκτών. Η επιρροή των μεγεθών αυτών εκφράζεται μέσα από τη σημαντικότητα των μεταβλητών ‘μεταφορά της επικοινωνίας’, ‘άφιξη του αεροσκάφους’ και ‘κατάληψη της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’ στην ανάπτυξη των πιθανοτικών μοντέλων που παρουσιάστηκαν. Επίσης, σημαντική είναι η επίδραση του μεγέθους και της σύνθεσης της εναέριας κυκλοφορίας, όπως αυτή περιγράφεται από τις μεταβλητές ‘αριθμός των αφικνουμένων αεροσκαφών’, ‘αριθμός των αρχικών και τελικών επαφών’ και ‘αριθμός αεροσκαφών προς MAP’. Από τις υπόλοιπες μεταβλητές ξεχωρίζουν η ‘διάρκεια του μηνύματος’ και ο ‘αριθμός των ανοιχτών συνομιλιών’.

Όσον αφορά τη χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία, συμπεραίνουμε πως η μη-παραμετρική μέθοδος του αναδρομικού διαχωρισμού, ενδείκνυται για την ανάπτυξη πιθανοτικών μοντέλων με υψηλά ποσοστά επιτυχών προβλέψεων. Ωστόσο, δεν προσφέρει πάντα ικανοποιητικές πληροφορίες σχετικά με την επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών, διότι η μαθηματική διατύπωση των αναπτυσσόμενων μοντέλων είναι σύνθετη. Αντίθετα, η μέθοδος της λογιστικής παλινδρόμησης, είναι πιο εύχρηστη για την ανάλυση της επίδρασης των ανεξάρτητων μεταβλητών στην έκβαση της εξαρτημένης, αλλά μειονεκτεί ως προς τα αποτελέσματα των προβλέψεων.

## 6.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων στα πλαίσια του συστήματος CPDLC

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το μόνο κέντρο ελέγχου στο οποίο λειτουργεί το σύστημα CPDLC είναι το Maastricht Upper Area Control Centre. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα γίνει σύμφωνα με τα στοιχεία του προγράμματος της EUROCONTROL, LINK 2000+, το οποίο είναι υπεύθυνο για την εφαρμογή, λειτουργία και ανάπτυξη του CPDLC στο Μάαστριχτ καθώς και στην υπόλοιπη Ευρώπη.

Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά (EUROCONTROL, 2008), το 51,6% των μηνυμάτων που στάλθηκαν εντός του 2007 αφορούν στη ραδιοσυχνότητα στην οποία πρέπει να συντονιστεί το αεροσκάφος όταν αφίχθει στον επόμενο τομέα. Η παρούσα διπλωματική εργασία έδειξε πως στο φωνητικό σύστημα επικοινωνίας τα μηνύματα αυτά αποτελούν τον κύριο παράγοντα πρόκλησης εσφαλμένων συνομιλιών και ευθύνονται για το 52% των σφαλμάτων σε μηνύματα που λαμβάνονται από τους πιλότους. Το αντίστοιχο ποσοστό για το σύνολο των εσφαλμένων επικοινωνιών είναι 36%. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ποσοστό αυτό υπολογίζεται πως είναι μεγαλύτερο στον ευρωπαϊκό εναέριο χώρο, διότι η συχνότητα VHF είναι διαιρεμένη σε περισσότερα τμήματα μέσω της χρήσης τρίτου δεκαδικού ψηφίου. Στις ΗΠΑ τα δεκαδικά ψηφία των ραδιοσυχνοτήτων είναι δύο.

Η δεύτερη συχνότερη κατηγορία μηνυμάτων που ανταλλάχθηκαν μέσω του CPDLC αφορούν σε άδειες πορείας (24,1 %) και η τρίτη σε άδειες υψομέτρου πτήσης (15,8%). Αναφορά στο υψόμετρο πτήσης γίνεται σε κάθε μήνυμα που αποστέλλεται από τον πιλότο προς το κέντρο ελέγχου μετά την είσοδο του αεροσκάφους στον τομέα. Η άφιξη του αεροσκάφους στον τομέα αποτελεί σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης το δεύτερο σημαντικότερο παράγοντα πρόκλησης εσφαλμένων συνομιλιών και ευθύνεται για το 63% των σφαλμάτων σε μηνύματα που λαμβάνονται από τους ελεγκτές και για το 20 % των συνολικών εσφαλμένων συνομιλιών. Στα ωφέλη ως προς την ασφάλεια των επικοινωνιών πρέπει να προστεθεί και η μείωση των σφαλμάτων που προκαλούνται λόγω των υψηλών ποσοστών κατάληψης των ραδιοσυχνοτήτων.

Συμπεραίνουμε επομένως πως η επέκταση της εφαρμογής του CPDLC στο σύνολο των αεροσκαφών και των κέντρων ελέγχου θα οδηγήσει σε άμεση μείωση των εσφαλμένων επικοινωνιών σε ποσοστό της τάξης του 50%, καθώς η αποστολή

των φωνητικών μηνυμάτων αμέσως μετά την είσοδο του αεροσκάφους στο τομέα και πριν την αναχώρηση του από αυτόν θα αντικατασταθεί μέσω του CPDLC από τις υπηρεσίες ACM και ACL. Η εγκατάσταση του CPDLC στα αεροσκάφη προβλέπεται να ολοκληρωθεί στα τέλη της επόμενης δεκαετίας. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται πως το 2016, στο 90% των εμπορικών πτήσεων στον ευρωπαϊκό εναέριο πτήση θα γίνεται χρήση του συστήματος. Χρονοδιάγραμμα για την εγκατάσταση του CPDLC στα κέντρα ελέγχου δεν υπάρχει, διότι η εγκατάσταση του αποτελεί εθνική επιλογή και δεν επιβάλλεται από τα διεθνή πρότυπα.

