



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη Συστήματος Προληπτικής Συντήρησης για
Μαχητικό Αεροσκάφος της Πολεμικής Αεροπορίας**

Πουρνάρας Κωνσταντίνος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ζηκόπουλος Χρήστος

ΠΑΤΡΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή/της φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο/Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**Ανάπτυξη Συστήματος Προληπτικής Συντήρησης για
Μαχητικό Αεροσκάφος της Πολεμικής Αεροπορίας**

Πουρνάρας Κωνσταντίνος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Ζηκόπουλος Χρήστος	Συν-επιβλέπων Καθηγητής: Τριανταφύλλου Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης	Επίκουρος Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πειραιά

ΠΑΤΡΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ, 2026

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει την εφαρμογή μεθόδων εκτίμησης επικινδυνότητας σε κρίσιμα εξαρτήματα μαχητικού αεροσκάφους της Πολεμικής Αεροπορίας, με σκοπό την πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών και την ανάπτυξη ενός συστήματος προληπτικής συντήρησης για το αεροσκάφος και τα εξεταζόμενα συστήματά του. Κύριο εργαλείο αποτελεί το Εγχειρίδιο της Πολεμικής Αεροπορίας ΕΠΑ Γ-3, το οποίο περιγράφει αναλυτικά την εκτίμηση επικινδυνότητας για δεδομένες αστοχίες εξαρτημάτων, με την εφαρμογή ανάλυσης Weibull, και προσφέρει το πεδίο για βελτίωση της πολιτικής συντήρησης αυτών.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται η περιγραφή του προβλήματος και εξηγείται συνοπτικά η μεθοδολογία ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία, με αναφορά στη δομή της. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται βασικές έννοιες, όπως η συντήρηση των αεροσκαφών, τόσο σε γενικό πλαίσιο όσο και στην Πολεμική Αεροπορία, καθώς και το κόστος ποιότητας που προκύπτει από τις αλλαγές στα συστήματα ποιότητας. Αναλύεται η μεθοδολογία εκτίμησης της επικινδυνότητας που ακολουθεί το ΕΠΑ Γ-3, στην οποία θα στηριχθεί η ανάλυση των δεδομένων, με κύριο γνώμονα την κατανομή Weibull και τον υπολογισμό των παραμέτρων της. Επιπλέον, παρουσιάζονται συνοπτικά εναλλακτικές κατανομές αξιοπιστίας, όπως η Exponential και η Lognormal, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη συγκριτική αξιολόγηση της καταλληλότητας των στατιστικών μοντέλων που εφαρμόζονται στα δεδομένα αστοχιών.

Στο Κεφάλαιο 3 της εργασίας περιγράφεται η μεθοδολογία της ανάλυσης, καθώς παρουσιάζεται η πολιτική συντήρησης των Α/Φ Rafale, το υδραυλικό σύστημα και το σύστημα καυσίμου αυτού, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 4 εξετάζονται όλα τα δεδομένα αστοχιών και μη, που συλλέχθηκαν για τις αντλίες υδραυλικού και αντλίες καυσίμου του αεροσκάφους, και γίνεται προσπάθεια εκτίμησης της επικινδυνότητάς τους με βάση τους μηχανισμούς αστοχίας που εξετάζονται, ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών και την πολιτική συντήρησής τους. Επιπρόσθετα γίνεται προσπάθεια σύνδεσης των προτεινόμενων αλλαγών στην πολιτική συντήρησης με το κόστος που αυτές ενδέχεται να επιφέρουν, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση της προτεινόμενης πολιτικής συντήρησης με την ήδη υπάρχουσα και αιτιολογείται η

χρήση της κατανομής Weibull στην ανάλυση έναντι των έτερων κατανομών αξιοπιστίας.

Τέλος, παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας.

Development of a preventive maintenance system for a fighter aircraft of Hellenic Air Force

Konstantinos Pournaras

Abstract

This thesis describes the application of risk assessment methods to critical components of a fighter aircraft of the Hellenic Air Force, aiming to predict future failures and develop a preventive maintenance system for the aircraft and its examined subsystems. The primary tool employed is the Hellenic Air Force Manual EPA C-3, which provides a detailed methodology for risk assessment of component failures through the application of Weibull analysis and offers a framework for improving maintenance policies.

Chapter 1 presents the problem under investigation and briefly explains the analytical methodology that will be used throughout the study, while also providing an overview of the structure of the thesis. Chapter 2 introduces the fundamental concepts of aircraft maintenance, both in a general framework and within the Hellenic Air Force, as well as the concept of quality cost associated with modifications to quality and maintenance systems. Furthermore, the risk assessment methodology described in EPA C-3 is analyzed, forming the basis of the present study, with particular emphasis on the Weibull distribution and the estimation of its parameters. In addition, alternative reliability distributions, namely the Exponential and Lognormal distributions, are presented and examined as benchmark models for assessing the suitability of the statistical approaches applied to the failure data.

Chapter 3 describes the research methodology, presenting the maintenance policy applied to the Rafale fighter aircraft, its hydraulic and fuel systems, and the procedures followed for data collection and analysis.

Chapter 4 examines all collected failure and non-failure data relating to the aircraft's hydraulic and fuel pumps. An effort is made to assess the risk associated with these components based on the examined failure mechanisms, in order to derive useful conclusions regarding the prediction of future failures and the optimization of maintenance policies. In addition, an attempt is made to relate the proposed maintenance policy changes to the costs that may result from their implementation.

Furthermore, the proposed maintenance policy modifications are evaluated in terms of their associated costs. A comparative analysis between the proposed and the existing maintenance policies is performed, and the selection of the Weibull distribution is justified over alternative reliability distributions based on its suitability for modeling the available failure data and supporting maintenance decision-making.

Finally, the bibliography used for the preparation of this thesis is presented.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Περιγραφή Προβλήματος	13
1.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης	14
1.3 Δομή Εργασίας	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ	18
2.1 Ορισμοί και Έννοιες Συντήρησης.....	18
2.2 Συντήρηση Αεροσκαφών στην Πολεμική Αεροπορία.....	21
2.3 Κόστος Ποιότητας και Συντήρηση Αεροσκαφών	25
2.4 Εκτίμηση Επικινδυνότητας βάσει ΕΠΑ Γ-3/2016.....	26
2.5 Κατανομή Πιθανοτήτων Weibull	30
2.5.1 Εκτίμηση Παραμέτρων Κατανομής Weibull.....	33
2.5.2 Διορθωμένη Διάμεση Βαθμίδα	35
2.5.3 Εναλλακτικές Κατανομές Αξιοπιστίας	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	37
3.1 Συντήρηση Αεροσκαφών Rafale H3R.....	37
3.1.1 Υδραυλικό Σύστημα Α/Φ Rafale H3R	39
3.1.2 Σύστημα Καυσίμου Α/Φ Rafale H3R	42
3.2 Συλλογή και Ανάλυση Δεδομένων	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ.....	47
4.1 Μελέτη Διαρροών Υδραυλικών Αντλιών Α/Φ Rafale	47
4.1.1 Καταλληλότητα Κατανομής	55
4.1.2 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων	58
4.1.3 Κόστος Αλλαγής Πολιτικής Συντήρησης	61
4.2 Μελέτη Διαρροών Αντλιών Καυσίμου Α/Φ Rafale	62
4.2.1 Καταλληλότητα Κατανομής	71
4.2.2 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων	74
4.2.3 Κόστος Αλλαγής Πολιτικής Συντήρησης	76
4.3 Τεκμηρίωση Επιλογής Κατανομής Weibull	77
4.4 Αξιολόγηση Προτεινόμενης Πολιτικής Συντήρησης	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ταξινόμηση Πιθανότητας	27
Πίνακας 2: Ταξινόμηση Δριμύτητας	28
Πίνακας 3: Εκτίμηση Επικινδυνότητας	29
Πίνακας 4: Καταγραφή Δεδομένων Αντλιών Υδραυλικού	48
Πίνακας 5: Διορθωμένη Κατάταξη Αστοχιών Υπολογισμός Διάμεσης Βαθμίδας	49
Πίνακας 6: Υπολογισμός Συντεταγμένων Σημείων Αστοχιών.....	51
Πίνακας 7: Αντιμετάθεση Συντεταγμένων για τα Δεδομένα Αστοχιών.....	51
Πίνακας 8: Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών.....	52
Πίνακας 9: Ώρες Γενικής Επισκευής και Αστοχιών Αντλιών Υδραυλικού	59
Πίνακας 10: Καταγραφή Δεδομένων Αντλιών Καυσίμου.....	62
Πίνακας 11: Διορθωμένη Κατάταξη Αστοχιών Υπολογισμός Διάμεσης Βαθμίδας ...	65
Πίνακας 12: Υπολογισμός Συντεταγμένων Σημείων Αστοχιών.....	67
Πίνακας 13: Αντιμετάθεση Συντεταγμένων για τα Δεδομένα Αστοχιών.....	67
Πίνακας 14: Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών Αντλιών Καυσίμου.....	69
Πίνακας 15: Σύγκριση Πολιτικών Συντήρησης.....	80

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Κατανομής Weibull για διαφορετικές Τιμές Παραμέτρου Σχήματος β και $\eta=1$	33
Διάγραμμα 2: Weibull Probability Plot	56
Διάγραμμα 3: Exponential Probability Plot.....	57
Διάγραμμα 4: Lognormal Probability Plot	58
Διάγραμμα 5: Διασπορά Αστοχιών Αντλιών Υδραυλικού.....	59
Διάγραμμα 6: Weibull Probability Plot	72
Διάγραμμα 7: Exponential Probability Plot.....	73
Διάγραμμα 8: Lognormal Probability Plot	74
Διάγραμμα 9: Διασπορά Αστοχιών Αντλιών Καυσίμου	75

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Διθέσιο Α/Φ Rafale της Ελληνικής ΠΑ	39
Εικόνα 2: Αντλία Υδραυλικού Α/Φ Rafale	41
Εικόνα 3:Εσωτερικές και Εξωτερικές Δεξαμενές Καυσίμου Α/Φ Rafale.....	43
Εικόνα 4: Αντλία Καυσίμου Α/Φ Rafale.....	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή Προβλήματος

Η αποτελεσματική και έγκαιρη συντήρηση μαχητικών αεροσκαφών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διατήρηση της επιχειρησιακής ετοιμότητας και ασφάλειας της Πολεμικής Αεροπορίας. Τα μαχητικά αεροσκάφη είναι πολύπλοκα και υψηλής τεχνολογίας συστήματα, των οποίων η λειτουργία εξαρτάται από την άριστη κατάσταση ενός μεγάλου αριθμού μηχανικών, ηλεκτρονικών και λογισμικών υποσυστημάτων. Η παραδοσιακή προσέγγιση της συντήρησης, που βασίζεται είτε σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (προγραμματισμένη συντήρηση), είτε σε διορθωτικές ενέργειες μετά την εμφάνιση βλαβών (διορθωτική συντήρηση), συχνά οδηγεί είτε σε αυξημένα λειτουργικά κόστη είτε σε απώλεια διαθεσιμότητας κρίσιμων μέσων.

Επιπλέον, σε ένα περιβάλλον όπου η πίεση για μείωση του κόστους και βελτιστοποίηση των πόρων είναι διαρκής, η ανάγκη για αποτελεσματικότερες και προγνωστικές μεθόδους συντήρησης καθίσταται επιτακτική. Οι σύγχρονες τεχνολογίες με τη χρήση αισθητήρων συλλογής δεδομένων καθιστούν πλέον εφικτή την ανάπτυξη συστημάτων προληπτικής συντήρησης (predictive maintenance), τα οποία μπορούν να προβλέπουν με αξιοπιστία την πιθανότητα αστοχίας εξαρτημάτων ή συστημάτων πριν αυτή συμβεί.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος προληπτικής συντήρησης για καίρια εξαρτήματα μαχητικού αεροσκάφους της Πολεμικής Αεροπορίας, και συγκεκριμένα το αεροσκάφος Rafale με στόχο την αύξηση της διαθεσιμότητας, τη μείωση του κόστους συντήρησης και την ενίσχυση της επιχειρησιακής ασφάλειας και ετοιμότητας.

Το Α/Φ Rafale αποτελεί ένα από τα πλέον προηγμένα μαχητικά αεροσκάφη πολλαπλών ρόλων στον σύγχρονο αεροπορικό χώρο, ενσωματώνοντας προηγμένα οπλικά συστήματα, τεχνολογίες αισθητήρων, ηλεκτρονικά υποσυστήματα και εξελιγμένο λογισμικό μάχης. Η πολυπλοκότητα του συστήματος και ο αυξημένος αριθμός κρίσιμων υπομονάδων καθιστούν την παρακολούθηση της τεχνικής του κατάστασης εξαιρετικά απαιτητική, ενώ η ανάγκη για διαρκή επιχειρησιακή ετοιμότητα το καθιστά

στρατηγικά πολύτιμο. Σημειώνεται ότι μια βλάβη του Α/Φ μπορεί να σημαίνει όχι μόνο υψηλό κόστος αποκατάστασης αλλά και απώλεια πολύτιμου χρόνου, περιορισμό της διαθεσιμότητας και έκθεση των πληρωμάτων σε αυξημένο κίνδυνο.

1.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία βασίζεται στη στατιστική ανάλυση δεδομένων αστοχιών και συντήρησης κρίσιμων υποσυστημάτων του μαχητικού αεροσκάφους Rafale, με σκοπό την ανάπτυξη αξιόπιστων προβλέψεων για τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής των εξαρτημάτων (Remaining Useful Life - RUL). Η ανάλυση θα διεξαχθεί σύμφωνα με τις οδηγίες του εγχειριδίου ΕΠΑ Γ-3 της Ελληνικής Πολεμικής Αεροπορίας, το οποίο αποτελεί το πρότυπο για τη μελέτη αξιοπιστίας και συντήρησης στρατιωτικών μέσων.

Κεντρικό εργαλείο της μεθοδολογίας αποτελεί η κατανομή Weibull, η οποία επιτρέπει την προσαρμογή της στατιστικής συμπεριφοράς ενός εξαρτήματος ή συστήματος βάσει ιστορικών δεδομένων. Η συγκεκριμένη κατανομή είναι εξαιρετικά ευέλικτη, καθώς μπορεί να αναπαραστήσει διαφορετικά είδη αστοχιών μέσω της παραμέτρου σχήματος (β), διακρίνοντας μεταξύ:

- $\beta < 1$: αστοχίες λόγω αρχικών ελαττωμάτων ή πρόωρης φθοράς,
- $\beta \approx 1$: τυχαίες, απρόβλεπτες αστοχίες (random failures),
- $\beta > 1$: φθορά λόγω παλαιώσης ή σταδιακής επιδείνωσης (wear-out).

Η ανάλυση περιλαμβάνει τα εξής βασικά βήματα:

- Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων συντήρησης και αστοχιών για επιλεγμένα υποσυστήματα του Α/Φ Rafale, και συγκεκριμένα για τις αντλίες του υδραυλικού συστήματος και συστήματος καυσίμου.
- Κατηγοριοποίηση των δεδομένων με βάση τις ώρες πτήσης ή τους αριθμούς προσγειώσεων και προσδιορισμός του μηχανισμού αστοχίας προς εξέταση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστούν ως μηχανισμοί αστοχίας οι διαρροές που εμφανίζονται στις επηρεαζόμενες αντλίες.

- Εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull β και η , μέσω μεθόδων όπως η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων ή η μέγιστη πιθανοφάνεια (Maximum Likelihood Estimation - MLE), ανάλογα με τον αριθμό των αστοχιών και τη φύση των δεδομένων.
- Εκτίμηση της επικινδυνότητας, που αποτελεί συνάρτηση της πιθανότητας και της δριμύτητας, με πρόβλεψη των μελλοντικών αστοχιών. Η επικινδυνότητα κατηγοριοποιείται με βάση το ΕΠΑ Γ-3, και εξετάζεται να συντρέχει λόγος για αλλαγή του προγράμματος συντήρησης.
- Αξιολόγηση του μοντέλου και στατιστικός έλεγχος καλής προσαρμογής, με σκοπό την επιβεβαίωση της εγκυρότητας των προβλέψεων, καθώς και σύγκριση της προσαρμογής με τις αντίστοιχες που προσφέρουν η εκθετική και λογαριθμοκανονική κατανομή.
- Προτάσεις για βελτίωση του υφιστάμενου προγράμματος προληπτικής συντήρησης.

Η χρήση της μεθόδου Weibull, σε συνδυασμό με τις κατευθύνσεις του εγχειριδίου ΕΠΑ Γ-3, επιτρέπει μια συστηματική και τεκμηριωμένη προσέγγιση για τη λήψη αποφάσεων συντήρησης, ενισχύοντας τόσο την ασφάλεια πτήσεων όσο και την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης του τεχνικού προσωπικού και των αποθεμάτων ανταλλακτικών.