### 6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάστηκε η έκβαση των συνομιλιών μεταξύ πιλότων και ελεγκτών εναέριας κυκλοφορίας μέσω της ανάπτυξης πιθανοτικών μοντέλων. Επίσης, μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα του συστήματος επικοινωνίας ύστερα από την εφαρμογή του CPDLC. Από την στατιστική επεξεργασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, διατυπώνονται οι ακόλουθες προτάσεις οι οποίες χρήζουν περαιτέρω μελέτης:

- Η διερεύνηση των χρονικών διαστημάτων πριν και μετά την αποστολή των μηνυμάτων για τα οποία μεγιστοποιείται η επίδραση της μεταβλητής ‘ποσοστό κατάληψης της ραδιοσυχνότητας ανά μήνυμα’ στην έκβαση των συνομιλιών. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας έρευνας θα συμβάλουν στη μελέτη και την αξιολόγηση των χρονικών περιθωρίων ασφαλείας του συστήματος CPDLC καθώς και του συστήματος ειδοποίησης εμπλοκής.
- Η χρήση του είδους των αδειών και των πληροφοριών που αποστέλλονται ως ανεξάρτητες δυαδικές μεταβλητές για την ανάπτυξη πιθανοτικών μοντέλων μέσω της Μεθοδολογίας Αναδρομικού Διαχωρισμού. Η συμμετοχή των μεταβλητών αυτών αναμένεται να βελτιώσει την ικανότητα των δέντρων ταξινόμησης να προβλέπουν επιτυχώς την έκβαση των συνομιλιών.
- Η κατασκευή αλγορίθμου για τον υπολογισμό του βαθμού πολυπλοκότητας ενός τομέα και η εκτίμηση της επίδρασης του στο φόρτο εργασίας ελεγκτών και πιλότων.

- 
- Η εκπόνηση διεθνούς έρευνας σε κέντρα ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας με μεγάλο ποσοστό διεθνών πτήσεων με αντικείμενο την εξέταση της επίδρασης της χρήσης της αγγλικής γλώσσας στην έκβαση των συνομιλιών.
  - Η διερεύνηση της χρήσης δειγμάτων με ίσους αριθμούς παρατηρήσεων για κάθε ένα εκ των δύο εναλλακτικών ενδεχομένων ως ενδεικνυόμενη μέθοδο βελτίωσης των προβλέψεων μέσω της μεθόδου της Λογιστικής Παλινδρόμησης.

---

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Agresti, A., 1996, *An introduction to categorical data analysis*, New York.
- Bolic, T., Rakas, J. and Hansen, M., 2005, “Controller-Pilot Radio Channel Utilization and Cognitive Issues”, Paper No. 90, *Sixth FAA/EUROCONTROL Seminar on ATM Research and Development*, Baltimore, MD, June 23-30.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., and Stone, C. J., 1984, *Classification and regression trees*, Chapman and Hall, New York.
- Bürki-Cohen, J., 1995, “An Analysis of Tower (Ground) Controller-Pilot Voice Communications”, report DOT/FAA/AR-96/19, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Cardosi, K.M., 1993, “An Analysis of En-Route Controller-Pilot Voice Communications”, report DOT/FAA/RD-93/11, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Cardosi, K.M., 1994. “An analysis of Tower (Local) Controller-Pilot Voice Communications”, report DOT/FAA/RD-94/15, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Cardosi, K. M., Falzarano, P. and Han, S., 1996, “An Analysis of TRACON (Terminal Radar Approach Control) Controller - Pilot Voice Communications”, report DOT/FAA/AR-96/66, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Cardosi, K. M., Falzarano, P. and Han, S., 1998, “Pilot-Controller Communication Errors: An Analysis of Aviation Safety Reporting System (ASRS) Reports”, report DOT/FAA/AR-98/17, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Cardosi, K. M. and Yost, A., 2001, “Controller and Pilot Error in Airport Operations: A Review of Previous Research and Analysis of Safety Data”, report DOT/FAA/AR-00/51, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Eurocontrol, 2004, *LINK 2000+ Cost Benefit Analysis Review*, Brussels, Belgium

- 
- Eurocontrol, 2004, Air-ground communication study, an analysis of pilot-controller occurrences, Brussels, Belgium
- Eurocontrol, 2006, ATC Data Link Manual for Link 2000+ Services, Brussels, Belgium
- Karlaftis, M., 2004, “Predicting Mode Choice through Multivariate Recursive Partitioning”, *The Journal of Transportation Engineering*, 130(2), 245-250.
- Linter, T. and Buckles, J., 1993, “Why Can't We Talk to Each Other?”, *Journal of Air Traffic Control*, January-March.
- Lozito, S., Martin, L., Dunbar, M., McGann, A. and Verma, S., 2003, “The Impact of Voice, Data Link, and Mixed Air Traffic Control Environments on Flight Deck Procedures”, Fifth *FAA/EUROCONTROL Seminar on ATM Research and Development*, Budapest, Hungary, June 23-27.
- Menard, S., 2002, *Applied logistic regression analysis*, (2nd Edition)(Quantitative Applications in the Social Sciences, No. 106.
- Rakas, J., Hansen, M., Jirajaruporn, W. and Bolic, T., 2003, “User Request Evaluation Tool (URET) and Controller-Pilot Data link Communications (CPDLC) Integration Benefits Assessment,” *Transportation Research Record* 1850, 20-29.
- Rakas, J. and Yang, S., 2007, “Analysis of Multiple Open Message Transactions and Controller-Pilot Miscommunications”, Seventh *FAA/EUROCONTROL Seminar on ATM Research and Development*, Barcelona, Spain, July 03-05.
- Rodgers, M., 1993, “An Examination of the Operational Error Database for Air Traffic Control Centers”, Report No. DOT/FAA/AM-93/22, Washington DC, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Tallota et al., 1990, “Operational Evolution of Initial Data Link Air Traffic Control Services”, Report No. DOT/FAA/CT-90/1, Washington DC, US Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- Waller, M.C. and Lohr, G.W., 1989, “A Pilot Simulation of Data Link ATC Message Exchange”, NASA Technical Paper 2859, Hampton, VA, NASA Langley Research Center.



Washington, S., 2000, “Iteratively specified tree-based regression: theory and trip generation example”, *The Journal of Transportation Engineering*, 126(6), 482–491.

Washington, S., and Wolf, J., 1997, “Hierarchical tree-based regression: theory and example applied to trip generation”, *Transportation Research Record 1581*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 82–88.

[http://www.skybrary.aero/index.php/ICAO\\_SHELL\\_Model](http://www.skybrary.aero/index.php/ICAO_SHELL_Model)

[http://www.faa.gov/airports\\_airtraffic/air\\_traffic/publications/atpubs/FAC/Ch17/chp17toc.htm](http://www.faa.gov/airports_airtraffic/air_traffic/publications/atpubs/FAC/Ch17/chp17toc.htm)

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

Πίνακας Π.Α. 1, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Α1

Μοντέλο Α1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Έκβαση επικοινωνίας (A)	1,00															
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	0,05	1,00														
Πολυπλοκότητα (C)	-0,02	-0,05	1,00													
Διάρκεια (D)	0,08	0,00	0,48	1,00												
Αφιξη (E)	0,06	0,00	0,02	0,12	1,00											
Αναχώρηση (F)	-0,08	0,00	0,06	-0,14	-0,14	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (G)	0,05	0,01	0,00	0,09	-0,22	0,61	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (H)	0,04	0,17	-0,04	0,04	0,01	0,02	0,04	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (I)	0,02	0,10	-0,02	0,02	-0,01	0,06	0,07	0,89	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (J)	0,04	0,17	-0,06	0,05	0,03	-0,06	-0,03	0,52	0,08	1,00						
Αριθμός επαφών (K)	0,03	0,14	-0,03	0,03	0,00	0,04	0,06	0,98	0,97	0,32	1,00					
MAP (L)	0,02	0,08	0,06	0,03	0,03	0,02	0,04	0,17	0,01	0,35	0,10	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (M)	0,04	0,14	-0,09	0,04	0,02	-0,07	-0,04	0,49	0,08	0,93	0,31	0,00	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (N)	0,02	0,11	-0,05	0,02	-0,01	0,03	0,05	0,90	0,94	0,22	0,94	-0,20	0,31	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (O)	0,02	0,09	-0,04	0,06	-0,03	-0,04	-0,06	0,40	0,18	0,55	0,31	-0,18	0,65	0,37	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (P)	0,03	0,17	-0,03	0,07	-0,05	-0,02	-0,04	0,43	0,24	0,49	0,36	-0,16	0,59	0,40	0,79	1,00

**Πίνακας Π.Α. 2,** Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Α2

Μοντέλο Α2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Τύπος σφάλματος (A)	1,00															
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	-0,17	1,00														
Πολυπλοκότητα (C)	0,03	-0,08	1,00													
Διάρκεια (D)	0,08	0,05	0,41	1,00												
Άφιξη (E)	0,02	0,05	-0,01	-0,12	1,00											
Αναχώρηση (F)	0,05	-0,02	0,06	-0,07	-0,03	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (G)	0,14	-0,01	-0,07	0,30	-0,45	0,07	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (H)	-0,15	0,13	-0,13	0,01	0,04	0,02	0,07	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (I)	-0,08	0,02	-0,11	0,00	-0,03	0,06	0,14	0,89	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (J)	-0,16	0,25	-0,08	0,03	0,16	-0,07	-0,13	0,47	0,01	1,00						
Αριθμός επαφών (K)	-0,12	0,08	-0,13	0,00	0,01	0,04	0,11	0,98	0,97	0,26	1,00					
MAP (L)	0,03	0,12	0,17	0,13	0,03	0,03	0,06	0,19	0,06	0,31	0,13	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (M)	-0,20	0,20	-0,16	0,00	0,14	-0,09	-0,16	0,40	-0,02	0,91	0,21	-0,08	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (N)	-0,14	0,03	-0,19	-0,03	-0,01	0,02	0,09	0,88	0,93	0,14	0,93	-0,20	0,22	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (O)	-0,24	0,12	-0,08	-0,02	0,00	-0,04	-0,14	0,39	0,16	0,54	0,29	-0,24	0,67	0,37	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (P)	-0,28	0,20	-0,09	-0,02	0,03	-0,07	-0,17	0,44	0,23	0,51	0,35	-0,18	0,60	0,40	0,81	1,00

**Πίνακας Π.Α. 3,** Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Α3

Μοντέλο Α3	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Παραλήπτης (A)	1,00															
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	-0,05	1,00														
Πολυπλοκότητα (C)	-0,02	-0,11	1,00													
Διάρκεια (D)	0,20	0,00	0,41	1,00												
Αφιξη (E)	-0,78	-0,04	0,05	-0,17	1,00											
Αναχώρηση (F)	-0,10	-0,02	0,08	-0,10	-0,04	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (G)	0,64	0,02	-0,11	0,30	-0,52	0,08	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (H)	-0,12	0,16	-0,10	0,06	0,05	0,03	0,04	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (I)	-0,08	0,07	-0,07	0,03	0,00	0,08	0,07	0,89	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (J)	-0,11	0,21	-0,09	0,09	0,11	-0,09	-0,05	0,54	0,10	1,00						
Αριθμός επαφών (K)	-0,10	0,12	-0,09	0,05	0,02	0,05	0,05	0,98	0,97	0,35	1,00					
MAP (L)	-0,04	0,06	0,10	0,12	0,07	0,04	0,12	0,26	0,11	0,37	0,19	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (M)	-0,08	0,19	-0,16	0,06	0,06	-0,10	-0,10	0,45	0,05	0,91	0,27	-0,03	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (N)	-0,10	0,09	-0,14	0,00	0,00	0,04	0,02	0,88	0,93	0,20	0,93	-0,15	0,25	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (O)	-0,03	0,14	-0,05	0,01	-0,03	-0,04	-0,13	0,39	0,19	0,51	0,30	-0,21	0,64	0,39	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (P)	-0,04	0,22	0,00	0,09	-0,03	-0,08	-0,13	0,38	0,22	0,44	0,32	-0,18	0,54	0,37	0,78	1,00