1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται ο σκοπός της εργασίας και περιγράφεται το πρόβλημα που εξετάζεται, το οποίο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός προγράμματος προληπτικής συντήρησης για το μαχητικό Α/Φ Rafale H3R της Ελληνικής Πολεμικής Αεροπορίας. Η ανάλυση αφορά τα κύρια εξαρτήματα του υδραυλικού συστήματος και του συστήματος καυσίμου του Α/Φ, και συγκεκριμένα τις αντλίες αυτών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο επεξηγούνται οι έννοιες της συντήρησης των Α/Φ, τόσο σε γενικό επίπεδο, όσο και στο επίπεδο της Πολεμικής Αεροπορίας. Γίνεται αναφορά στα είδη της συντήρησης, με ιδιαίτερη έμφαση στην προληπτική και προβλεπτική συντήρηση. Δίνονται τα βασικά σημεία του Εγχειριδίου Πολεμικής Αεροπορίας ΕΠΑ Γ-3, και της μεθοδολογίας που προτείνει κατά Weibull και η οποία έχει εφαρμοστεί στο παρελθόν με επιτυχία σε εξαρτήματα και συστήματα έτερων τύπων μαχητικών Α/Φ της Πολεμικής Αεροπορίας. Κύριο στοιχείο της μεθοδολογίας αποτελεί η κατανομή Weibull δύο παραμέτρων, ενώ παρουσιάζονται οι τρόποι υπολογισμού των παραμέτρων αυτών με τις μεθόδους μέγιστης πιθανοφάνειας και ελαχίστων τετραγώνων. Αναφορά γίνεται επίσης στη μέθοδο υπολογισμού διάμεσης βαθμίδας, η οποία αφορά την ορθή κατάταξη των δεδομένων των αστοχιών συνυπολογίζοντας το πλήθος των δεδομένων άνευ αστοχίας, καθώς και στο κόστος ποιότητας που προκύπτει από την εφαρμογή της εκάστοτε πολιτικής συντήρησης. Παρουσιάζονται συνοπτικά δύο κατανομές που χρησιμοποιούνται συχνά σε εκτιμήσεις αξιοπιστίας, η εκθετική και η λογαριθμοκανονική, και για τις οποίες θα εκτελεστεί στη συνέχεια έλεγχος προσαρμογής στα δεδομένα με σκοπό να συγκριθούν με την κατανομή Weibull.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει την πολιτική συντήρησης που ακολουθείται στο Α/Φ Rafale, παρουσιάζονται τα βασικά σημεία του υδραυλικού συστήματος και του συστήματος καυσίμου, ενώ εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκε η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τα μητρώα των αντλιών υδραυλικού και των αντλιών του συστήματος καυσίμου. Γίνεται προσπάθεια εκτίμησης της επικινδυνότητας, συναρτήσει της πιθανότητας να εμφανιστεί η αστοχία και της δριμύτητας που αυτή αποφέρει. Ως μηχανισμός αστοχίας ορίστηκε η διαρροή υδραυλικού υγρού και καυσίμου, από τις αντλίες των αντίστοιχων συστημάτων. Εκτελείται έλεγχος προσαρμογής της κατανομής Weibull συγκριτικά με την εκθετική και τη λογαριθμοκανονική κατανομή, προς ενίσχυση της καταλληλότητάς της για την εφαρμογή στην εν λόγω ανάλυση. Κατόπιν προτείνονται τρόποι πρόληψης των μελλοντικών αστοχιών, με εφαρμογή συστήματος προληπτικής συντήρησης στα υπό εξέταση εξαρτήματα, ενώ περιγράφεται και το αντίστοιχο κόστος που θα προκύψει από την ενδεχόμενη αλλαγή της υπάρχουσας πολιτικής συντήρησης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από την παρούσα εργασία, ενώ στο τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

2.1 Ορισμοί και Έννοιες Συντήρησης

Το αεροσκάφος και τα εξαρτήματά του έχουν την τάση να χάνουν σταδιακά την αξιοπιστία τους λόγω γήρανσης και χρήσης με την πάροδο του χρόνου και εν τέλει θα υπάρξει ένα σημείο στο οποίο αν δεν συντηρηθούν θα οδηγηθούν στην αστοχία, είτε μερική είτε ολική. Η τακτική συντήρηση είναι άκρως σημαντική για την παράταση της λειτουργικής ζωής του εξοπλισμού και τη μείωση των οικονομικών και πάσης φύσεως απωλειών που προκαλείται από την απρογραμματίστη διακοπή της λειτουργίας του (Stanton et al, 2022, σελ. 216).

Η συντήρηση αεροσκαφών είναι η επισκευή, τροποποίηση, γενική επισκευή, επιθεώρηση και προσδιορισμός της κατάστασης των συστημάτων εξαρτημάτων και δομών του αεροσκάφους που στοχεύει στην παροχή αξιοπλοΐας για πτητικές λειτουργίες και επιχειρήσεις (Andrade, 2021). Η συντήρηση στην αεροπορία ορίζεται συνήθως με τη χρήση προληπτικών στρατηγικών, το οποίο σημαίνει ότι κάθε αεροσκάφος πρέπει να είναι καθηλωμένο στο έδαφος για την εκτέλεση ελέγχων συντήρησης σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Η στρατηγική αυτή αποσκοπεί στη διαρκή εγγύηση της αξιοπλοΐας του αεροσκάφους, στη μείωση του κινδύνου απροσδόκητων αστοχιών που προκαλούνται από τη φθορά των εξαρτημάτων και στη διατήρηση ενός συνεπούς προγράμματος συντήρησης για το σύνολο του στόλου των αεροσκαφών (Andrade, 2021).

Η διαδικασία σχεδιασμού και διαχείρισης της συντήρησης των αεροσκαφών είναι μία από τις βασικές διαδικασίες που καθορίζουν την αποτελεσματική λειτουργία ενός οργανισμού, τόσο πολιτικού όσο και στρατιωτικού, που ασχολείται εν γένει με τις αεροπορικές μεταφορές και επιχειρήσεις. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός της συντήρησης στοχεύει στη διασφάλιση της συνέχειας των επιχειρήσεων, με το όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος (Andrade, 2021).

Οι οργανισμοί επιδιώκουν την επίτευξη τουλάχιστον ενός ή περισσότερων εκ των ακόλουθων στόχων: μεγιστοποίηση κέρδους, συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών ή προϊόντων, ελαχιστοποίηση του κόστους, ασφαλές και καθαρό περιβάλλον εργασίας και ανάπτυξη του ανθρώπινου δυναμικού (Ben-Daya et al, 2009). Αποτελεί κύρια ευθύνη της συντήρησης να παρέχει υπηρεσίες που να δίνουν τη

δυνατότητα στον οργανισμό να πετυχαίνει τους στόχους του, και, ενώ, οι αρμοδιότητες της συντήρησης διαφέρουν ανάλογα με το είδος του οργανισμού, δύναται να συνοψιστούν στις κάτωθι (Ben-Daya et al, 2009):

- Διατήρηση του εξοπλισμού, εξαρτημάτων και υποεξαρτημάτων σε καλή και ασφαλή κατάσταση, ικανή ώστε να εκτελούν απρόσκοπτα τη λειτουργία τους.
- Εκτέλεση του συνόλου των δραστηριοτήτων που αφορούν προληπτική, προβλεπτική και διορθωτική συντήρηση, γενικές επισκευές, τροποποιήσεις και έκτακτους ελέγχους, με αποτελεσματικότητα.
- Διατήρηση και έλεγχος ανταλλακτικών και αναλώσιμων.
- Βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και εγκαταστάσεων, καθώς και εξοικονόμηση ενέργειας.

Τα διαστήματα ελέγχου συντήρησης που προκύπτουν από τον ως άνω σχεδιασμό υποδεικνύουν το πότε χρειάζεται νέος έλεγχος και εξαρτώνται από τη χρήση καθώς και από τη γήρανση του αεροσκάφους και των εξαρτημάτων του. Ο καθορισμός των εν λόγω διαστημάτων σχετίζεται με παραμέτρους χρήσης, ανάλογα με το εξάρτημα προς εξέταση, όπως είναι οι ώρες πτήσης (Flight Hours – FH), αριθμό προσγειώσεων, εκκινήσεις του εξαρτήματος και ημερολογιακές ημέρες. Κάθε τύπος ελέγχου έχει, συνήθως, το δικό του μέγιστο καθορισμένο διάστημα και οι αντίστοιχες μετρήσεις χρήσης επαναφέρονται στο μηδέν, αμέσως μετά την εκτέλεση ενός ελέγχου. Αποτελεί συνήθη πρακτική όταν η εκτέλεση κάποιου ελέγχου ελαφριού τύπου προσεγγίζει χρονικά κάποιον εκτενέστερο έλεγχο, αυτοί να προγραμματίζονται για το ίδιο διάστημα, ώστε να μειώνεται ο χρόνος παραμονής του αεροσκάφους στο έδαφος (Andrade, 2021). Η συντήρηση διακρίνεται σε διορθωτική (corrective), προληπτική (preventive) και προβλεπτική (predictive). Η διορθωτική συντήρηση αποτελεί μια μεθοδολογία «αντίδρασης», καθώς είναι μη προγραμματισμένη και εκτελείται κατόπιν αστοχίας ενός εξαρτήματος. Ουσιαστικά, αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο συντήρησης και αξιοποιεί με τον καλύτερο τρόπο τη μέγιστη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων, ενώ, ταυτόχρονα, δεν απαιτεί τον καταρτισμό κάποιας συγκεκριμένης στρατηγικής από τους τεχνικούς. Στον αντίποδα, αποτελεί την πιο ακριβή σε κόστος τεχνική και καμία εταιρεία δεν επιδιώκει την εφαρμογή της, κυρίως λόγω της απρόβλεπτης φύσης της (Stanton et al, 2022, σελ. 216).

Η προληπτική συντήρηση αποτελεί μεθοδολογία στην οποία η συντήρηση προγραμματίζεται και εκτελείται σε προκαθορισμένα διαστήματα για να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας στο μέλλον. Τα χρονικά διαστήματα της συντήρησης για τον εκάστοτε εξοπλισμό δίδονται από την τεχνική βιβλιογραφία του κατασκευαστή του υλικού και σε ορισμένες περιπτώσεις δύναται να τροποποιηθούν κατόπιν νέων μελετών και στατιστικών αναλύσεων των ευρημάτων που προκύπτουν από αυτήν (Stanton et al, 2022, σελ. 216). Αυτός ο τύπος συντήρησης εκτελείται ενώ ο εξοπλισμός εξακολουθεί να λειτουργεί και σχεδιάζεται σε χρονικό σημείο ώστε να είναι διαθέσιμοι όλοι οι τυχόν διαθέσιμοι πόροι και μέσα (Eddarhi et al, 2022, σελ. 771). Εξέλιξη της προληπτικής συντήρησης αποτελεί η προβλεπτική ή προγνωστική συντήρηση, η οποία έχει την ίδια φιλοσοφία, και ενσωματώνει την εφαρμογή τεχνολογίας αισθητήρων και αναλυτικών εργαλείων για την πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών και αποτροπή αυτών με την εκτέλεση της ανάλογης συντήρησης (Eddarhi et al, 2022, σελ. 771).

Η κύρια διαφορά προληπτικής και προβλεπτικής συντήρησης είναι το γεγονός ότι η πρώτη βασίζεται σε σταθερά χρονικά διαστήματα, ενώ η δεύτερη εκτελείται με ανίχνευση του προτύπου υποβάθμισης του συστήματος και με παρακολούθηση της κατάστασης του αεροσκάφους και των εξαρτημάτων του σε πραγματικό χρόνο. Η έρευνα για την παρακολούθηση της κατάστασης των αεροσκαφών που βασίζεται σε αναλυτικά στοιχεία αποτελεί τρέχον θέμα προς μελέτη και ανάπτυξη για όλες τις αεροπορίες ανά τον κόσμο. Η συλλογή, αποθήκευση και ανάλυση των πτήσεων, σε συνδυασμό με τα επιχειρησιακά δεδομένα που σχετίζονται με τη συντήρηση, αποτελούν τη βάση του συστήματος παρακολούθησης της κατάστασης ή «υγείας», όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, του αεροσκάφους (Tezi, 2022). Η ανάπτυξη και ευρεία χρήση τεχνολογίας αισθητήρων σε συστήματα αεροσκαφών για τη μέτρηση παραμέτρων, η ύπαρξη δικτύων επικοινωνίας μεταξύ συστημάτων αεροπλάνων και επίγειων σταθμών, η ανάπτυξη μεθόδων ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων, καθώς και οι υπολογιστικές πλατφόρμες έχουν διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη δημιουργία κατάλληλου περιβάλλοντος για την παρακολούθηση της υγείας των αεροσκαφών σε πραγματικό χρόνο (Tezi, 2022).

Στην προληπτική συντήρηση, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η επιθεώρηση του εξοπλισμού και των εξαρτημάτων καθώς από αυτήν προκύπτουν καίριες πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος με σκοπό τη λήψη αποφάσεων. Από την άλλη, η διενέργεια επιθεωρήσεων συνεπάγεται πάντα κάποιο κόστος, το οποίο θα πρέπει να

ληφθεί υπόψιν για το αν η εκάστοτε επιθεώρηση είναι συμφέρουσα για τον οργανισμό και τη λειτουργία του ή το αντίθετο. Συνήθως, η επιθεώρηση με το χαμηλότερο κόστος είναι η λεγόμενη δυαδική επιθεώρηση, η οποία καταδεικνύει αν το σύστημα λειτουργεί ή όχι, και ενδέχεται να είναι κάποιος μικρής έκτασης λειτουργικός έλεγχος ή ακόμη και οπτικός έλεγχος. Όσο πιο εξονυχιστικά ελέγχεται κάποιο σύστημα, τόσο αυξάνεται το κόστος της επιθεώρησης, επομένως είναι χρήσιμο να εκτιμάται εκ των προτέρων η αξιοπιστία κάθε συστήματος, με την ανάλυση δεδομένων και στατιστικών στοιχείων προτού επιλεγεί η βέλτιστη μέθοδος επιθεώρησης (Dinh et al, 2025).

Η προβλεπτική συντήρηση περιλαμβάνει την πρόβλεψη των απαιτήσεων συντήρησης στο μέλλον, χρησιμοποιώντας δεδομένα που βασίζονται στο χρόνο από συστήματα εν χρήση, όπως τα αεροπλάνα. Ένας από τους κύριους στόχους της μεθόδου είναι να προβλέψει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το πότε είναι καιρός να επισκευαστεί ή να αντικατασταθεί ένα εξάρτημα. Τα οφέλη της παρατεταμένης χρήσης ενός εξαρτήματος μειώνονται αν η αντικατάστασή του συμβεί πολύ νωρίτερα, ενώ αν εκτελεστεί πολύ αργά τότε ενδέχεται να προκύψουν απρόβλεπτες αστοχίες, μειώνοντας τη διαθεσιμότητά του. Ως εκ τούτου, η βελτίωση της ακρίβειας της εκτιμώμενης διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων αποτελεί συνεχή προτεραιότητα και επιδίωξη (Karaoglu et al, 2023).

2.2 Συντήρηση Αεροσκαφών στην Πολεμική Αεροπορία

Όπως κάθε οργανισμός η ΠΑ εφαρμόζει τόσο διορθωτική όσο και προληπτική συντήρηση, σύμφωνα με την τεχνική βιβλιογραφία του κατασκευαστή του εκάστοτε οπλικού συστήματος, στην οποία είναι σαφώς καθορισμένα τα όρια της προγραμματισμένης συντήρησης τα οποία συνήθως εκφράζονται σε ημέρες (ημερολογιακό όριο), ώρες πτήσης (ΩΠ), αριθμό προσγειώσεων και εκκινήσεων του Α/Φ. Οι προγραμματισμένες επιθεωρήσεις αφορούν είτε το Α/Φ σαν ολότητα είτε επιμέρους εξαρτήματά του. Τα εξαρτήματα δύναται να ακολουθούν πολιτική Λήξης Ορίου Λειτουργίας (ΛΟΛ) σύμφωνα με την οποία μετά τη συμπλήρωση του ορίου προωθούνται για εκτέλεση Γενικής Επισκευής, ενώ μετά την εκτέλεση της Γενικής Επισκευής το όριό τους μηδενίζει. Υπάρχουν υλικά που υπάγονται στο καθεστώς Λήξης Ορίου Ζωής (ΛΟΖ), δηλαδή μετά τη συμπλήρωση του αντίστοιχου ορίου το

υλικό θεωρείται άχρηστο και δεν χρησιμοποιείται ξανά. Επιπρόσθετα, υπάρχουν εξαρτήματα τα οποία δεν έχουν όριο προληπτικής συντήρησης και επιθεωρούνται ανάλογα με την κατάστασή τους, δηλαδή μόνο σε περίπτωση αστοχίας ή δυσλειτουργίας του και ανήκουν στην κατηγορία On – Condition.

Η ΠΑ, πλην της τεχνικής βιβλιογραφίας του εκάστοτε οπλικού συστήματος, έχει θεσπίσει διαταγές, κανονισμούς και εγχειρίδια που ορίζουν τα πλαίσια στα οποία εκτελείται η συντήρηση των μέσων της. Βασικό θεσμικό κείμενο αποτελεί ο Κανονισμός Τεχνικής Υποστήριξης Α/Φ – Ε/Π Πτερύγων – Σμηναρχιών ΠΑ του Γενικού Επιτελείου Αεροπορίας (ΚΠΑ Γ-4/2011/ΓΕΑ), σκοπός του οποίου είναι η παροχή τυποποιημένων οδηγιών εκτέλεσης των δραστηριοτήτων της τεχνικής υποστήριξης στο επίπεδο της Μονάδας των Α/Φ. Με την εφαρμογή του κανονισμού επιδιώκεται η σταθερότητα, ομοιομορφία, καθώς και ο καλύτερος έλεγχος στην εκτέλεση των αντίστοιχων δραστηριοτήτων.

Σύμφωνα με τον εν λόγω κανονισμό, ως τεχνική υποστήριξη ενός οπλικού συστήματος ορίζεται το σύνολο των δραστηριοτήτων της διοικητικής μέριμνας που αφορούν στη διατήρηση ή/και επαναφορά του σε πλήρη λειτουργική κατάσταση, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή ή/και στην αναβάθμιση των δυνατοτήτων του, με στόχο την εξασφάλιση της ασφαλούς επιχειρησιακής του εκμετάλλευσης. Η τεχνική υποστήριξη αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους στοιχεία:

- Σχεδίαση συντήρησης, η οποία αφορά το σχεδιασμό και την ανάλυση για τον καθορισμό των εκάστοτε απαιτήσεων.
- Υλικά υποστήριξης, όπως ανταλλακτικά, αναλώσιμα, υλικά Α/Φ και όσα δύναται να απαιτηθούν για την εύρυθμη λειτουργία της συντήρησης.
- Εξοπλισμός ελέγχου, όπως εργαλεία εντοπισμού και αποκατάστασης των βλαβών.
- Μεταφορικά και επίγεια μέσα
- Προσωπικό και εκπαίδευση
- Εγκαταστάσεις
- Τεχνικά δεδομένα
- Λογισμικό υπολογιστών

Η υλοποίηση των απαιτούμενων ενεργειών της τεχνικής υποστήριξης γίνεται με βάση τυποποιημένες διαδικασίες, οι οποίες θα είναι καταγεγραμμένες και περιγράφουν λεπτομερώς και με καθορισμένη σειρά τις διάφορες ενέργειες και τους εμπλεκόμενους κατά περίπτωση φορείς. Με την τυποποίηση επιτυγχάνεται σταθερή και συνεχής ποιότητα εργασίας, ανεξάρτητα από τις γνώσεις και εμπειρία των ατόμων που εμπλέκονται στην υλοποίηση της, καθώς όλοι οι εμπλεκόμενοι ακολουθούν τις ίδιες ενέργειες και με την ίδια σειρά, αποφεύγονται καθυστερήσεις και σφάλματα, ενώ παράλληλα δίδεται το πλαίσιο μέσα στο οποίο θα κινείται το προσωπικό.

Τα απαιτούμενα μέσα και η απαιτούμενη εμπειρία του τεχνικού προσωπικού που υλοποιεί το έργο της τεχνικής υποστήριξης επιβάλλουν την κλιμάκωση των ενεργειών σε διαδοχικά επίπεδα ή βαθμούς συντήρησης. Τα εν λόγω επίπεδα ή βαθμοί διακρίνονται ως εξής:

- Στον Α΄ Βαθμό Συντήρησης (Επίπεδο Οργανικής Συντήρησης / Organizational Level Maintenance).
- Στον Β΄ Βαθμό Συντήρησης (Επίπεδο Ενδιάμεσης Συντήρησης ή Συντήρησης Βάσης / Intermediate Level Maintenance).
- Στον Γ΄ Βαθμό Συντήρησης (Επίπεδο Συντήρησης Εργοστασίου / Depot Level Maintenance)

Ο διαχωρισμός των απαιτήσεων στον αντίστοιχο βαθμό συντήρησης γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της τεχνικής βιβλιογραφίας του μέσου, το απαιτούμενο και διαθέσιμο τεχνικό δυναμικό της Μονάδας, τον τύπο του Α/Φ που υποστηρίζει η Μονάδα, τα μέσα και τον εξοπλισμό που απαιτούνται, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η κάλυψη των επιχειρησιακών αναγκών και των απαιτήσεων συντήρησης. Το προσωπικό της τεχνικής υποστήριξης όλων των ειδικοτήτων ακολουθεί πάντοτε την οικεία βιβλιογραφία του κατασκευαστή για τις διαδικασίες εντοπισμού και αποκατάστασης των βλαβών (troubleshooting), εξυπηρέτησης, χειρισμού, αντικατάστασης εξαρτημάτων, μέτρων ασφαλείας εδάφους και λοιπών απαιτήσεων. Ως παράδειγμα του διαχωρισμού σε βαθμούς συντήρησης αναφέρεται ότι, αν ένα Α/Φ εμφανίσει δυσλειτουργία στην αντλία υδραυλικού, ο Α΄ βαθμός θα αντικαταστήσει στο Α/Φ το υλικό αυτό με ένα εύχρηστο, και θα προωθήσει το ελαττωματικό για έλεγχο στον επόμενο Βαθμό Συντήρησης. Αν η βλάβη αυτή δεν καλύπτεται από την τεχνική

βιβλιογραφία του βαθμού αυτού, τότε το υλικό θα σταλεί στην κατασκευάστρια εταιρεία για περαιτέρω διερεύνηση και εξέταση δυνατότητας επισκευής.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι εκ των βασικών όρων που χρησιμοποιεί ο ΚΠΑ Γ-4/2011 για να περιγράψει την τεχνική υποστήριξη των Α/Φ και τη συντήρησή τους:

- Αξιοπιστία (Reliability): Η πιθανότητα ένα σύστημα ή προϊόν να εκτελέσει την απαιτούμενη λειτουργία, σύμφωνα με τις προβλεπόμενες προδιαγραφές, για μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Η αξιοπιστία εξαρτάται από την ποιότητα της σχεδίασης και τη συμφωνία της κατασκευής με τη σχεδίαση.
- Διαθεσιμότητα (Availability): Η ικανότητα ενός Α/Φ, στοιχείου, συγκροτήματος, εξοπλισμού ή αντικειμένου, να εκτελέσει την απαιτούμενη λειτουργία σε μία καθορισμένη χρονική διάρκεια.
- Ελάττωμα (Defect): Η μη ικανοποίηση μιας απαίτησης για προτιθέμενη χρήση ή μιας λογικής προσδοκίας, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που σχετίζονται με την ασφάλεια.
- Επαναλαμβανόμενη βλάβη: Η λειτουργική ανωμαλία ενός Α/Φ ή συστήματος/συγκροτήματός του, η οποία σε σύνολο 10 εξόδων (πτήσεων), εμφανίζεται για τρίτη φορά με τα ίδια ή παρόμοια συμπτώματα ή εφόσον ο αρμόδιος επιθεωρητής μηχανικός της τεχνικής υποστήριξης τη θεωρούν επανάληψη ή συνέχεια προηγούμενης βλάβης, ανεξάρτητα από τη συχνότητα εμφάνισής της.
- Ποιοτικά πρότυπα (Quality Standards): Το σύνολο των θεσμοθετημένων ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών ενός προϊόντος, μιας παρεχόμενης υπηρεσίας ή μιας εκτελούμενης εργασίας, που τα καθιστούν κατάλληλα για χρήση ή υλοποίηση στο περιβάλλον για το οποίο προορίζονται να χρησιμοποιηθούν ή υλοποιηθούν.
- Συλλογή στοιχείων (Maintenance Data Collection): Η διαδικασία καταγραφής, συλλογής και επεξεργασίας όλων των πληροφοριών, από το χώρο παραγωγής, για όλες τις εργασίες που γίνονται από το τεχνικό προσωπικό και που απαιτούν άμεση ανάλυση έργου.

2.3 Κόστος Ποιότητας και Συντήρηση Αεροσκαφών

Η ποιότητα ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας συνδέεται άμεσα με το συνολικό κόστος που απαιτείται για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις λειτουργίας και ασφάλειας. Σύμφωνα με τη θεωρία του κόστους ποιότητας (Cost of Quality – CoQ), το συνολικό κόστος ποιότητας διακρίνεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: κόστος πρόληψης (prevention cost), κόστος αξιολόγησης ή ελέγχου (appraisal cost), κόστος εσωτερικών αστοχιών (internal failure cost) και κόστος εξωτερικών αστοχιών (external failure cost) (Campanella, 1999).

Στον τομέα της αεροπορικής συντήρησης, το κόστος πρόληψης περιλαμβάνει δραστηριότητες όπως η εκπαίδευση του προσωπικού, η ανάπτυξη προγραμμάτων συντήρησης και η εφαρμογή προληπτικών ή προβλεπτικών ελέγχων. Το κόστος αξιολόγησης αφορά επιθεωρήσεις, μη καταστροφικούς ελέγχους (NDI), δοκιμές λειτουργίας και λοιπές διαδικασίες επαλήθευσης της κατάστασης του εξοπλισμού.

Αντίθετα, το κόστος αστοχιών σχετίζεται με τις συνέπειες που προκαλεί μια βλάβη. Στις εσωτερικές αστοχίες περιλαμβάνονται οι επισκευές, οι αντικαταστάσεις εξαρτημάτων και οι καθυστερήσεις πριν από την επιχειρησιακή αξιοποίηση του αεροσκάφους. Οι εξωτερικές αστοχίες μπορεί να έχουν ακόμη σοβαρότερες συνέπειες, όπως απώλεια διαθεσιμότητας, ακύρωση αποστολών, αυξημένο λειτουργικό κόστος και ενδεχόμενους κινδύνους για την ασφάλεια πτήσεων (Ben-Daya et al., 2009).

Η βασική αρχή της διαχείρισης ποιότητας είναι ότι η αύξηση ενός εύλογου κόστους πρόληψης και ελέγχου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους αστοχιών. Για τον λόγο αυτό, η εφαρμογή τεχνικών αξιοπιστίας και προληπτικής συντήρησης θεωρείται επένδυση ποιότητας και όχι απλώς πρόσθετη δαπάνη συντήρησης. Η σχέση μεταξύ αξιοπιστίας, συντήρησης και κόστους ποιότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική σε οργανισμούς υψηλής τεχνολογίας, όπως η αεροπορική βιομηχανία και οι ένοπλες δυνάμεις, όπου ακόμη και μία μεμονωμένη αστοχία μπορεί να επιφέρει δυσανάλογα υψηλό οικονομικό και επιχειρησιακό κόστος (Juran & Godfrey, 1999). Για τον λόγο αυτό, η λήψη αποφάσεων συντήρησης βασισμένη σε δεδομένα αξιοπιστίας αποτελεί βασικό εργαλείο διαχείρισης ποιότητας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ανάλυση αξιοπιστίας των υδραυλικών αντλιών και των αντλιών καυσίμου αποσκοπεί στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων συντήρησης, οι

οποίες μπορούν να μειώσουν το κόστος αστοχιών μέσω της έγκαιρης ανίχνευσης φθορών και της εφαρμογής κατάλληλων προληπτικών ενεργειών.

2.4 Εκτίμηση Επικινδυνότητας βάσει ΕΠΑ Γ-3/2016

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια για ανάπτυξη συστήματος προληπτικής συντήρησης για το μαχητικό Α/Φ Rafale, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνει το εγχειρίδιο της Πολεμικής Αεροπορίας ΕΠΑ Γ-3/2016. Συγκεκριμένα, αφού συλλεχθούν τα απαραίτητα στοιχεία που αποτελούν το αντικείμενο της ανάλυσης, θα ακολουθήσει εκτίμηση της επικινδυνότητας με βάση συγκεκριμένους τύπους αστοχιών των υπό εξέταση εξαρτημάτων. Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας ακολουθείται μεθοδολογία υπολογισμού αξιοπιστίας υλικών, μεθοδολογία η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί στη συντήρηση ιπτάμενων μέσων, υποσυστημάτων και εξαρτημάτων αυτών, στη σχεδιάσή τους, καθώς και για προτάσεις αλλαγών στην περιοδικότητα συντήρησης. Καθίσταται, λοιπόν, σαφές πως ο σκοπός της παρούσας εργασίας, δηλαδή η δημιουργία συστήματος προληπτικής συντήρησης για συστήματα μαχητικού αεροσκάφους, καλύπτεται με τη χρήση της μεθοδολογίας που προτείνει το εν λόγω εγχειρίδιο. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί πολλάκις επί του πρακτέου σε εξαρτήματα και συστήματα των Α/Φ της Πολεμικής Αεροπορίας με θετικά αποτελέσματα.

Η διαχείριση της επικινδυνότητας η οποία αποσκοπεί στην επίτευξη ασφάλειας και τη βελτιστοποίηση των μεθόδων συντήρησης των συστημάτων, επιτυγχάνεται με την εκτίμηση της πιθανότητας να συμβεί κάποια αστοχία, σε συνδυασμό με τη δριμύτητα των συνεπειών που αυτή δύναται να επιφέρει. Για τη λήψη απόφασης μείωσης της επικινδυνότητας, εφαρμόζεται η φιλοσοφία πως η μείωση της επικινδυνότητας πρέπει να επιτυγχάνεται χωρίς το κόστος να είναι δυσανάλογο του οφέλους από τη μείωση αυτής. Η αρχή αυτή συναντάται στη βιβλιογραφία με τον όρο «As Low As Reasonably Practicable – ALARP».

Η επικινδυνότητα εκτιμάται ως συνισταμένη της πιθανότητας και της δριμύτητας. Η πιθανότητα προκύπτει μέσω ανάλυσης των δεδομένων για τον υπό εξέταση εξοπλισμό ή σύστημα με τη μεθοδολογία υπολογισμού της αξιοπιστίας Weibull, ενώ η δριμύτητα εκτιμάται από στοιχεία που έχουν προκύψει ή δύναται να προκύψουν από τις

επιπτώσεις του μηχανισμού αστοχίας, όπως έχει οριστεί από τον εκάστοτε μελετητή.

Η πιθανότητα ταξινομείται σύμφωνα με τον Πίνακα 1:

Ενδεικτικός Τρόπος Εκμετάλλευσης – Έκθεσης κατά την Λειτουργία	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ			
	Μικρή	Μέτρια	Μεγάλη	Υψηλή
Ώρες Πτήσης (ΩΠ)	<1/ΩΠ 10ετίας	≥ 1/ΩΠ 10ετίας < 1/ΩΠ 5ετίας	≥ 1/ΩΠ 5ετίας < 4/ΩΠ 5ετίας	≥ 4/ΩΠ 5ετίας
Αριθμός Εξόδων (ΕΞ)	<1/ΕΞ 10ετίας	≥ 1/ΕΞ 10ετίας < 1/ΕΞ 5ετίας	≥ 1/ΕΞ 5ετίας < 4/ΕΞ 5ετίας	≥ 4/ΕΞ 5ετίας
Προσγειώσεις (ΠΓ)	<1/ΠΓ 10ετίας	≥ 1/ΠΓ 10ετίας < 1/ΠΓ 5ετίας	≥ 1/ΠΓ 5ετίας < 4/ΠΓ 5ετίας	≥ 4/ΠΓ 5ετίας
Υδροληψίες (ΥΔ)	<1/ΥΔ 10ετίας	≥ 1/ΥΔ 10ετίας < 1/ΥΔ 5ετίας	≥ 1/ΥΔ 5ετίας < 4/ΥΔ 5ετίας	≥ 4/ΥΔ 5ετίας
Εκκινήσεις Α/Φ (ΕΚ)	<1/ΕΚ 10ετίας	≥ 1/ΕΚ 10ετίας < 1/ΕΚ 5ετίας	≥ 1/ΕΚ 5ετίας < 4/ΕΚ 5ετίας	≥ 4/ΕΚ 5ετίας
Πλήθος Βολών (ΒΟΛΕΣ)	<1/ΒΟΛΕΣ 10ετίας	≥ 1/ΒΟΛΕΣ 10ετίας < 1/ΒΟΛΕΣ 5ετίας	≥ 1/ΒΟΛΕΣ 5ετίας < 4/ΒΟΛΕΣ 5ετίας	≥ 4/ΒΟΛΕΣ 5ετίας
Διανυθέντα Χιλιόμετρα (km)	<1/km 10ετίας	≥ 1/km 10ετίας < 1/km 5ετίας	≥ 1/km 5ετίας < 4/km 5ετίας	≥ 4/km 5ετίας
Ώρες Λειτουργίας (ΩΛ)	<1/ΩΛ 10ετίας	≥ 1/ΩΛ 10ετίας < 1/ΩΛ 5ετίας	≥ 1/ΩΛ 5ετίας < 4/ΩΛ 5ετίας	≥ 4/ΩΛ 5ετίας
Έτη Εκμετάλλευσης (ΕΤΗ)	<1/10 ΕΤΗ	≥ 1/10 ΕΤΗ < 1/5 ΕΤΗ	≥ 1/5 ΕΤΗ < 4/5 ΕΤΗ	≥ 4/5 ΕΤΗ

Πίνακας 1: Ταξινόμηση Πιθανότητας

Αναφορικά με τον εν λόγω πίνακα, αν για παράδειγμα τα εξαρτήματα των Α/Φ προς εξέταση, τα οποία παρακολουθούνται με βάση τις ώρες πτήσης, προβλέπεται να αστοχήσουν λιγότερες από μία φορά σε βάθος 10 ετών, τότε η πιθανότητα ταξινομείται ως μικρή. Αντίστοιχα, ανάλογα με το μέτρο κόπωσης που παρακολουθείται το εκάστοτε εξάρτημα προς εξέταση, ταξινομούμε και την πιθανότητα. Οι ώρες λειτουργίας αφορούν συστήματα που λειτουργούν μόνο στο έδαφος και όχι κατά τη διάρκεια της πτήσης, ενώ οι υδροληψίες αφορούν τα εναέρια μέσα πυρόσβεσης και τον αριθμό συλλογής νερού αυτών από τη θάλασσα.

Στην παρούσα μελέτη θα επικεντρωθούμε στις ώρες πτήσης του εξοπλισμού, καθώς η συντήρηση και παρακολούθησή του πραγματοποιείται με βάση αυτές. Αναφορικά με τη δριμύτητα, στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αυτή εκτιμάται:

Κριτήρια	ΔΡΙΜΥΤΗΤΑ ΚΙΝΔΥΝΟΥ			
	Μικρή	Μέτρια	Μεγάλη	Υψηλή
Συνολικό Κόστος Συστήματος, Εξοπλισμού, Υλικών, Υποδομών, Αποκατάστασης Περιβάλλοντος (€)	≤ 20.000	> 20.000 ≤ 500.000	> 500.000 ≤ 2.000.000	>2.000.000 Απώλεια ή ολοσχερής καταστροφή συστήματος, μείζονος εξοπλισμού και υποδομών (ανεξάρτητα της αξίας του εξοπλισμού ή των υποδομών).
Τραυματισμός	Τραυματισμός προσωπικού που επέφερε είτε απουσία από την εργασία του από 5 έως 9 εργάσιμες ημέρες μετά από την ημέρα του ατυχήματος ή προσωρινής φύσης περιορισμούς στην εργασία του.	Τραυματισμός προσωπικού που επέφερε είτε απουσία από την εργασία του για τουλάχιστον 10 εργάσιμες ημέρες μετά από την ημέρα του ατυχήματος ή μόνιμης φύσης περιορισμούς στην εργασία του.	Σοβαρός τραυματισμός ή μόνιμη μερική ανικανότητα προσωπικού.	Θάνατος τραυματισμός ή θανάσιμη ασθένεια ή μόνιμη ολική ανικανότητα προσωπικού.

Πίνακας 2: Ταξινόμηση Δριμύτητας

Η δριμύτητα σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, ταξινομείται σε 4 κατηγορίες ως μικρή, μέτρια, μεγάλη και υψηλή, είτε ανάλογα με τις μέγιστες οικονομικές απώλειες που έχει επιφέρει η αστοχία που μελετάται σε γεγονότα που έχουν συμβεί, είτε με τις επιπτώσεις που είχε στον ανθρώπινο παράγοντα. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ιστορικά δεδομένα γιατί η αστοχία δεν έχει συμβεί ποτέ, τότε η δριμύτητα τίθεται μέτρια ή μεγάλη, ανάλογα με τις εκτιμήσεις ειδικών επί του συστήματος που εξετάζεται και εμπειρογνομώνων.