**Πίνακας Π.Α. 4,** Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Α4

Μοντέλο Α4	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Παραλήπτης (A)	1,00														
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	-0,15	1,00													
Πολυπλοκότητα (C)	0,12	-0,04	1,00												
Διάρκεια (D)	0,11	0,12	0,41	1,00											
Αφιξη (E)	-0,77	0,16	-0,08	-0,06	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (F)	0,48	0,01	-0,02	0,29	-0,37	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (G)	0,00	0,07	-0,17	-0,03	0,04	0,17	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (H)	0,15	-0,05	-0,15	-0,02	-0,07	0,28	0,88	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (I)	-0,31	0,25	-0,06	-0,01	0,24	-0,19	0,34	-0,14	1,00						
Αριθμός επαφών (J)	0,08	0,01	-0,17	-0,03	-0,01	0,23	0,97	0,97	0,11	1,00					
MAP (K)	-0,07	0,21	0,27	0,13	-0,05	-0,04	0,11	-0,01	0,25	0,05	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (L)	-0,27	0,15	-0,15	-0,04	0,26	-0,19	0,29	-0,14	0,91	0,09	-0,15	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (M)	0,11	-0,06	-0,25	-0,04	-0,02	0,24	0,89	0,93	0,02	0,94	-0,26	0,13	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (N)	-0,06	0,02	-0,11	-0,03	0,06	-0,07	0,34	0,09	0,54	0,23	-0,29	0,66	0,31	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (O)	-0,12	0,11	-0,19	-0,11	0,14	-0,15	0,46	0,21	0,56	0,35	-0,18	0,64	0,39	0,82	1,00

**Πίνακας Π.Α. 5,** Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Β1

Μοντέλο Β1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Παραλήπτης (A)	1,00															
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	0,00	1,00														
Πολυπλοκότητα (C)	0,06	-0,05	1,00													
Διάρκεια (D)	0,17	0,00	0,48	1,00												
Αφιξη (E)	-0,35	0,00	0,02	0,12	1,00											
Αναχώρηση (F)	-0,37	0,00	0,06	-0,14	-0,14	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (G)	0,02	0,01	0,00	0,09	-0,22	0,61	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (H)	0,00	0,17	-0,04	0,04	0,01	0,02	0,04	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (I)	-0,01	0,10	-0,02	0,02	-0,01	0,06	0,07	0,89	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (J)	0,01	0,17	-0,06	0,05	0,03	-0,06	-0,03	0,52	0,08	1,00						
Αριθμός επαφών (K)	0,00	0,14	-0,03	0,03	0,00	0,04	0,06	0,98	0,97	0,32	1,00					
MAP (L)	0,01	0,08	0,06	0,03	0,03	0,02	0,04	0,17	0,01	0,35	0,10	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (M)	0,01	0,14	-0,09	0,04	0,02	-0,07	-0,04	0,49	0,08	0,93	0,31	0,00	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (N)	0,00	0,11	-0,05	0,02	-0,01	0,03	0,05	0,90	0,94	0,22	0,94	-0,20	0,31	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (O)	-0,01	0,09	-0,04	0,06	-0,03	-0,04	-0,06	0,40	0,18	0,55	0,31	-0,18	0,65	0,37	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (P)	-0,01	0,17	-0,03	0,07	-0,05	-0,02	-0,04	0,43	0,24	0,49	0,36	-0,16	0,59	0,40	0,79	1,00

**Πίνακας Π.Α. 6,** Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Β2

Μοντέλο Β2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Έκβαση επικοινωνίας (A)	1,00															
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	0,03	1,00														
Πολυπλοκότητα (C)	-0,02	-0,05	1,00													
Διάρκεια (D)	0,07	0,01	0,53	1,00												
Αφιξη (E)	-0,01	0,01	0,00	0,02	1,00											
Αναχώρηση (F)	-0,01	0,02	0,00	-0,02	0,00	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (G)	0,16	0,02	-0,09	0,28	-0,02	0,00	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (H)	0,04	0,16	-0,04	0,06	-0,03	-0,02	0,05	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (I)	0,04	0,10	-0,02	0,04	-0,03	-0,01	0,05	0,89	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (J)	0,01	0,17	-0,05	0,07	-0,01	-0,03	0,02	0,51	0,07	1,00						
Αριθμός επαφών (K)	0,04	0,14	-0,03	0,05	-0,03	-0,02	0,05	0,98	0,97	0,32	1,00					
MAP (L)	0,01	0,08	0,09	0,03	0,00	0,01	0,03	0,17	0,01	0,35	0,10	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (M)	0,01	0,14	-0,09	0,06	-0,01	-0,03	0,01	0,48	0,08	0,93	0,30	-0,01	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (N)	0,04	0,11	-0,06	0,04	-0,03	-0,02	0,05	0,90	0,94	0,21	0,94	-0,20	0,30	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (O)	0,02	0,09	-0,04	0,10	-0,02	-0,03	-0,05	0,40	0,18	0,54	0,31	-0,18	0,64	0,36	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (P)	0,03	0,17	-0,03	0,12	0,00	-0,01	-0,04	0,43	0,24	0,49	0,35	-0,16	0,58	0,39	0,79	1,00



**Πίνακας Π.Α. 7, Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Β3**

Μοντέλο Β3	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Έκβαση επικοινωνίας (A)	1,00															
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	0,07	1,00														
Πολυπλοκότητα (C)	-0,01	-0,07	1,00													
Διάρκεια (D)	0,08	-0,02	0,39	1,00												
Άφιξη (E)	0,18	-0,01	0,08	0,30	1,00											
Αναχώρηση (F)	-0,09	0,00	0,16	-0,12	-0,31	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (G)	-0,09	0,01	0,13	-0,14	-0,32	0,95	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (H)	0,05	0,18	-0,04	0,01	0,01	0,03	0,04	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (I)	0,02	0,11	-0,01	0,00	-0,01	0,08	0,09	0,89	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (J)	0,08	0,17	-0,08	0,03	0,05	-0,09	-0,08	0,52	0,08	1,00						
Αριθμός επαφών (K)	0,04	0,15	-0,03	0,00	0,00	0,06	0,06	0,98	0,97	0,33	1,00					
MAP (L)	0,03	0,08	0,01	0,03	0,04	0,03	0,04	0,17	0,01	0,35	0,10	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (M)	0,07	0,14	-0,09	0,01	0,04	-0,10	-0,09	0,50	0,08	0,93	0,31	0,00	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (N)	0,03	0,12	-0,03	-0,01	-0,01	0,05	0,06	0,90	0,94	0,22	0,94	-0,20	0,31	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (O)	0,02	0,09	-0,05	0,01	-0,05	-0,06	-0,06	0,41	0,18	0,55	0,31	-0,18	0,65	0,37	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (P)	0,04	0,18	-0,04	0,02	-0,09	-0,04	-0,05	0,44	0,24	0,50	0,36	-0,15	0,59	0,40	0,79	1,00

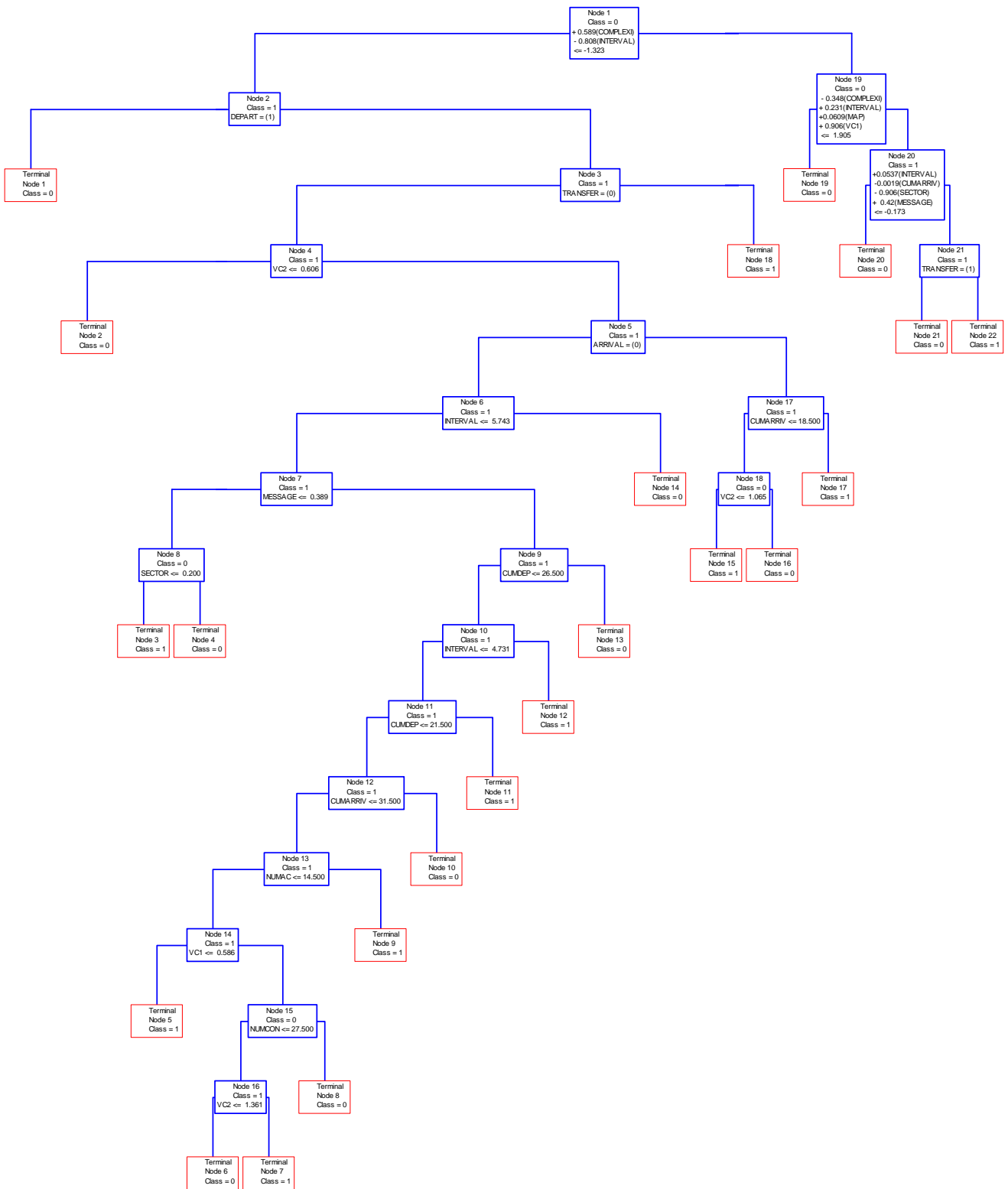
**Πίνακας Π.Α. 8,** Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Β4

Μοντέλο Β4	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Τύπος σφάλματος (A)	1,00													
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	-0,12	1,00												
Πολυπλοκότητα (C)	-0,02	-0,04	1,00											
Διάρκεια (D)	0,10	0,06	0,33	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (E)	0,22	0,07	-0,14	0,34	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (G)	-0,19	0,08	-0,10	0,04	0,16	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (G)	-0,16	-0,01	-0,13	-0,01	0,18	0,91	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (H)	-0,10	0,21	0,04	0,13	-0,01	0,41	-0,02	1,00						
Αριθμός επαφών (I)	-0,18	0,04	-0,12	0,02	0,17	0,98	0,97	0,21	1,00					
MAP (J)	0,03	0,14	0,24	0,18	0,13	0,19	0,08	0,28	0,14	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (K)	-0,13	0,13	-0,08	0,07	-0,09	0,32	-0,06	0,90	0,14	-0,14	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (L)	-0,20	-0,01	-0,20	-0,02	0,14	0,89	0,93	0,10	0,93	-0,19	0,17	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (M)	-0,23	0,06	0,01	0,04	-0,17	0,32	0,11	0,52	0,22	-0,24	0,65	0,30	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (N)	-0,25	0,14	-0,02	0,02	-0,19	0,38	0,19	0,50	0,29	-0,19	0,58	0,34	0,82	1,00