Εφόσον υπολογιστεί η πιθανότητα εμφάνισης των αστοχιών και εκτιμηθεί η δριμύτητα, η επικινδυνότητα προκύπτει ως συνάρτηση αυτών σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ					
		Δριμύτητα			
		Μικρή	Μέτρια	Μεγάλη	Υψηλή
Πιθανότητα	Μικρή	Δ	Δ	Γ	Β
	Μέτρια	Δ	Γ	Β	Β
	Μεγάλη	Δ	Γ	Β	Α
	Υψηλή	Γ	Β	Α	Α

Πίνακας 3: Εκτίμηση Επικινδυνότητας

Ανάλογα με την κατηγορία της επικινδυνότητας και την εφαρμογή της αρχής ALARP όπως προαναφέρθηκε, κρίνεται είτε αν είναι σκόπιμο να εφαρμοστεί πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης με τη θέσπιση ανάλογων μέτρων ελέγχου, είτε η δραστηριότητα να συνεχιστεί ως έχει εφόσον η κατηγορία της επικινδυνότητας δεν συντελεί στο να υπάρξει κάποια διαφοροποίηση. Σύμφωνα με την εν λόγω αρχή, η επικινδυνότητα ταξινομείται σε 4 κατηγορίες, ως κάτωθι:

- Υψηλή Επικινδυνότητα (Α): Μη αποδεκτή επικινδυνότητα. Πρόταση για άμεση διακοπή της δραστηριότητας, αν δεν υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής άμεσων μέτρων ελέγχου προς μείωση αυτής.
- Μεγάλη Επικινδυνότητα (Β): Μη αποδεκτή επικινδυνότητα. Η δραστηριότητα δύναται να συνεχιστεί με ταυτόχρονη και άμεση εφαρμογή μέτρων ελέγχου.
- Μέτρια Επικινδυνότητα (Γ): Ανεκτή επικινδυνότητα. Δεν απαιτούνται πρόσθετες ενέργειες, ενώ η δραστηριότητα πρέπει να συνεχίσει να βρίσκεται υπό παρακολούθηση.
- Μικρή Επικινδυνότητα (Δ): Αποδεκτή επικινδυνότητα. Συνέχιση τήρησης του υφιστάμενου προγράμματος συντήρησης για να εξασφαλιστεί ότι η επικινδυνότητα θα παραμείνει σε αυτό το επίπεδο.

2.5 Κατανομή Πιθανοτήτων Weibull

Η ανάλυση δεδομένων αξιοπιστίας είναι ένα σημαντικό μέσο για την ανάλυση της διάρκειας ζωής και της αστοχίας του εξοπλισμού, την πρόβλεψη κανόνων και μελέτη μηχανισμών αστοχίας. Από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι μια μέθοδος ανάλυσης δεδομένων αξιοπιστίας που δύναται να εφαρμοστεί σε αεροπορικό εξοπλισμό είναι αυτή που βασίζεται στην κατανομή πιθανοτήτων Weibull. Στην περίπτωση αυτή, τα δεδομένα σφαλμάτων ενός συγκεκριμένου τύπου εξοπλισμού που συλλέγονται, ταξινομούνται και αναλύονται στατιστικά μέσω της ανάλυσης Weibull (Yang et al, 2022). Η κατανομή Weibull χρησιμοποιείται εκτενώς στην ανάλυση δεδομένων του χρόνου ζωής και έχει επιδείξει αξιοσημείωτη αποτελεσματικότητα στην καταγραφή των ποσοστών αστοχίας που εμφανίζουν μονοτονικά μοτίβα. Τα διαγράμματα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας τα οποία εμφανίζονται είτε με δεξιά είτε με αριστερή κλίση, την καθιστούν κατάλληλη για ανάλυση επιβίωσης και αξιοπιστίας (Shama et al, 2023).

Η εφαρμογή της ανάλυσης Weibull έχει αναδειχθεί ως μια ισχυρή μέθοδος για την ενίσχυση των στρατηγικών προληπτικής συντήρησης σε πληθώρα παραγωγικών διαδικασιών. Πολλά παραδείγματα δύναται να συναντηθούν στην αεροδιαστημική, στον τομέα των ηλεκτρονικών, καθώς και σε αυτοκινητοβιομηχανίες (Ferrisi et al, 2025). Βασικές μελέτες έχουν επισημάνει την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης Weibull στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της λειτουργικής απόδοσης μηχανημάτων και υλικών. Με την πρόβλεψη αστοχιών και τον καθορισμό στρατηγικών για προληπτική συντήρηση και βελτιστοποίηση των προσεγγίσεων, η εφαρμογή της ανάλυσης Weibull ενισχύει την αξιοπιστία του εξοπλισμού, ελαχιστοποιεί το χρόνο διακοπής της λειτουργίας του και κατ' επέκταση το αντίστοιχο κόστος που συνεπάγεται αυτή, με αποτέλεσμα να ενισχύει την παραγωγικότητα (Ferrisi et al, 2025).

Η κατανομή Weibull αποτελεί ένα στατιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του χρόνου αστοχίας εξαρτημάτων και συστημάτων. Ονομάστηκε προς τιμήν του Σουηδού μηχανικού Waloddi Weibull και, σύμφωνα με τον ίδιο, δύναται να χρησιμοποιηθεί σε ευρεία γκάμα προβλημάτων, κυρίως στη μηχανική, για να περιγράψει το χρόνο αστοχίας του εξοπλισμού. Για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ενός εξαρτήματος ή συστήματος στη μηχανική συντήρησης, συχνά χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα για να προσεγγίσουν τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας του εξαρτήματος χρησιμοποιώντας διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα

(Ferrisi et al, 2025). Η εν λόγω κατανομή, όταν εκφράζεται ως συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα αποτυχίας σε μια δεδομένη στιγμή και παρέχει πληροφορίες για τη συμπεριφορά ενός εξαρτήματος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Η ισχύς της κατανομής Weibull έγκειται στην ευελιξία της, η οποία της επιτρέπει να αντιπροσωπεύει διάφορες φάσεις της ζωής ενός υλικού, όπως είναι η «βρεφική» θνησιμότητα, η ωφέλιμη ζωή και η φθορά, με βάση τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της κατανομής (Ferrisi et al, 2025).

Αν θεωρήσουμε την τυχαία μεταβλητή T η οποία ακολουθεί την κατανομή Weibull, με παραμέτρους $\beta > 0$ και $\eta > 0$, τότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function – pdf) δίνεται από τη σχέση:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot t^{(\beta-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.1)$$

Όπου:

- t = ο χρόνος
- β = η παράμετρος σχήματος που προσδιορίζει τον τύπο αστοχίας
- η = η παράμετρος κλίμακας, η οποία προσδιορίζει τη ζωή του υλικού κατά την οποία θα συμβεί το 63,2% των αστοχιών.

Η εξίσωση αυτή παρέχει μια μαθηματική απεικόνιση της πιθανότητας ότι ένα υλικό θα συνεχίσει να λειτουργεί πέραν μιας ορισμένης περιόδου. Συγκεκριμένα, η παράμετρος η σχετίζεται με το μέσο χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών αστοχιών ενός εξαρτήματος ή συστήματος $MTBF$ (Mean Time Between Failure), μέτρο το οποίο αντιπροσωπεύει το. Η τιμή $MTBF$ και η τιμή της παραμέτρου η συνδέονται μέσω της συνάρτησης Γ :

$$MTBF = \eta \cdot \Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.2)$$

Για $\beta=1$, το $MTBF$ και η παράμετρος η ταυτίζονται. Έχοντας ορίσει τις δύο παραμέτρους της κατανομής Weibull, παίρνουμε την αθροιστική συνάρτηση

κατανομής αστοχιών (cumulative distribution function - cdf) $F(t)$, την αξιοπιστία του συστήματος $R(t)$ και το ρυθμό αστοχιών $\lambda(t)$ ως κάτωθι:

$$F(t) = 1 - e^{(-\frac{t}{\eta})^\beta} \quad (2.3)$$

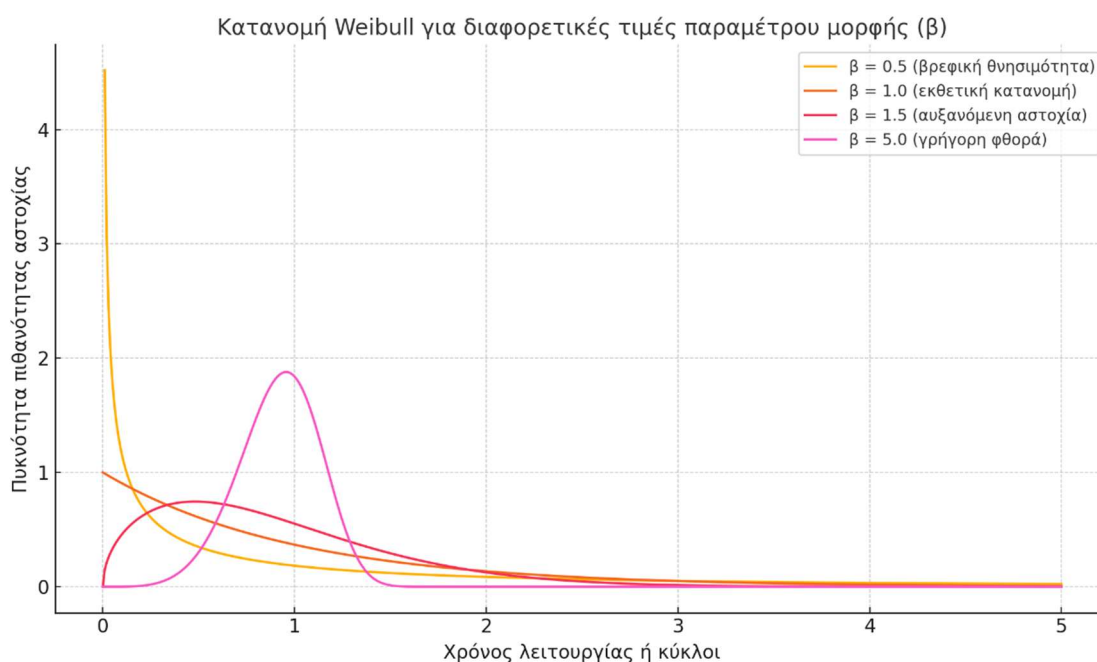
$$R(t) = e^{(-\frac{t}{\eta})^\beta} \quad (2.4)$$

$$\lambda(t) = \frac{F(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot t^{(\beta-1)} \quad (2.5)$$

Μια αλλαγή στην τιμή της παραμέτρου σχήματος β έχει ως αποτέλεσμα την τροποποίηση της μορφής που λαμβάνει η συνάρτηση $F(t)$. Αυτό οδηγεί στον εντοπισμό τριών διακριτών περιπτώσεων, οι οποίες μπορούν να συσχετιστούν με συγκεκριμένες φάσεις στον κύκλο ζωής ενός εξαρτήματος, ως κάτωθι:

- Αν $\beta < 1$, η συνάρτηση $F(t)$ είναι μονότονα φθίνουσα υποδεικνύοντας μείωση του ρυθμού αστοχίας. Αυτό το σενάριο είναι ανάλογο με τη φάση της «βρεφικής θνησιμότητας», κατά την οποία οι αστοχίες οφείλονται σε κατασκευαστικά ελαττώματα ή μη βέλτιστες αρχικές συνθήκες.
- Αν $\beta=1$, η συνάρτηση $F(t)$ μειώνεται μονότονα ενώ ο ρυθμός αστοχίας παραμένει σταθερός με την πάροδο του χρόνου. Κατά συνέπεια η κατανομή Weibull μετατρέπεται σε αρνητική εκθετική κατανομή με σταθερό ρυθμό αστοχιών με την πάροδο του χρόνου.
- Αν $\beta > 1$ η συνάρτηση $F(t)$ παρουσιάζει αρχική αύξηση, φτάνει σε ένα μέγιστο σημείο και στη συνέχεια μειώνεται. Αυτή η συμπεριφορά έχει επίδραση στο ρυθμό αστοχιών, ο οποίος εμφανίζει ανοδική τροχιά με την πάροδο του χρόνου. Το σενάριο αυτό είναι ανάλογο με το φαινόμενο της «θνησιμότητας της φθοράς», το οποίο περιγράφει τη συμπεριφορά εξαρτημάτων που αστοχούν κυρίως λόγω των επιπτώσεων της γήρανσης και της φθοράς με την πάροδο του χρόνου.

Οι τρεις ανωτέρω περιπτώσεις παρέχουν μια αναπαράσταση της ζωής ενός εξαρτήματος και επιδεικνύουν το μοντέλο της κατανομής Weibull ως κατάλληλο για εφαρμογή σε περιπτώσεις μηχανικής και συντήρησης.



Διάγραμμα 1: Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Κατανομής Weibull για διαφορετικές Τιμές Παραμέτρου Σχήματος β και $\eta=1$

2.5.1 Εκτίμηση Παραμέτρων Κατανομής Weibull

Η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation – MLE) αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο για την εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull β και α , και εκτιμά τις παραμέτρους μιας κατανομής πιθανότητας όταν δίνονται ορισμένα παρατηρούμενα δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης πιθανότητας, έτσι ώστε σύμφωνα με το υποτιθέμενο στατιστικό μοντέλο, τα παρατηρούμενα δεδομένα να είναι πιο πιθανά. Το σημείο στο χώρο των παραμέτρων που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση πιθανότητας ονομάζεται εκτίμηση μέγιστης πιθανότητας. Η λογική της μέγιστης πιθανότητας είναι τόσο διαισθητική όσο και ευέλικτη και, ως εκ τούτου, η μέθοδος αποτελεί κυρίαρχο μέσο στατιστικής εξαγωγής συμπερασμάτων.

Στην περίπτωση που και οι δύο παράμετροι η και β είναι άγνωστες, τότε οι σχέσεις με τις οποίες υπολογίζουμε τις τιμές τους με παρατηρούμενα δεδομένα $x_1, x_2, \dots, x_n$, τα οποία αντιστοιχούν στους χρόνους όπου παρατηρήθηκαν οι αστοχίες είναι:

$$\hat{\eta} = \left(\frac{\sum_{i=1}^r x_i^{\hat{\beta}} + \sum_{j=1}^k T_j^{\hat{\beta}}}{r} \right)^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \quad (2.6)$$

$$\left[\frac{\sum_{i=1}^r (x_i^{\hat{\beta}} \ln x_i) + \sum_{j=1}^k (T_j^{\hat{\beta}} \ln T_j)}{\sum_{i=1}^r x_i^{\hat{\beta}} + \sum_{j=1}^k T_j^{\hat{\beta}}} \right] - \frac{1}{\hat{\beta}} - \frac{\sum_{i=1}^r \ln x_i}{r} = 0 \quad (2.7)$$

Από τη δεύτερη σχέση υπολογίζουμε την τιμή της παραμέτρου β και κατόπιν θέτουμε την τιμή αυτή στην πρώτη σχέση για την εκτίμηση της παραμέτρου η . Σημειώνεται ότι με T σημειώνονται οι χρόνοι των εξαρτημάτων που λειτούργησαν χωρίς κάποια αστοχία μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή.

Εναλλακτικά με τη μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας, για τον υπολογισμό των παραμέτρων της κατανομής Weibull δύναται να γίνει χρήση της Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares Method). Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων εφαρμόζεται με γραμμικοποίηση της συνάρτησης $F(t)$ (Τύπος 3), όπου με κατάλληλους λογαριθμικούς μετασχηματισμούς, η $F(t)$ μετατρέπεται σε γραμμική μορφή:

$$\ln[-\ln(1 - F(t))] = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta) \quad (2.8)$$

Η τελευταία συνάρτηση είναι της μορφής $Y=AX+B$ και, κατά συνέπεια, αν υπολογιστεί για κάθε αστοχία η τιμή $F(t)$, μπορούμε να εφαρμόσουμε γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των μετασχηματισμένων μεταβλητών $X = \ln(t)$ και $Y = \ln[-\ln(1 - F(t))]$. Η κλίση

της ευθείας αντιστοιχεί στο β , ενώ από το σημείο τομής προκύπτει το η . Επομένως για τον υπολογισμό των παραμέτρων προκύπτει ότι:

$$A = \beta \quad (2.9)$$

$$B = -\beta \ln(\eta) \quad (2.10)$$

Η μέθοδος αυτή, αν και δεν αξιοποιεί τα λογοκριμένα δεδομένα (π.χ. εξαρτήματα σε λειτουργία), παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις περιορισμένου πλήθους αστοχιών, όπως συχνά συμβαίνει στο πλαίσιο της αεροπορικής τεχνικής αξιοπιστίας. Αποτελεί επίσης τη βάση του τύπου που εφαρμόζεται στο πρότυπο ΕΠΑ Γ-3 της Πολεμικής Αεροπορίας.

2.5.2 Διορθωμένη Διάμεση Βαθμίδα

Η εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull μπορεί να γίνει, όπως αναφέρθηκε, μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (Least Squares) εφαρμόζοντας κατάλληλους λογαριθμικούς μετασχηματισμούς. Μια κρίσιμη παράμετρος της διαδικασίας είναι η προσέγγιση της συνάρτησης κατανομής $F(t)$, δηλαδή του ποσοστού αστοχίας μέχρι τον χρόνο t . Όταν υπάρχουν δεδομένα χωρίς αστοχία (λογοκριμένα, τύπου S), όπως στη μελέτη που θα ακολουθήσει, η χρήση μόνο των πραγματικών αστοχιών οδηγεί σε υπερεκτίμηση της συνάρτησης $F(t)$. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η χρήση της διορθωμένης μορφής της διάμεσης βαθμίδας με βάση την προσέγγιση Benard, λαμβάνοντας υπόψη και το συνολικό πλήθος των δεδομένων (F και S). Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι της μορφής:

$$F(i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \quad (2.11)$$

Όπου i είναι η σειρά κατάταξης των αστοχιών, κατόπιν διόρθωσης και τοποθέτησής τους στη σωστή διάταξη ανάμεσα στα δεδομένα χωρίς αστοχία, και N το συνολικό μέγεθος του δείγματος. Η διορθωμένη κατάταξη προκύπτει από τη σχέση:

$$i(\text{Διορθωμένη κατάταξη}) = \frac{(\text{Ανάστροφη κατάταξη}) \times (\text{Προηγούμενη κατάταξη}) + (N+1)}{(\text{Ανάστροφη κατάταξη}) + 1} \quad (2.12)$$

Το i που προκύπτει από την (3.12) χρησιμοποιείται στην (3.11) για τον υπολογισμό του $F(i)$, δίνοντας ακριβέστερη εκτίμηση συγκριτικά με το να μην υπολογιζόταν τα δεδομένα χωρίς αστοχία.