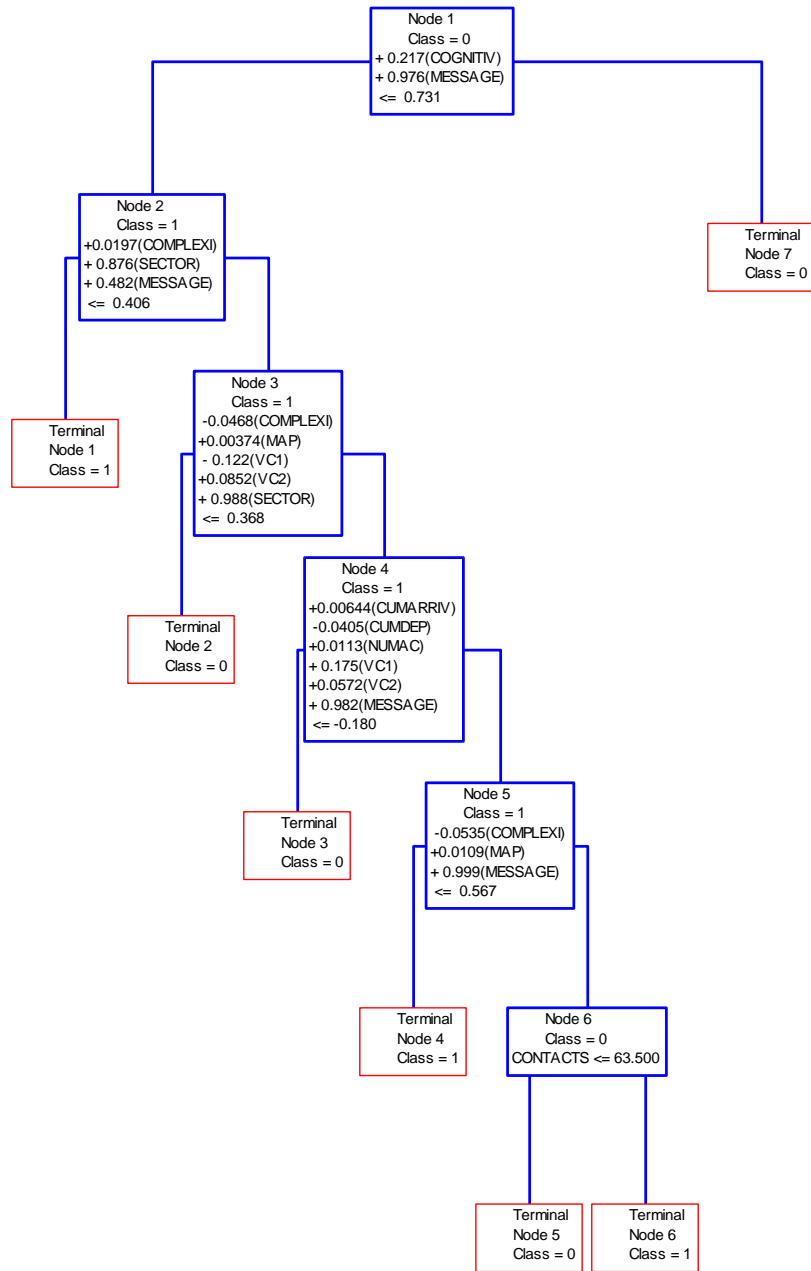
**Πίνακας Π.Α. 9,** Συσχέτιση των μεταβλητών στο Μοντέλο Β5

Μοντέλο Β5	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Τύπος σφάλματος (A)	1,00															
Ανοιχτές συνομιλίες (B)	-0,25	1,00														
Πολυπλοκότητα (C)	0,14	-0,14	1,00													
Διάρκεια (D)	0,04	0,07	0,59	1,00												
Αφιξη (E)	0,02	-0,05	0,08	0,01	1,00											
Αναχώρηση (F)	0,08	-0,05	0,11	-0,09	-0,15	1,00										
Μεταφορά επικοινωνίας (G)	0,08	-0,05	0,11	-0,09	-0,15	1,00	1,00									
Σύνολο αφικνουμένων α/φ (H)	-0,07	0,22	-0,21	-0,02	-0,03	0,02	0,02	1,00								
Σύνολο αναχωρούντων α/φ (I)	0,08	0,09	-0,08	0,00	-0,05	0,11	0,11	0,86	1,00							
Αριθμός αεροσκαφών (J)	-0,28	0,28	-0,27	-0,05	0,03	-0,14	-0,14	0,57	0,07	1,00						
Αριθμός επαφών (K)	0,00	0,17	-0,15	-0,01	-0,04	0,06	0,06	0,97	0,96	0,35	1,00					
MAP (L)	0,01	0,07	0,00	0,06	-0,04	0,05	0,05	0,19	0,00	0,36	0,11	1,00				
Αριθμός α/φ / MAP (M)	-0,32	0,27	-0,28	-0,06	0,06	-0,16	-0,16	0,53	0,08	0,93	0,34	0,01	1,00			
Αριθμός επαφών / MAP (N)	0,00	0,12	-0,18	-0,05	-0,04	0,04	0,04	0,87	0,93	0,22	0,93	-0,23	0,31	1,00		
Κατάληψη ρ/σ τομέα (O)	-0,27	0,20	-0,25	-0,12	-0,08	-0,07	-0,07	0,53	0,29	0,57	0,43	-0,26	0,71	0,51	1,00	
Κατάληψη ρ/σ μηνύματος (P)	-0,33	0,29	-0,21	-0,06	-0,06	-0,13	-0,13	0,54	0,34	0,52	0,47	-0,19	0,63	0,52	0,79	1,00

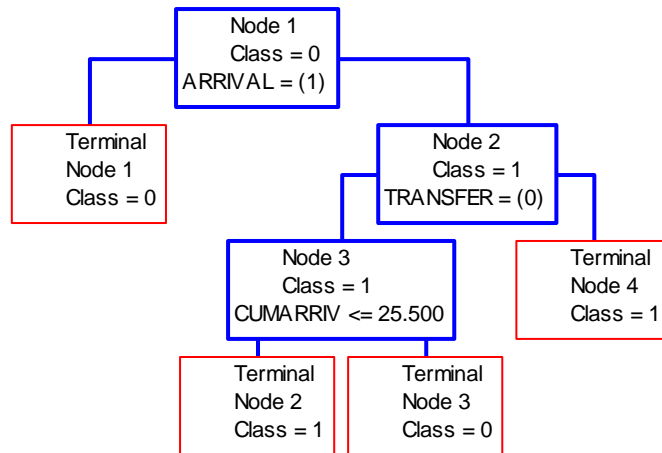
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**



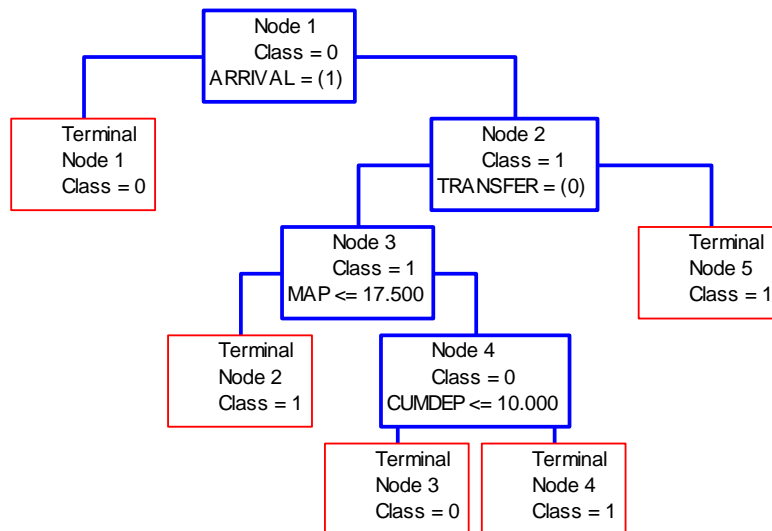
Σχήμα Π.Β. 1, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου Α1