2.5.3 Εναλλακτικές Κατανομές Αξιοπιστίας

Εκτός από την κατανομή Weibull, στην ανάλυση αξιοπιστίας χρησιμοποιούνται ευρέως και η εκθετική (Exponential) και η λογαριθμοκανονική (Lognormal) κατανομή. Η εκθετική κατανομή αποτελεί ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull για παράμετρο σχήματος $\beta = 1$ και χρησιμοποιείται για την περιγραφή αστοχιών που εμφανίζονται με σταθερό ρυθμό στον χρόνο. Η βασική της παραδοχή είναι ότι η πιθανότητα αστοχίας παραμένει αμετάβλητη ανεξάρτητα από την ηλικία ή τη διάρκεια λειτουργίας του εξαρτήματος, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για την περιγραφή τυχαίων αστοχιών (Ebeling, 2019).

Η λογαριθμοκανονική κατανομή χρησιμοποιείται όταν ο λογάριθμος του χρόνου μέχρι την αστοχία ακολουθεί κανονική κατανομή. Η συγκεκριμένη κατανομή εφαρμόζεται συχνά σε φαινόμενα φθοράς και γήρανσης, όπου η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων επηρεάζεται από πολλούς ανεξάρτητους παράγοντες. Παρουσιάζει ιδιαίτερη χρησιμότητα στην ανάλυση δεδομένων αξιοπιστίας και συντήρησης, καθώς μπορεί να περιγράψει αποτελεσματικά ασύμμετρες κατανομές χρόνων αστοχίας (Modarres et al., 2017).

Παρότι η κατανομή Weibull αποτελεί το βασικό εργαλείο ανάλυσης της παρούσας εργασίας και προτείνεται από το Εγχειρίδιο ΕΠΑ Γ-3, κρίθηκε σκόπιμο να συγκριθεί η καταλληλότητά της με τις κατανομές Exponential και Lognormal μέσω probability plots και δεικτών προσαρμογής. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει την τεκμηριωμένη επιλογή της κατανομής που περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πραγματικά δεδομένα αστοχιών των υπό εξέταση εξαρτημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

3.1 Συντήρηση Αεροσκαφών Rafale H3R

Η Πολεμική Αεροπορία διαθέτει ένα στόλο 24 Α/Φ Rafale H3R, εκ των οποίων τα 6 διθέσια και τα υπόλοιπα 18 μονοθέσια. Η έδρα των επιχειρήσεων τους είναι η 114 Πτέρυγα Μάχης στην Αεροπορική Βάση Τανάγρας και, συγκεκριμένα, η 332 Μοίρα, η οποία πριν την άφιξη των Α/Φ Rafale επιχειρούσε με Α/Φ Mirage 2000. Τα πρώτα 6 Rafale προσγειώθηκαν στην Τανάγρα την 19 Ιανουαρίου 2022, ημερομηνία έναρξης των επιχειρήσεων τους από ελληνικού εδάφους.

Τα Α/Φ Rafale είναι γαλλικής κατασκευής και κατασκευάστρια εταιρεία είναι η Dassault Aviation. Αποτελεί ένα δικινητήριο, δελταπτέρυγο μαχητικό αεροσκάφος πολλαπλών ρόλων, καλύπτοντας όλο το φάσμα των επιχειρησιακών αποστολών. Φέρει το Radar AESA RBE2 της εταιρείας Thales, ενώ οι κινητήρες του είναι οι M88 Turbofan διπλού άξονα της εταιρείας Snecma, έχοντας και τη δυνατότητα μετάκαυσης (Afterburner). Επιπρόσθετα, το Rafale έχει τη δυνατότητα να φέρει πληθώρα πυραύλων, χαρακτηριστικότεροι των οποίων αποτελούν οι Mica, Meteor (Αέρος – Αέρος), Scalp (Αέρος – Εδάφους) και Exocet (Αέρος – Επιφανείας). Πολύ σημαντικό κομμάτι του Α/Φ αποτελεί το σύστημα αυτοπροστασίας SPECTRA, το οποίο παρέχει δυνατότητα ανίχνευσης μεγάλης εμβέλειας, αναγνώριση και ακριβή εντοπισμό των υπέρυθρων, ηλεκτρομαγνητικών και laser απειλών.

Η καθημερινή συντήρηση του Α/Φ και η εξυπηρέτηση των πτήσεων είναι έργο του Α΄ Βαθμού Συντήρησης (OLM), ο οποίος αποτελείται από 3 ειδικότητες τεχνικού προσωπικού: τους μηχανικούς (Vector), τους ηλεκτρονικούς (Avionics) και τους οπλουργούς (Armament). Χαρακτηριστικά συστήματα με τα οποία απασχολείται η κάθε ειδικότητα είναι για τους μηχανικούς ο κινητήρας, το υδραυλικό σύστημα, το σύστημα καυσίμου, σύστημα προσγείωσης, για τους ηλεκτρονικούς το Radar και το σύστημα αυτοπροστασίας, και για τους οπλουργούς οι φορείς που φέρουν τους πυραύλους και τις εξωτερικές δεξαμενές καυσίμου, το εκτινασσόμενο κάθισμα και το πυροβόλο του Α/Φ.

Η τεχνική βιβλιογραφία FIELD 6 και τα εγχειρίδια που συνοδεύουν το Α/Φ Rafale είναι σε ηλεκτρονική μορφή και παρέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες τόσο για την προγραμματισμένη, όσο και για την απρογραμματίστη συντήρηση του. Το Α/Φ

κατά την πτήση του φέρει μία κάρτα καταγραφής των δεδομένων των συστημάτων ανά πάσα στιγμή και με την επιστροφή του η κάρτα αυτή εξάγει όλα τα δεδομένα μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι ώρες λειτουργίας των εξαρτημάτων και οι κοπώσεις αυτών εισάγονται αυτόματα για το κάθε Α/Φ και το τεχνικό προσωπικό δεν χρειάζεται να υπολογίζει τα νέα υπόλοιπα για τις επερχόμενες περιοδικές επιθεωρήσεις. Η χρησιμότητά τους όμως δεν περιορίζεται εκεί, καθώς μετά την πτήση εμφανίζονται στο πρόγραμμα HUMS (Health and Usage Monitoring System) όλες οι δυσλειτουργίες που εμφάνισε το Α/Φ, με διαθέσιμες όλες τις παραμέτρους (υψόμετρο, ταχύτητα κλπ) και αυτόματα παραπέμπει στο αντίστοιχο εδάφιο της τεχνικής βιβλιογραφίας για την επίλυση της εν λόγω δυσλειτουργίας. Γίνεται εύκολα κατανοητό πως αυτό αποτελεί σημαντική βοήθεια για τους τεχνικούς του Α/Φ, χωρίς όμως να αποτελεί «πανάκεια» καθώς ο ανθρώπινος παράγοντας με την κρίση και την εμπειρία του πρέπει να αξιολογεί όλα τα δεδομένα.

Όπως προαναφέρθηκε, με την επιστροφή του Α/Φ από πτήση, αφαιρείται από αυτό η κασέτα και τοποθετείται σε ειδική θύρα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η εισαγωγή και ο συγχρονισμός όλων των δεδομένων της πτήσης και του Α/Φ. Το τεχνικό προσωπικό όλων των ειδικοτήτων θα αξιολογήσει όλες τις δυσλειτουργίες και θα αποφασίσει τις διορθωτικές ενέργειες που πρέπει ή όχι να εκτελεστούν, ώστε το Α/Φ να είναι και πάλι διαθέσιμο για την εκτέλεση αποστολής. Αν για παράδειγμα αποφασιστεί πως απαιτείται αντικατάσταση της αντλίας υδραυλικού, τότε η αντίστοιχη ειδικότητα θα προβεί στην εξεύρεση αποθέματος του υλικού, θα αφαιρέσει την αντλία του Α/Φ και θα τοποθετήσει την καινούρια ή επισκευασμένη, πάντα ακολουθώντας πιστά τα βήματα της τεχνικής βιβλιογραφίας. Κατόπιν θα διακινήσει την αντλία με τη βλάβη προς επισκευή, συνήθως στην κατασκευάστρια εταιρεία, και θα ενημερώσει τόσο το έντυπο μητρώο που συνοδεύει το υλικό, όσο και τα προγράμματα που αναφέρθηκαν, ώστε πλέον η νέα αντλία να υπολογίζεται σαν μέρος του Α/Φ και να υπολογίζονται σε αυτήν οι ώρες λειτουργίας. Αν το υλικό λειτουργούσε ακόμα στα πλαίσια κάποιας εγγύησης τότε ο κατασκευαστής επιβαρύνεται με το κόστος επισκευής ή αντικατάστασής του, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα προβεί σε προσφορά επισκευής ανάλογα με τα ευρήματα που θα προκύψουν. Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται διθέσιο Α/Φ Rafale κατά τη διάρκεια πτήσης.



Εικόνα 1: Διθέσιο Α/Φ Rafale της Ελληνικής ΠΑ

3.1.1 Υδραυλικό Σύστημα Α/Φ Rafale H3R

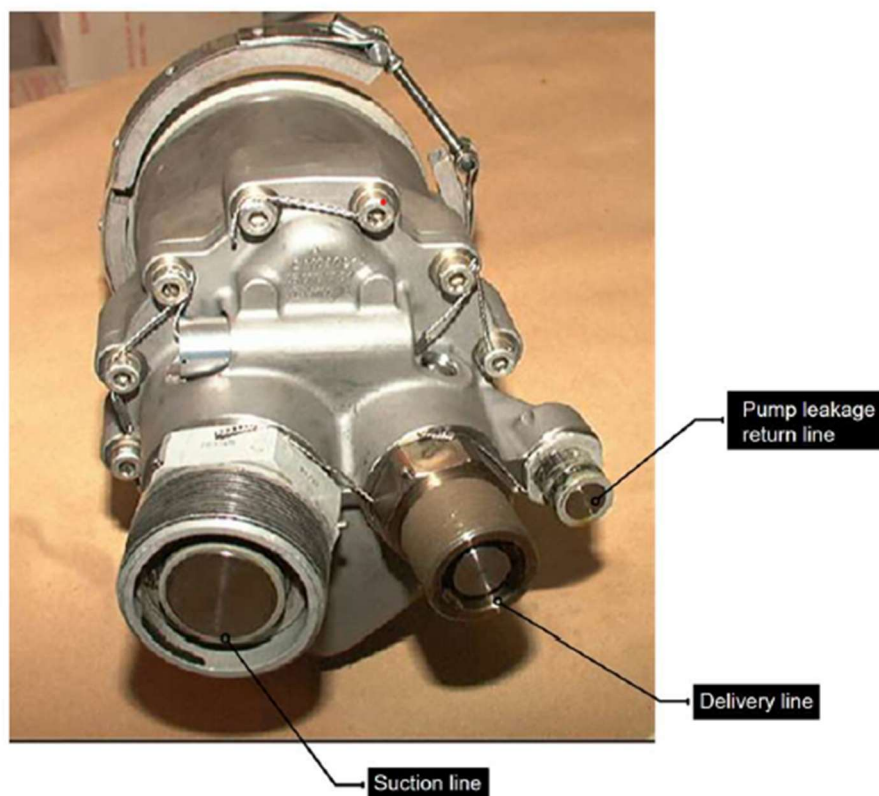
Το υδραυλικό σύστημα έχει ως σκοπό την παροχή ισχύος που απαιτείται για τον έλεγχο του Α/Φ, τόσο στο έδαφος όσο και κατά τη διάρκεια της πτήσης. Το Α/Φ Rafale διαθέτει δύο πανομοιότυπα και ανεξάρτητα μεταξύ τους υδραυλικά συστήματα, και για το λόγο αυτό δεν διαθέτει σύστημα έκτακτης ανάγκης. Κύριο εξάρτημα των υδραυλικών συστημάτων αποτελεί η αντλία υδραυλικού (self-regulating pump), η οποία παίρνει ισχύ από τον αντίστοιχο κινητήρα, διαμέσου ενός μειωτήρα στροφών (accessory gearbox). Οι αντλίες παίρνουν ισχύ αυτόματα, αμέσως μόλις τίθεται σε λειτουργία ο κινητήρας, χωρίς την απαίτηση ενεργειών από τον χειριστή του αεροσκάφους. Το κάθε σύστημα διαθέτει τη δικιά του αντλία υδραυλικού, οι οποίες στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως P1 και P2, για το σύστημα υδραυλικού Νο1 και το σύστημα Νο2, αντίστοιχα, όπως και από μία δεξαμενή υδραυλικού υγρού (hydraulic reservoir), το οποίο είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του επηρεαζόμενου εξοπλισμού, και οδηγείται με χαμηλή πίεση στην αντλία από όπου και διανέμεται με πίεση 350 bar.

Η υψηλή πίεση με την οποία διανέμει η αντλία το υδραυλικό υγρό προσφέρει πλεονεκτήματα στη λειτουργία του Α/Φ τα οποία είναι η μείωση του βάρους, καθώς απαιτείται μικρότερη διατομή σωληνώσεων, και υψηλότερες ταχύτητες απόκρισης, ενώ τα μειονεκτήματα είναι η δημιουργία κραδασμών στο σύστημα και οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο υδραυλικό υγρό. Για την αντιμετώπιση των εν λόγω μειονεκτημάτων, ο κατασκευαστής έχει προβλέψει, τοποθετώντας ένα αποσβεστήρα κραδασμών αμέσως μετά την αντλία υδραυλικού (pulse damping capacity), καθώς και ένα ψυγείο (heat exchanger) πριν την επιστροφή του υδραυλικού υγρού στη δεξαμενή του με σκοπό την ψύξη αυτού.

Το σύστημα ελέγχει και επιβλέπει για την ορθή του λειτουργία ένας υπολογιστής (hydraulic computer), ο οποίος για το σκοπό αυτό λαμβάνει πληροφορίες με ηλεκτρικό σήμα, όπως θερμοκρασία, πίεση, ποσότητα υδραυλικού υγρού, από διάφορους αισθητήρες και τις αξιολογεί με βάση τις προβλεπόμενες τιμές. Τα συστήματα του Α/Φ που λειτουργούν μέσω του υδραυλικού συστήματος είναι το σύστημα ελέγχου πτήσης (Flight Control System – FCS) που περιλαμβάνει τις κινητές επιφάνειες για τον έλεγχο του Α/Φ, το σύστημα προσγείωσης (normal και emergency), καθώς και το σύστημα πέδησης.

Η λειτουργία των συστημάτων τα οποία λειτουργούν με υδραυλική ισχύ είναι κατανοητή στα δύο υδραυλικά συστήματα, ενώ σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή απώλειας του ενός, αναλαμβάνει το άλλο υδραυλικό σύστημα, με μειωμένες λειτουργίες σε εξοπλισμό που δεν τον θεωρεί ζωτικής σημασίας για τον ασφαλή χειρισμό του Α/Φ, καθιστώντας δυνατή την μετάβαση και προσγείωση σε κάποιο αεροδρόμιο.

Ο χειριστής του Α/Φ έχει ανά πάσα στιγμή εικόνα για την κατάσταση του υδραυλικού συστήματος και του επηρεαζόμενου εξοπλισμού, καθώς σε μία από τις οθόνες του μπορεί να δει την Hydraulic Page που περιλαμβάνει όλες τις καίριες πληροφορίες. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας, θα έχει ενδείξεις στην κύρια οθόνη του καθώς και ηχητική προειδοποίηση, ενώ θα του εμφανιστούν και όλες οι απαραίτητες ενέργειες στις οποίες πρέπει να προβεί είτε για την τυχόν εξάλειψη του προβλήματος είτε για την ασφαλή προσγείωσή του στο εκάστοτε αεροδρόμιο.



Εικόνα 2: Αντλία Υδραυλικού Α/Φ Rafale

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται οπτικά μία αντλία υδραυλικού του Α/Φ Rafale. Οι δύο αντλίες που διαθέτει το Α/Φ, μία για κάθε υδραυλικό σύστημα, είναι πανομοιότυπες και ακολουθούν ακριβώς την ίδια αρχή λειτουργίας. Στην αντλία υπάρχουν τρεις γραμμές υδραυλικού υγρού:

- Η γραμμή αναρρόφησης (suction line): Είναι η γραμμή από την οποία η αντλία λαμβάνει το υδραυλικό υγρό από την αντίστοιχη δεξαμενή υδραυλικού (hydraulic reservoir) του συστήματος.
- Η γραμμή διανομής (delivery line): Από εκεί η αντλία προωθεί το υδραυλικό σε όλα τα απαραίτητα συστήματα του αεροσκάφους.
- Η γραμμή επιστροφής διαρροών (leakage return line): Η γραμμή αυτή συνδέεται με την γενική γραμμή επιστροφής του συστήματος, και η οποία είναι εξοπλισμένη με ένα φίλτρο απόφραξης το οποίο ανιχνεύει τυχόν διαρροές στο σύστημα μέσω ενδείκτη μείωσης της πίεσης.

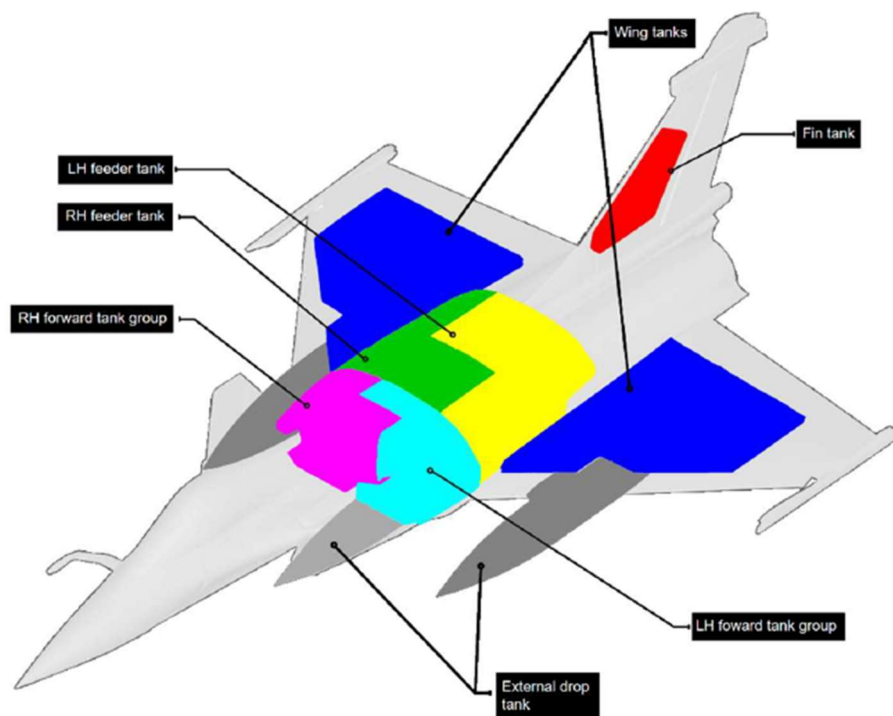
Οι υδραυλικές αντλίες αποτελούνται από επιμέρους μηχανικά στοιχεία υψηλής ακρίβειας, όπως το σώμα της αντλίας (housing), τον άξονα μετάδοσης κίνησης (drive shaft), το σύστημα εμβόλων ή περιστρεφόμενων στοιχείων άντλησης, τα έδρανα κύλισης (bearings), τις βαλβίδες ελέγχου πίεσης και παροχής, καθώς και τα στοιχεία στεγανοποίησης (seals και O-rings). Η συνεργασία των παραπάνω εξαρτημάτων επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής πίεσης και παροχής υδραυλικού υγρού σε όλο το εύρος λειτουργίας του αεροσκάφους. Η αξιοπιστία της αντλίας εξαρτάται από την κατάσταση όλων των παραπάνω υποσυστημάτων. Οι συνηθέστεροι μηχανισμοί υποβάθμισης περιλαμβάνουν τη φυσιολογική φθορά λόγω τριβής, την κόπωση μεταλλικών στοιχείων από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης, τη γήρανση των στοιχείων στεγανοποίησης, τη φθορά των εδράνων, καθώς και πιθανή διάβρωση ή επιφανειακή φθορά του σώματος της αντλίας.

Μετά την εκτέλεση Γενικής Επισκευής πραγματοποιείται πλήρης αποσυναρμολόγηση της αντλίας, καθαρισμός, επιθεώρηση όλων των επιμέρους εξαρτημάτων, αντικατάσταση των αναλώσιμων στοιχείων, όπως τσιμούχες, στεγανοποιητικά και έδρανα όπου απαιτείται, καθώς και επανέλεγχος της λειτουργικής απόδοσης της αντλίας πριν από την επανατοποθέτησή της σε αεροσκάφος. Παρά τη διαδικασία αυτή, η εμφάνιση διαρροών σε μικρό αριθμό αντλιών αμέσως μετά τη γενική επισκευή υποδηλώνει ότι ενδέχεται να υπάρχουν μηχανισμοί υποβάθμισης που δεν ανιχνεύονται πλήρως κατά τις ισχύουσες διαδικασίες ελέγχου. Για τον λόγο αυτό, όπως θα δούμε εν συνεχεία, εξετάζεται στην παρούσα εργασία η δυνατότητα εφαρμογής συμπληρωματικών μη καταστροφικών ελέγχων (Non - Destructive Inspection – NDI), με στόχο την έγκαιρη ανίχνευση επιφανειακών ασυνεχειών ή άλλων ενδείξεων υποβάθμισης πριν από την επαναχρησιμοποίηση της αντλίας.

3.1.2 Σύστημα Καυσίμου A/Φ Rafale H3R

Στο A/Φ Rafale το καύσιμο βρίσκεται αποθηκευμένο σε 7 εσωτερικές και 3 εξωτερικές δεξαμενές. Οι δεξαμενές της αριστερής πλευράς του A/Φ τροφοδοτούν με καύσιμο τον αριστερό κινητήρα και τον εκκινητήρα (Auxiliary Power Unit) μέσω της αριστερής τροφοδότριας δεξαμενής (LH Feeder Tank), ενώ οι δεξαμενές της δεξιάς πλευράς τον αντίστοιχο δεξί κινητήρα διαμέσου της δεξιάς τροφοδότριας δεξαμενής. Η δεξαμενή

που βρίσκεται στο κάθετο σταθερό (ουραίο) του Α/Φ, καθώς και η κεντρική εξωτερική δεξαμενή, τροφοδοτούν με καύσιμο και τους 2 κινητήρες. Το Α/Φ δύναται να φέρει έως και 3 υπερηχητικού τύπου εξωτερικές δεξαμενές χωρητικότητας 1250 λίτρων έκαστη ή 3 υποηχητικού τύπου εξωτερικές δεξαμενές χωρητικότητας 2000 λίτρων η κάθε μία. Ο χρησιμοποιούμενος τύπος καυσίμου είναι το JP-8 (NATO Code F-34), το οποίο περιέχει αντιπαγωτικό πρόσθετο, ενώ το καύσιμο τύπου JET-A1 (NATO Code F-35) το οποίο δεν περιέχει αντίστοιχο πρόσθετο, δύναται να χρησιμοποιηθεί με επιχειρησιακούς περιορισμούς στην πτήση, κυρίως όσον αφορά το υψόμετρο. Στην Εικόνα 2 απεικονίζονται οι δεξαμενές καυσίμου του Α/Φ Rafale.

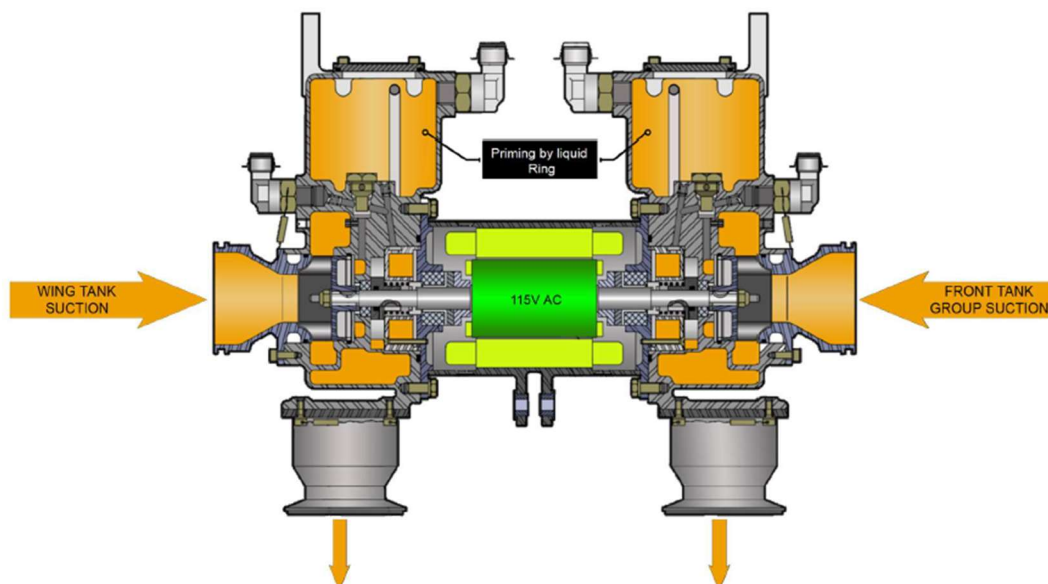


Εικόνα 3:Εσωτερικές και Εξωτερικές Δεξαμενές Καυσίμου Α/Φ Rafale

Το σύστημα καυσίμου επιτελεί τις λειτουργίες του ανεφοδιασμού, είτε στο έδαφος είτε στην πτήση (εναέριος ανεφοδιασμός), την τροφοδοσία των κινητήρων και του εκκινητήρα με το απαραίτητο για τη λειτουργία τους καύσιμο, την ψύξη ελαίου και υδραυλικού υγρού, καθώς και την ενημέρωση του χειριστή για την ποσότητα του καυσίμου και την κατάσταση του συστήματος εν γένει, μέσω ενδείξεων στις οθόνες

του πιλοτηρίου. Όλες οι ανωτέρω λειτουργίες συντονίζονται και ελέγχονται από τον υπολογιστή καυσίμου (Fuel Computer).

Η διαδικασία μεταφοράς καυσίμου από τις εσωτερικές και εξωτερικές δεξαμενές προς τις τροφοδότρες και από εκεί στους κινητήρες, γίνεται πλήρως αυτόματα και επιτυγχάνεται μέσω βαλβίδων και αντλιών καυσίμου (fuel transfer pumps), πάντα υπό την επίβλεψη του υπολογιστή καυσίμου. Το καύσιμο στις δεξαμενές είναι συμπιεσμένο με αέρα, ενώ βαλβίδες μη επιστροφής αποτρέπουν την αντίστροφη ροή του καυσίμου στις σωληνώσεις. Επιπρόσθετα, σε όλες τις δεξαμενές καυσίμου υπάρχουν αισθητήρες (level detectors) και μετρητές (gauges) οι οποίοι ανιχνεύουν τη στάθμη και άλλα χαρακτηριστικά του καυσίμου και δίνουν πληροφορίες διαμέσου του υπολογιστή για την διαθέσιμη ποσότητα και την κατανάλωση καυσίμου.



Εικόνα 4: Αντλία Καυσίμου Α/Φ Rafale

Η αντλία μεταφοράς καυσίμου (fuel transfer pump) ή αντλία καυσίμου, όπως θα αναφέρεται στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά καυσίμου από το εμπρόσθιο τμήμα δεξαμενών και τις δεξαμενές των πτερύγων. Είναι φυγοκεντρικού τύπου, με αυτόματη πλήρωση, και με δακτύλιο υγρού, ενώ ελέγχεται από τον υπολογιστή καυσίμου. Ο υπολογιστής καυσίμου διακόπτει αυτόματα τη λειτουργία της αντλίας μετά από χρονικό διάστημα πέντε λεπτών, αφότου οι εμπρόσθιες δεξαμενές και οι αντίστοιχες των πτερύγων, δώσουν την ένδειξη ότι είναι άδειες από καύσιμο.

3.2 Συλλογή και Ανάλυση Δεδομένων

Η ανάλυση δεδομένων είναι η διαδικασία μετατροπής των συλλεγόμενων δεδομένων σε σημαντικές πληροφορίες. Διαφορετικές τεχνικές, όπως η μοντελοποίηση για την επίτευξη τάσεων, συσχετισμών και, επομένως, συμπερασμάτων για τη λήψη αποφάσεων, αποτελούν μέρος της διαδικασίας αυτής. Ωστόσο, τα δεδομένα πρέπει να υποστούν προεργασία πριν γίνουν αντικείμενο ανάλυσης, ανάλογα με τη μέθοδο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Η ανάλυση δεδομένων δύναται να κατηγοριοποιηθεί σε ορισμένες κύριες μεθόδους, όπως είναι η περιγραφική, ερευνητική, συμπερασματική, προβλεπτική και επεξηγηματική (Taherdoost, 2022).

Η προβλεπτική ή προγνωστική ανάλυση χρησιμοποιεί ιστορικά και τρέχοντα δεδομένα για να φτάσει σε μελλοντικές προβλέψεις, ενώ από στοιχεία ενός συστήματος δύναται να προκύψει πρόβλεψη για τη μελλοντική συμπεριφορά ενός άλλου συστήματος. Υφίσταται πληθώρα προγνωστικών μοντέλων, ωστόσο είναι αποδεκτό πως ένα απλό μοντέλο με τη χρήση περισσότερων δεδομένων μπορεί να λειτουργήσει πιο ικανοποιητικά. Συνεπώς, τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν προς ανάλυση και ο προσδιορισμός των εκάστοτε μεταβλητών μέτρησης και παραμέτρων, είναι οι σημαντικότερες πτυχές που πρέπει να ληφθούν υπόψη για πιο ακριβείς προβλέψεις (Taherdoost, 2022).

Σημαντικά εργαλεία για την ανάλυση δεδομένων και την ανάλυση αξιοπιστίας των συστημάτων αποτελούν οι κατανομές πιθανοτήτων. Οι κατανομές πιθανοτήτων εφαρμόζονται ευρέως σε όλους τους τομείς της μηχανικής και αεροδιαστημικής, διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στη μοντελοποίηση ρεαλιστικών γεγονότων και σεναρίων. Δεδομένο αποτελεί το γεγονός πως καμία συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας δεν δύναται να παρέχει ιδανική προσαρμογή στην εκάστοτε περίπτωση υπό μελέτη, επομένως αποτελεί επιδίωξη η εύρεση αυτής με την πιο ικανοποιητική προσαρμογή από τις υπόλοιπες ώστε να προσεγγίζει την πραγματικότητα (Teimourian et al, 2022).

Στην παρούσα εργασία, οι μηχανισμοί αστοχίας που επιλέχθηκαν προς ανάλυση είναι οι διαρροές από τις αντλίες υδραυλικού και από τις αντλίες καυσίμου του Α/Φ Rafale. Τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν αφορούν βλάβες για την αποκατάσταση των οποίων απαιτήθηκε κάποια διορθωτική ενέργεια από την κατασκευάστρια εταιρεία των εξαρτημάτων, καθώς η αποκατάσταση επιβεβαιωμένων διαρροών των αντλιών δεν

είναι δυνατή σε επίπεδο συντήρησης της μονάδας. Δεν κρίνεται σκόπιμη η αξιοποίηση στοιχείων όπου απαιτήθηκε απλά κάποιου είδους λειτουργικός έλεγχος και όπου η διαρροή δεν επιβεβαιώθηκε να είναι εκτός των προβλεπόμενων ορίων, οπότε και το αντίστοιχο εξάρτημα διατέθηκε εκ νέου προς χρησιμοποίηση.

Οι παράμετροι οι οποίες καταγράφονται και τηρούνται ως στατιστικά στοιχεία σε κάθε είδους δυσλειτουργία ή βλάβη είναι οι παρακάτω:

- Serial Number επηρεαζόμενου υλικού και Α/Φ
- Ημερομηνία και ώρα γεγονότος
- Επηρεαζόμενο σύστημα Α/Φ
- Ώρες Λειτουργίας υλικού και ώρες πτήσης Α/Φ
- Διορθωτική ενέργεια προς εξάλειψη της δυσλειτουργίας

Σε περίπτωση αντικατάστασης κάποιου εξαρτήματος, καταγράφονται οι ώρες λειτουργίας ή ο αριθμός προσγειώσεων του εν λόγω εξαρτήματος, καθώς επίσης διενεργείται έλεγχος του ιστορικού του από το μητρώο που διαθέτει, τόσο για να εξεταστεί αν καλύπτονται οι όροι της εγγύησης για τον εν λόγω εξάρτημα, όσο και για έλεγχο αναφορικά με το αν η εν λόγω δυσλειτουργία εμπίπτει σε καθεστώς επαναλαμβανόμενης βλάβης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

4.1 Μελέτη Διαρροών Υδραυλικών Αντλιών Α/Φ Rafale

Η λειτουργία του υδραυλικού συστήματος του αεροσκάφους Rafale βασίζεται στην αξιόπιστη παροχή υδραυλικής πίεσης προς τα επιμέρους υποσυστήματα, όπως οι επιφάνειες ελέγχου πτήσης, το σύστημα προσγείωσης, τα φρένα και άλλα βοηθητικά συστήματα. Η απαραίτητη υδραυλική πίεση παράγεται από αντλίες υψηλής πίεσης, οι οποίες αποτελούν από τα πλέον κρίσιμα εξαρτήματα του συστήματος, καθώς οποιαδήποτε δυσλειτουργία τους μπορεί να επηρεάσει άμεσα τη διαθεσιμότητα και την επιχειρησιακή ικανότητα του αεροσκάφους.

Στην πρώτη μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε σαν μηχανισμός αστοχίας οι βλάβες όπου παρατηρήθηκε διαρροή από τις υδραυλικές αντλίες του Α/Φ Rafale, εκτός των ορίων που προβλέπονται από την οικεία τεχνική βιβλιογραφία. Στην παρούσα εργασία ως μηχανισμός αστοχίας εξετάζεται η εμφάνιση διαρροής υδραυλικού υγρού. Η συγκεκριμένη αστοχία αποτελεί λειτουργικό δείκτη υποβάθμισης της κατάστασης της αντλίας και δύναται να σχετίζεται είτε με φθορά των στοιχείων στεγανοποίησης είτε με επιφανειακή φθορά του σώματος ή άλλων εσωτερικών εξαρτημάτων. Για τον λόγο αυτό η διαρροή αντιμετωπίζεται ως αντιπροσωπευτικός μηχανισμός αστοχίας για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του υπό μελέτη εξοπλισμού.

Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν προέκυψαν από τη μελέτη και καταγραφή των στοιχείων από τα αντίστοιχα μητρώα του συνόλου των επηρεαζόμενων υλικών. Στον Πίνακα 4 καταχωρήθηκαν τα κάτωθι:

- Αύξων Αριθμός (A/A) υλικών: Στην πρώτη στήλη σημειώνεται ο αύξων αριθμός της κάθε αντλίας, με το σύνολο των υλικών που εξετάστηκαν να ανέρχονται σε 55.
- Serial Number (S/N) υλικού: Στη δεύτερη στήλη καταγράφηκε ο μοναδικός σειριακός αριθμός κάθε αντλίας υδραυλικού.
- Ώρες Λειτουργίας (Χρόνος) και Περιγραφή: Στη δεύτερη και τρίτη στήλη, αντίστοιχα, σημειώνονται οι ώρες λειτουργίας του συστήματος έως την αστοχία (x_i), όπου συμπληρώνεται στην περιγραφή ως F, ή έως τις παρούσες ώρες όπου έχει λειτουργήσει χωρίς αστοχία (T_j), οπότε και αναγράφεται ως S.