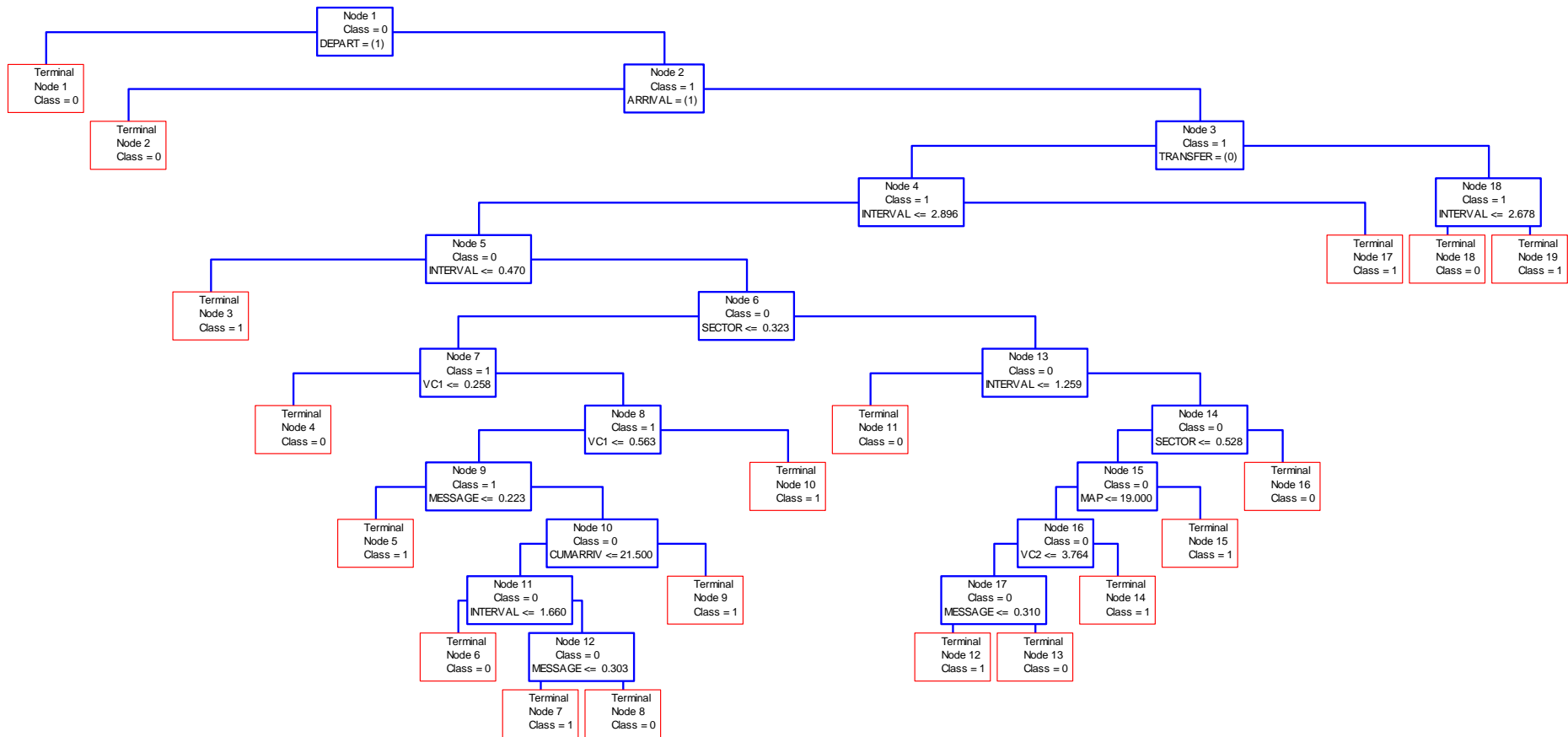
Σχήμα Π.Β. 2, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου Α2