Στον Πίνακα 4 απεικονίζεται η καταγραφή τόσο των αστοχιών (F) όσο και των υλικών που λειτούργησαν άνευ αστοχίας (S), με τους αντίστοιχους χρόνους:

A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	Y639	50,13	S	21	Y442	379,53	S	41	Y63	2381,18	S
2	Y644	50,13	S	22	Y420	388,9	S	42	H72	2461,15	S
3	Y607	57,56	S	23	Y422	388,9	S	43	H180	2515,28	S
4	Y608	57,56	S	24	Y197	417,43	S	44	H69	2520,1	S
5	Y441	74,92	S	25	Y362	417,43	S	45	Y9	2660,04	F
6	Y504	76,27	S	26	Y416	441,92	S	46	H192	2773,02	S
7	Y505	76,27	S	27	Y423	441,92	S	47	Y21	2779,89	F
8	Y379	79,52	S	28	Y324	444,11	S	48	H188	2883,86	S
9	Y614	79,52	S	29	Y390	444,11	S	49	Y75	2903,51	S
10	Y460	90,83	S	30	Y369	553,63	S	50	Y45	3043,73	S
11	Y506	90,83	S	31	Y216	740,57	F	51	H38	3072,66	F
12	Y460	91,5	S	32	Y147	905,87	F	52	H88	3159,5	S
13	Y471	109,7	S	33	Y58	1465,3	S	53	H158	3283,9	S
14	Y503	132,39	S	34	Y74	1888,79	S	54	H186	3290,05	F
15	Y502	132,39	S	35	Y138	2190,62	S	55	H234	3460,33	S
16	Y432	210,92	S	36	H42	2233,39	S				
17	Y426	271,75	S	37	Y95	2342,3	S				
18	Y361	303,45	S	38	Y62	2358,66	F				
19	Y302	342,44	S	39	Y62	2358,66	S				
20	Y443	342,44	S	40	Y48	2378,57	S				

Πίνακας 4: Καταγραφή Δεδομένων Αντλιών Υδραυλικού

Επόμενο βήμα της μεθόδου είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων β και η της κατανομής Weibull, με τη χρήση ελαχίστων τετραγώνων. Λόγω του ότι έχουμε μεγάλο πλήθος δεδομένων τα οποία λειτούργησαν χωρίς αστοχία, θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο Bernard, αλλά με διορθωμένη κατάταξη της διάμεσης βαθμίδας. Με την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου, η διορθωμένη κατάταξη καθώς και το $F(T)$ υπολογίζεται μόνο για τα δεδομένα αστοχιών. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ο Πίνακας 5, με τις διορθωμένες κατατάξεις των αστοχιών ως εξής:

A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ	F(T)
1	Y639	50,13	S	55		
2	Y644	50,13	S	54		
3	Y607	57,56	S	53		
4	Y608	57,56	S	52		
5	Y441	74,92	S	51		
6	Y504	76,27	S	50		
7	Y505	76,27	S	49		
8	Y379	79,52	S	48		
9	Y614	79,52	S	47		
10	Y460	90,83	S	46		
11	Y506	90,83	S	45		
12	Y460	91,5	S	44		
13	Y471	109,7	S	43		
14	Y503	132,39	S	42		
15	Y502	132,39	S	41		
16	Y432	210,92	S	40		
17	Y426	271,75	S	39		
18	Y361	303,45	S	38		
19	Y302	342,44	S	37		
20	Y443	342,44	S	36		
21	Y442	379,53	S	35		
22	Y420	388,9	S	34		
23	Y422	388,9	S	33		
24	Y197	417,43	S	32		
25	Y362	417,43	S	31		
26	Y416	441,92	S	30		
27	Y423	441,92	S	29		
28	Y324	444,11	S	28		
29	Y390	444,11	S	27		
30	Y369	553,63	S	26		

Πίνακας 5: Διορθωμένη Κατάταξη Αστοχιών Υπολογισμός Διάμεσης Βαθμίδας

A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ	F(T)
31	Y216	740,57	F	25	3,230769231	0,052901972
32	Y147	905,87	F	24	5,341538462	0,091002499
33	Y58	1465,3	S	23		
34	Y74	1888,79	S	22		
35	Y138	2190,62	S	21		
36	H42	2233,39	S	20		
37	Y95	2342,3	S	19		
38	Y62	2358,66	F	18	8,007773279	0,139129482
39	Y62	2358,66	S	17		
40	Y48	2378,57	S	16		
41	Y63	2381,18	S	15		
42	H72	2461,15	S	14		
43	H180	2515,28	S	13		
44	H69	2520,1	S	12		
45	Y9	2660,04	F	11	12,00712551	0,211319955
46	H192	2773,02	S	10		
47	Y21	2779,89	F	9	16,40641296	0,290729476
48	H188	2883,86	S	8		
49	Y75	2903,51	S	7		
50	Y45	3043,73	S	6		
51	H38	3072,66	F	5	23,00534413	0,409843757
52	H88	3159,5	S	4		
53	H158	3283,9	S	3		
54	H186	3290,05	F	2	34,00356275	0,608367559
55	H234	3460,33	S	1		

Πίνακας 5 (συνέχεια)

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων βρίσκουμε τις συντεταγμένες των σημείων των αστοχιών ως κάτωθι, με τα $F(T)$ που υπολογίσαμε παραπάνω, συμφώνως (3.11), χρησιμοποιώντας ως i τη διορθωμένη κατάταξη των αστοχιών:

$X = \ln(T)$	$Y = \ln[-(\ln(1 - \ln(T)))]$
6,60742	-2,91226142
6,808896	-2,34954113
7,765849	-1,898379638
7,930167	-1,068514988
7,886096	-1,438031712
8,030299	-0,639856761
8,098658	-0,06461156

Πίνακας 6: Υπολογισμός Συντεταγμένων Σημείων Αστοχιών

Αντιμεταθέτοντας τις συντεταγμένες προκύπτει ο Πίνακας 7:

X'	Y'
-2,91226	6,60742016
-2,34954	6,808895808
-1,89838	7,76584894
-1,43803	7,886096439
-1,06851	7,930166638
-0,63986	8,030298915
-0,06461	8,098658041

Πίνακας 7: Αντιμετάθεση Συντεταγμένων για τα Δεδομένα Αστοχιών

Η παράμετρος A' της ευθείας $Y' = A'(X') + B'$ υπολογίζεται σε υπολογιστικό φύλλο του Microsoft Excel με χρήση της συνάρτησης “*SLOPE*” (Τιμές Y' ; Τιμές X') και η παράμετρος B με τη χρήση της αντίστοιχης συνάρτησης “*INTERCEPT*” (Τιμές Y' ; Τιμές X') από όπου προκύπτει ότι: $A'=0,555235$ και $B'=8,412262292$. Κάνοντας χρήση των (3.9) και (3.10) προκύπτει η τιμή των παραμέτρων της κατανομής Weibull:

$$\beta=1,801039 \text{ και } \eta=4501,934$$

Για την εκτίμηση της πιθανότητας σύμφωνα με τον πίνακα κατανομής της πιθανότητας θα πρέπει να αναχθούν τα αποτελέσματα στην 5ετία, σύμφωνα με τις ώρες εκμετάλλευσης των συστημάτων που εξετάζουμε. Υπολογίζεται ότι το A/Φ με τα συστήματά του, σε βάθος 5ετίας θα λειτουργήσει κατά μέσο όρο 970 ώρες, το οποίο θέτουμε ως χρόνο u . Ως χρόνο t θέτουμε το χρόνο που έχει λειτουργήσει το εκάστοτε σύστημα έως και την παρούσα χρονική στιγμή χωρίς να αστοχήσει. Η μεθοδολογία Weibull για την πρόβλεψη των μελλοντικών αστοχιών δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{F(t + u) - F(t)}{1 - F(t)} \quad (4.1)$$

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζεται ο υπολογισμός για την πρόβλεψη των μελλοντικών αστοχιών για τις 48 αντλίες υδραυλικού που βρίσκονται τοποθετημένες αυτή τη στιγμή στα 24 A/Φ Rafale. Σημειώνεται ότι οι αντλίες που τηρούνται ως απόθεμα καθώς και αντλίες που βρίσκονται υπό επισκευή δεν συνεισφέρουν στην πρόβλεψη αυτή. Συναφώς, σε περίπτωση αντικατάστασης υλικού θα πρέπει το νέο υλικό να αντικαθιστά το παλιό και ο υπολογισμός να γίνεται εκ νέου.

A/A	S/N	t	$\frac{F(t + u) - F(t)}{1 - F(t)}$
1	Y639	50,13	0,066381574
2	Y644	50,13	0,066381574
3	Y607	57,56	0,067148584
4	Y608	57,56	0,067148584
5	Y441	74,92	0,068923745
6	Y504	76,27	0,06906085
7	Y505	76,27	0,06906085
8	Y379	79,52	0,069390383
9	Y614	79,52	0,069390383
10	Y460	90,83	0,07053144
11	Y506	90,83	0,07053144
12	Y460	91,5	0,070598764

Πίνακας 8: Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών

A/A	S/N	t	$\frac{F(t+u) - F(t)}{1 - F(t)}$
13	Y471	109,7	0,072416485
14	Y503	132,39	0,074654397
15	Y502	132,39	0,074654397
16	Y432	210,92	0,08218919
17	Y426	271,75	0,087832992
18	Y361	303,45	0,090715934
19	Y302	342,44	0,094211804
20	Y443	342,44	0,094211804
21	Y442	379,53	0,097489267
22	Y420	388,9	0,098310182
23	Y422	388,9	0,098310182
24	Y197	417,43	0,100792856
25	Y362	417,43	0,100792856
26	Y416	441,92	0,102904335
27	Y423	441,92	0,102904335
28	Y324	444,11	0,103092293
29	Y390	444,11	0,103092293
30	Y369	553,63	0,112322477
31	Y58	1465,3	0,17981536
32	Y74	1888,8	0,207167835
33	Y138	2190,6	0,225520724
34	H42	2233,4	0,228052506
35	Y95	2342,3	0,234426669
36	Y62	2358,7	0,235375322
37	Y48	2378,6	0,236526763
38	Y63	2381,2	0,236677457
39	H72	2461,2	0,241267149
40	H180	2515,3	0,244344007
41	H69	2520,1	0,244616837
42	H192	2773	0,258678514

Πίνακας 8 (συνέχεια)

A/A	S/N	t	$\frac{F(t+u) - F(t)}{1 - F(t)}$
43	H188	2883,9	0,264689558
44	Y75	2903,5	0,265745963
45	Y45	3043,7	0,273205646
46	H88	3159,5	0,279263297
47	H158	3283,9	0,285673998
48	H234	3460,3	0,294597463

Πίνακας 8 (συνέχεια)

Αθροίζοντας τις επιμέρους αστοχίες, όπως υπολογίστηκαν στη στήλη 4 του Πίνακα 8, για κάθε μία από τις 48 αντλίες των 24 Α/Φ, προκύπτει αναμενόμενος αριθμός αστοχιών, για την επόμενη πενταετία, περίπου ίσος με 6,95109132. Συνεπώς με βάση τον Πίνακα 1 για την ταξινόμηση της πιθανότητας αυτή κατηγοριοποιείται ως Υψηλή, εφόσον είναι τιμή μεγαλύτερη του 4 για την επόμενη 5ετία.

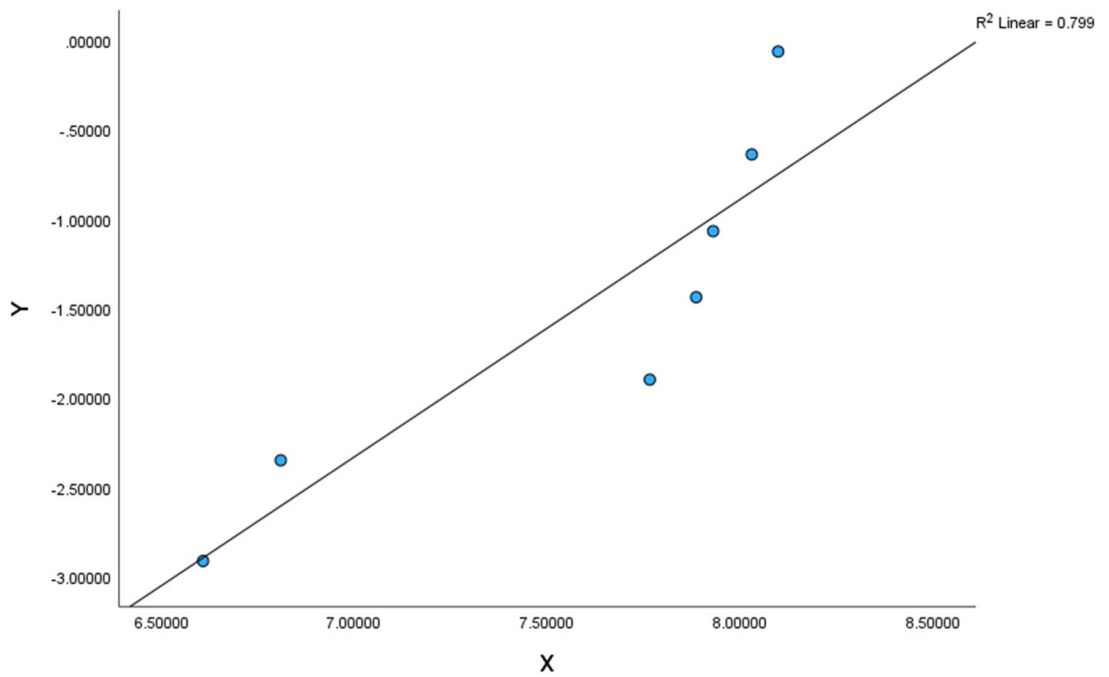
Με βάση τα τηρούμενα στοιχεία για επισκευές και αντικαταστάσεις των επηρεαζόμενων υλικών, και με γνώμονα το ότι δεν έχει προκύψει ποτέ τραυματισμός προσωπικού, η δριμύτητα κατηγοριοποιείται ως Μέτρια, συμφώνως του Πίνακα 2. Συγκεκριμένα, το μέσος κόστος επισκευής των αντλιών που αστόχησαν προκύπτει ίσο με 3524,7 ευρώ και επομένως το συνολικό κόστος ανέρχεται σε 3524,7 x 7 (αριθμός αστοχιών) = 24672,9, το οποίο είναι μεγαλύτερο των 20 χιλιάδων ευρώ αλλά μικρότερο των 500 χιλιάδων. Συνεπώς, η επικινδυνότητα προκύπτει Κατηγορίας «Β» (Πίνακας 3), ήτοι Μεγάλη. Το επίπεδο αυτό της επικινδυνότητας κρίνεται μη αποδεκτό, και πρέπει να εφαρμοστούν άμεσα μέτρα ελέγχου χωρίς να διακοπεί η λειτουργία των αντλιών και κατ' επέκταση η δραστηριότητα των Α/Φ. Επομένως, επιβάλλεται για τη μείωση ή αποφυγή παρόμοιων περιστατικών στο μέλλον, να αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης για τις υδραυλικές αντλίες των Α/Φ Rafale. Σημειώνεται πως τα οφέλη θα είναι η ανίχνευση του μηχανισμού αστοχίας πριν αυτή συμβεί, το οποίο θα έχει και επιχειρησιακό όφελος καθώς θα προλαμβάνονται ματαιώσεις πτήσεων την τελευταία στιγμή και ενώ το Α/Φ έχει εκκινήσει για την εκτέλεση της αποστολής του ή η επιστροφή του Α/Φ από πτήση με διαδικασίες έκτακτης ανάγκης.

4.1.1 Καταλληλότητα Κατανομής

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας της κατανομής πραγματοποιήθηκε σύγκριση των κατανομών Weibull, Lognormal και Exponential μέσω probability plots. Η γραμμικότητα των μετασχηματισμένων δεδομένων αξιολογήθηκε με χρήση γραμμικής παλινδρόμησης. Η κατανομή Weibull παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού ($R^2=0,799$), ακολουθούμενη από την Lognormal ($R^2=0,726$) και την Exponential ($R^2=0,595$). Συνεπώς κρίθηκε ως η καταλληλότερη κατανομή για την περιγραφή των δεδομένων αστοχιών των αντλιών υδραυλικού συστήματος.