Σχήμα Π.Β. 3, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου Α3

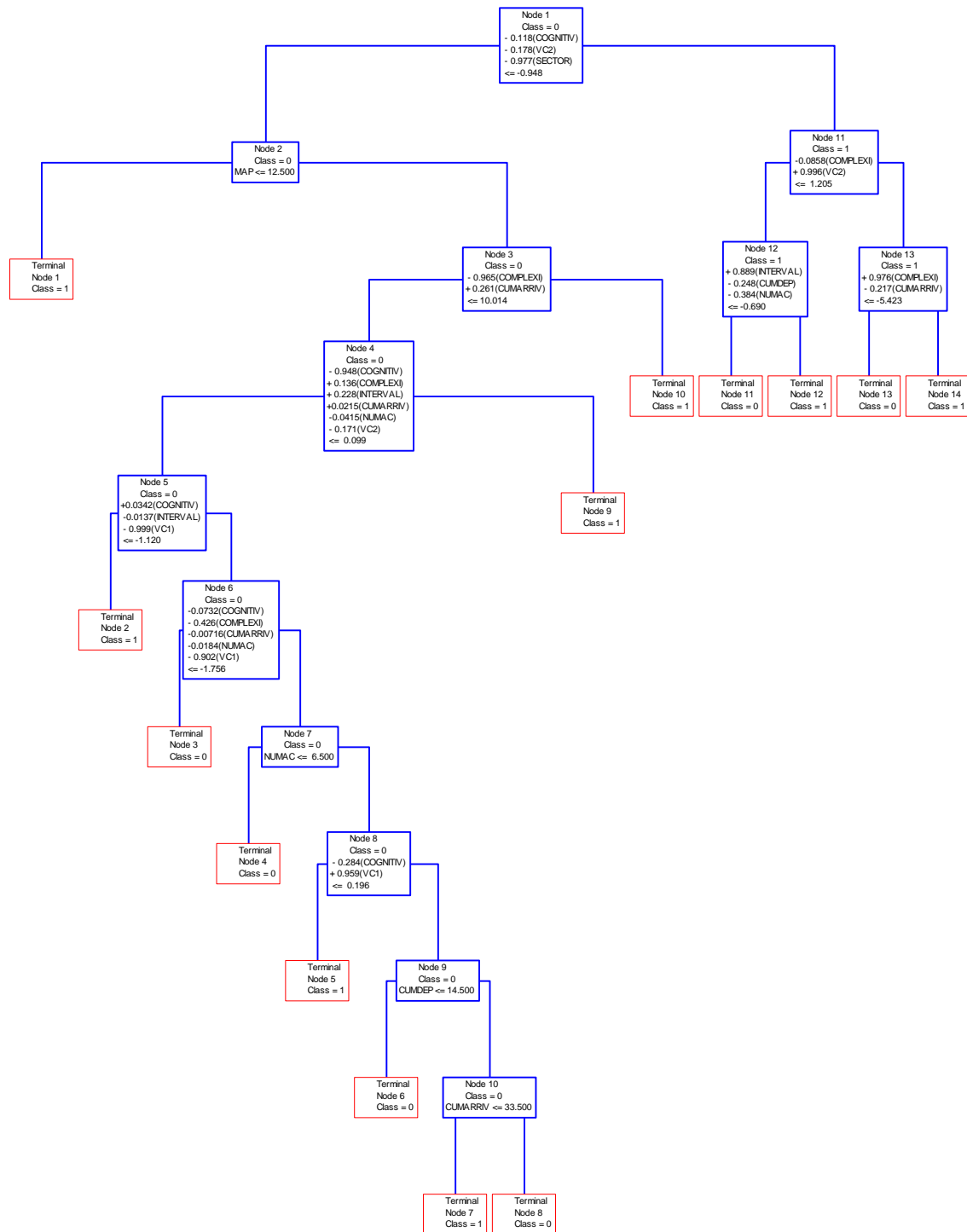


Σχήμα Π.Β. 4, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου Α4

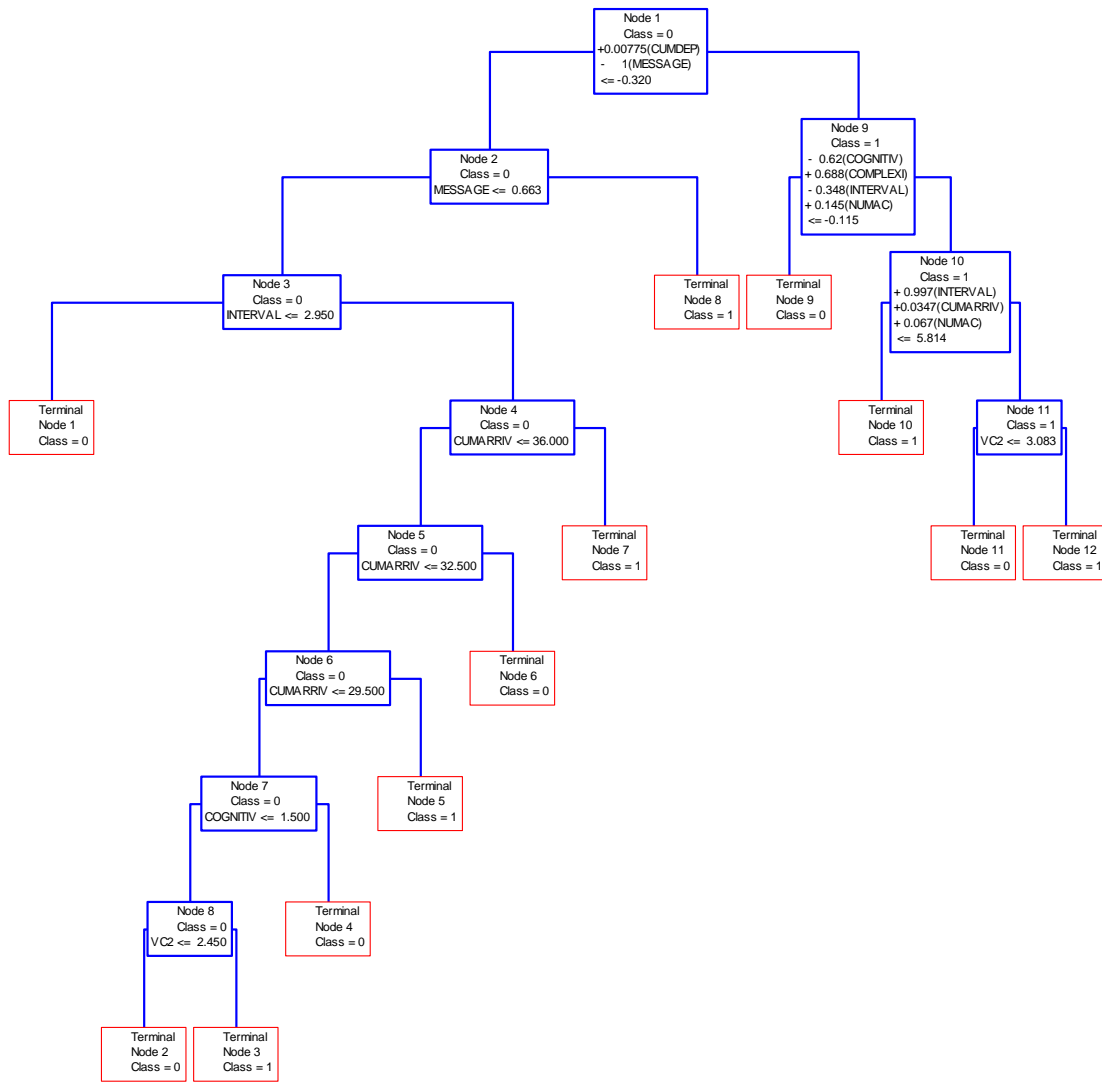


Σχήμα Π.Β. 5, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου Β1





Σχήμα Π.Β. 6, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου Β4



Σχήμα Π.Β. 7, Μη παραμετρικό δέντρο ταξινόμησης Μοντέλου Β5