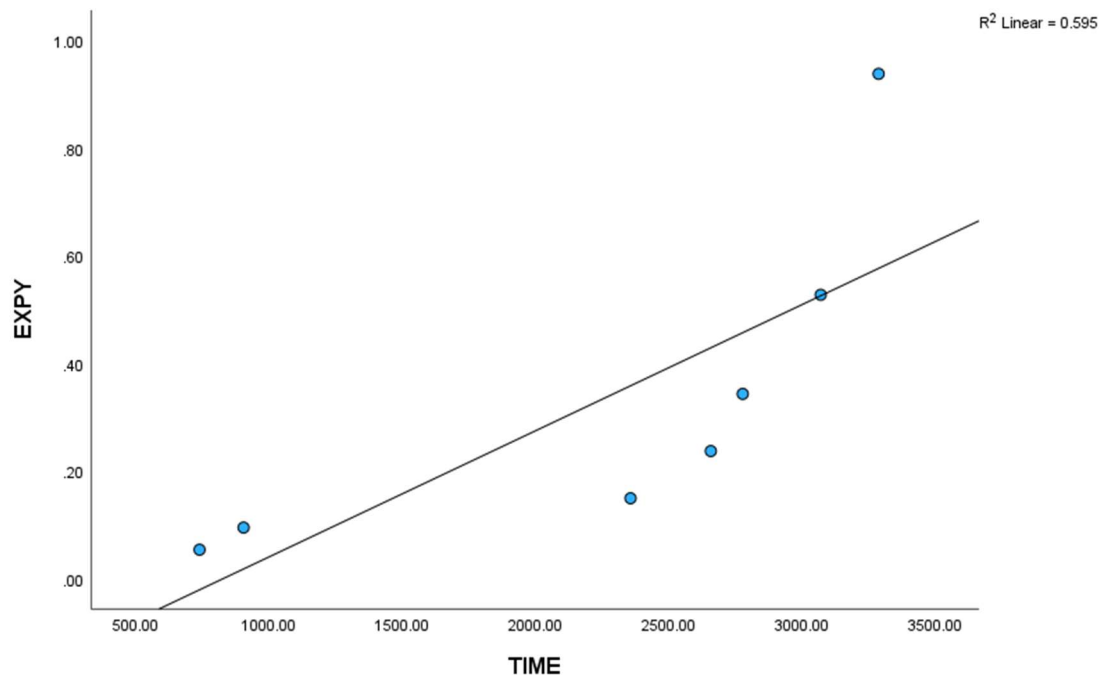
Συγκεκριμένα, για τη σύγκριση της εκάστοτε προσαρμογής έγινε χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS, με την εισαγωγή δεδομένων των αστοχιών και υπολογισμό παραμέτρων της κάθε κατανομής. Για τον υπολογισμό των συντελεστών προσδιορισμού επιλέγουμε Analyze – Regression – Linear, και εισάγουμε τις αντίστοιχες εξαρτημένες (dependent) και ανεξάρτητες (independent) μεταβλητές, ως κάτωθι:

- Weibull: Ως εξαρτημένη μεταβλητή εισάγουμε τη στήλη $Y=LN(-(LN(1-F(T))))$ με τα αντίστοιχα $F(T)$ που υπολογίσαμε παραπάνω για την κάθε αστοχία, ενώ ως ανεξάρτητη μεταβλητή τη στήλη $X=LN(T)$, όπου T οι χρόνοι που συνέβησαν οι αστοχίες. Για τη δημιουργία του Probability Plot επιλέγουμε Graphs – Simple – Linear, και παίρνουμε το κάτωθι διάγραμμα:



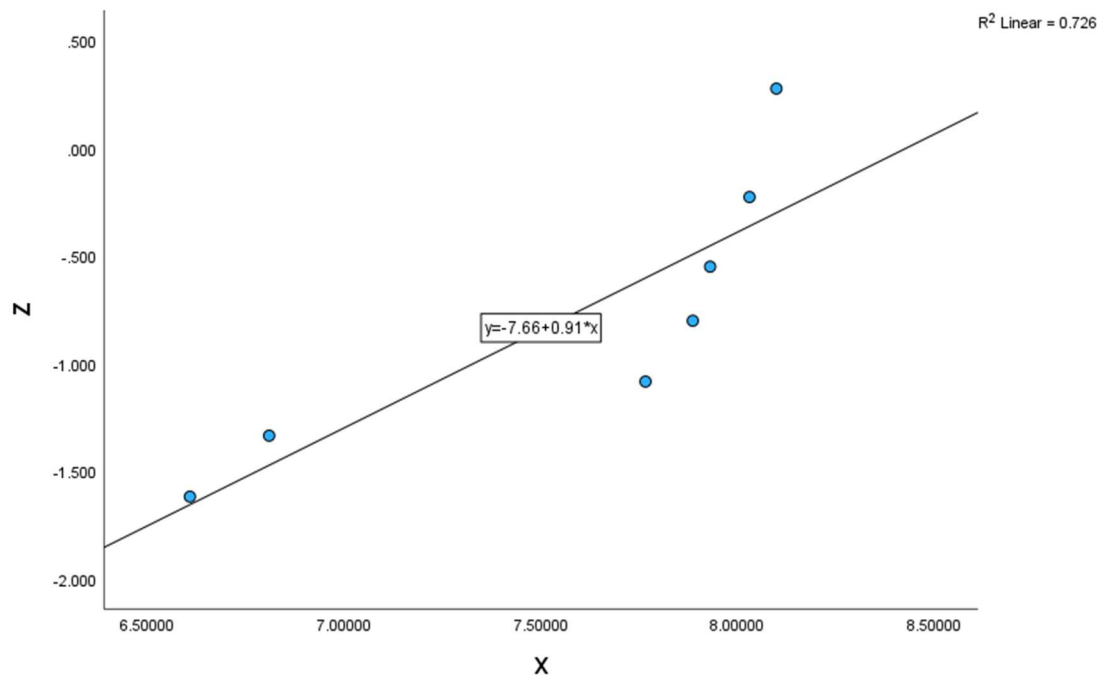
Διάγραμμα 2: Weibull Probability Plot

- Εκθετική (Exponential): Για τον υπολογισμό της εξαρτημένης μεταβλητής υπολογίζουμε το EXP_Y όπου $Y = -\ln(1-F)$, με την επιλογή τους SPSS “Compute Variable”, και με F τις υπολογισμένες, ως παραπάνω, τιμές. Ως ανεξάρτητη μεταβλητή χρησιμοποιούμε τη στήλη T με τους χρόνους των αστοχιών. Το διάγραμμα Probability Plot που προκύπτει είναι το κάτωθι:



Διάγραμμα 3: Exponential Probability Plot

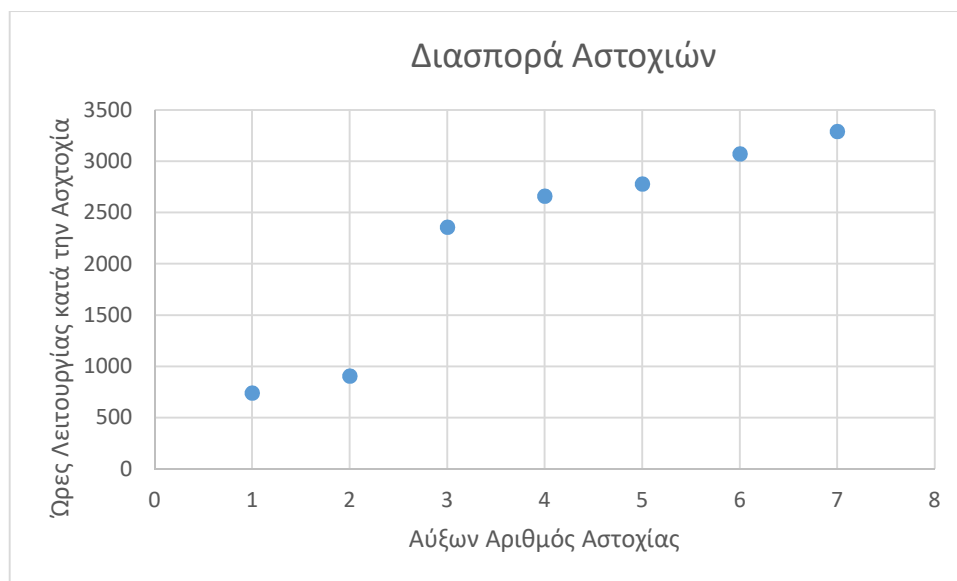
- Λογαριθμική (Lognormal): Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας της κατανομής Lognormal χρησιμοποιήθηκε διάγραμμα πιθανότητας (Lognormal Probability Plot). Η κατανομή Lognormal χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι ο φυσικός λογάριθμος του χρόνου αστοχίας ακολουθεί κανονική κατανομή. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές της αθροιστικής πιθανότητας αστοχίας $F(T)$, οι οποίες είχαν ήδη υπολογιστεί μέσω της μεθόδου της διορθωμένης διάμεσης βαθμίδας, μετατράπηκαν σε αντίστοιχες τιμές της τυπικής κανονικής κατανομής. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτημένη μεταβλητή Z , ενώ ως αντίστοιχη ανεξάρτητη η $X=LN(T)$, όπου T οι χρόνοι που συνέβησαν οι αστοχίες. Με τα ανωτέρω προκύπτει το κάτωθι Probability Plot:



Διάγραμμα 4: Lognormal Probability Plot

4.1.2 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Αν παρουσιάσουμε τις ώρες λειτουργίας του συστήματος όταν προέκυψαν οι αστοχίες, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 με την καταγραφή F, με τους αύξοντες αριθμούς τους σε ένα διάγραμμα διασποράς, προκύπτει το παρακάτω:



Διάγραμμα 5: Διασπορά Αστοχιών Αντλιών Υδραυλικού

Ερμηνεύοντας τη διασπορά των αστοχιών του Διαγράμματος 2 παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των αστοχιών παρουσιάστηκαν σε ώρες μεγαλύτερες από τις 2200 ώρες λειτουργίας, στις οποίες λαμβάνει χώρα η Γενική Επισκευή (ΓΕ) των αντλιών από την κατασκευάστρια εταιρεία. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου στους συγκεκριμένες αντλίες η ΓΕ εκτελέστηκε σε λιγότερες ώρες για λόγους καλύτερου προγραμματισμού. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα στοιχεία:

S/N	ΩΡΕΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΓΕ	ΩΡΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	ΔΙΑΦΟΡΑ
Y00062	2190,5	2358,66	168,16
H0038	1961,19	3072,66	1111,47
Y00009	2197,11	2660,04	462,93
Y00021	2189,15	2779,89	590,74
H0186	2188,26	3290,05	1101,79
Y00147	ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΕΚΤΕΛΕΣΤΕΙ	905,87	-
Y00216	ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΕΚΤΕΛΕΣΤΕΙ	740,57	-

Πίνακας 9: Ώρες Γενικής Επισκευής και Αστοχιών Αντλιών Υδραυλικού

Παρατηρούμε λοιπόν ότι 5 από τις 7 αστοχίες εμφανίστηκαν κατόπιν εκτέλεσης της πρώτης Γενικής Επισκευής (ΓΕ) των αντλιών υδραυλικού από την κατασκευάστρια

εταιρεία, και μόλις 2 αστοχίες προτού την εκτέλεση αυτής και σε λίγες ώρες λειτουργίας. Οι 2 αυτές περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν ως ελαττωματικά ή κατασκευαστικά σφάλματα, ενώ για τις υπόλοιπες θα πρέπει τα στοιχεία να προωθηθούν στην κατασκευάστρια εταιρεία για να εξετάσει τον επαναπροσδιορισμό των εργασιών που εκτελούνται κατά τη Γενική Επισκευή των υλικών. Συγκεκριμένα, προτείνονται τα κάτωθι:

- Αποστολή της μελέτης στην κατασκευάστρια εταιρεία και πρόταση για εκτενέστερο έλεγχο μη καταστροφικών ελέγχων στο σώμα της αντλίας κατά τη διάρκεια Γενικής Επισκευής στις 2200 ώρες λειτουργίας. Επιπρόσθετα, να εξεταστεί η αναγκαιότητα για αντικατάσταση εξαρτημάτων και αναλώσιμων της αντλίας τα οποία ενδεχομένως φθείρονται και δεν προβλέπεται η αντικατάστασή τους στην ΓΕ.
- Αν το κόστος των μη καταστροφικών ελέγχων κριθεί ασύμφορο, τότε υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσής τους σε επίπεδο μονάδας, άνευ κόστους για την Πολεμική Αεροπορία. Συγκεκριμένα, η Μονάδα διαθέτει συνεργείο Non Destructive Inspections (NDI) στο οποίο μπορούν να εκτελεστούν οι εν λόγω έλεγχοι πριν την αποστολή των αντλιών για Γενική Επισκευή, είτε με τη μέθοδο των διεισδυτικών υγρών είτε με τη μέθοδο X-Rays. Τα δεδομένα και τα ευρήματα από τους εν λόγω ελέγχους θα καταγραφούν στο μητρώο του εξαρτήματος προς ενημέρωση της κατασκευάστριας εταιρείας.
- Αποστολή ερωτήματος προς την κατασκευάστρια εταιρεία ώστε να μας διαθέσει τα ευρήματα από την εκτέλεση Γενικών Επισκευών των αντλιών, με σκοπό την ενσωμάτωσή τους στην παρούσα μελέτη ή εκπόνηση ξεχωριστής μελέτης αν αυτό απαιτηθεί.
- Οπτικός Έλεγχος της αντλίας υδραυλικού στην εξαμηνιαία περιοδική επιθεώρηση σε επίπεδο μονάδας και αντικατάσταση των ελαστικών παρεμβασμάτων στεγανοποίησης, τα οποία συνδέουν την αντλία με τις σωληνώσεις διανομής υδραυλικού υγρού, σε ετήσια βάση.
- Εκπόνηση εκ νέου μελέτης σε περίπτωση νέας αστοχίας και επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων.

4.1.3 Κόστος Αλλαγής Πολιτικής Συντήρησης

Για την εκτίμηση του κόστους εφαρμογής της προτεινόμενης ενέργειας συντήρησης δεν λαμβάνεται υπόψη πρόσθετο κόστος γενικής επισκευής, καθώς το υφιστάμενο όριο των 2200 ωρών λειτουργίας παραμένει αμετάβλητο. Η προτεινόμενη αλλαγή αφορά την εισαγωγή περιοδικών μη καταστροφικών ελέγχων (NDI) ανά 1000 ώρες λειτουργίας σε όλες τις υδραυλικές αντλίες, σε επίπεδο Αεροπορίας.

Το κόστος εφαρμογής της πρότασης περιορίζεται κυρίως στις απαιτούμενες εργατοώρες του τεχνικού προσωπικού και στα αναλώσιμα υλικά που απαιτούνται για την εκτέλεση του ελέγχου. Συνεπώς, το κόστος ανά έλεγχο μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$\text{Κόστος NDI} = (\text{Εργατοώρες} \times \text{Κόστος εργατοώρας}) + \text{Κόστος αναλώσιμων}$$

Δεδομένου ότι οι μη καταστροφικοί έλεγχοι αποτελούν προληπτική ενέργεια χαμηλού κόστους σε σχέση με το κόστος αποκατάστασης αστοχιών, η εφαρμογή τους κρίνεται συμβατή με την αρχή ALARP, σύμφωνα με την οποία η μείωση της επικινδυνότητας πρέπει να επιτυγχάνεται χωρίς το κόστος των μέτρων ελέγχου να είναι δυσανάλογο προς το αναμενόμενο όφελος.

Με βάση τα στοιχεία της παρούσας ανάλυσης, το συνολικό κόστος αποκατάστασης των επτά καταγεγραμμένων αστοχιών των υδραυλικών αντλιών ανέρχεται σε 24.672,9 €. Επομένως, ακόμη και αν η εφαρμογή περιοδικών NDI επιφέρει πρόσθετο προγραμματισμένο κόστος συντήρησης, το κόστος αυτό θεωρείται περιορισμένο σε σχέση με το πιθανό όφελος από την έγκαιρη ανίχνευση ρωγμών, φθορών ή άλλων ενδείξεων που ενδέχεται να οδηγήσουν σε διαρροή και αστοχία της αντλίας.

Η προτεινόμενη ενέργεια δεν αποσκοπεί στην αντικατάσταση της υφιστάμενης γενικής επισκευής των 2200 ωρών, αλλά στη συμπληρωματική παρακολούθηση της κατάστασης των αντλιών μεταξύ δύο διαδοχικών γενικών επισκευών. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η μείωση της πιθανότητας απρογραμμάτιστων αστοχιών, η αύξηση της διαθεσιμότητας των αεροσκαφών και η ενίσχυση της ασφάλειας πτήσεων.

4.2 Μελέτη Διαρροών Αντλιών Καυσίμου A/Φ Rafale

Στη δεύτερη μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε σαν μηχανισμός αστοχίας οι βλάβες όπου παρατηρήθηκε διαρροή από τις αντλίες καυσίμου του A/Φ Rafale εκτός των ορίων που προβλέπονται από την οικεία τεχνική βιβλιογραφία. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν προέκυψαν από τη μελέτη και καταγραφή των στοιχείων από τα αντίστοιχα μητρώα του συνόλου των επηρεαζόμενων υλικών. Στον Πίνακα 10 καταχωρήθηκαν τα κάτωθι:

- Αύξων αριθμός (A/A) υλικού: Στην πρώτη στήλη σημειώνεται ο αύξων αριθμός των υλικών, όπου φαίνεται πως το σύνολο των αντλιών προς μελέτη ανέρχονται σε 57.
- Serial Number υλικού: Στη δεύτερη στήλη καταγράφηκε ο μοναδικός σειριακός αριθμός κάθε αντλίας καυσίμου.
- Ώρες Λειτουργίας και Περιγραφή: Στην τρίτη και τέταρτη στήλη, αντίστοιχα, σημειώνονται οι ώρες λειτουργίας του συστήματος (Χρόνος) έως την αστοχία (x_i), όπου συμπληρώνεται στην περιγραφή ως F, ή έως τις παρούσες ώρες όπου έχει λειτουργήσει χωρίς αστοχία (T_j), οπότε και αναγράφεται ως S.

Στον Πίνακα 10 απεικονίζεται η καταγραφή τόσο των αστοχιών όσο και των υλικών που λειτούργησαν άνευ αστοχίας:

A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1	K259	1789,5	F
2	K849	1800,2	F
3	K789	1546,9	F
4	G456	899,5	F
5	G158	1203,5	F
6	G699	1786,4	F
7	K587	1636,5	F
8	G166	2001,4	F
9	K477	1331	S

Πίνακας 10: Καταγραφή Δεδομένων Αντλιών Καυσίμου

A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
10	G226	2159,8	S
11	G332	1058,7	S
12	G698	1276,5	S
13	G744	585,9	S
14	K562	585,8	S
15	K101	252,8	S
16	K002	2104,2	S
17	G302	2288,8	S
18	K905	2897,5	S
19	K180	107,8	S
20	G186	1734,2	S
21	G188	1911,8	S
22	K921	771,6	S
23	G235	670,9	S
24	G623	676,1	S
25	K008	1081,5	S
26	K089	1930	S
27	K069	1547,2	S
28	G048	1036,7	S
29	G488	1568,4	S
30	K257	434,8	S
31	K009	801,1	S
32	G778	979,3	S
33	G996	1194,6	S
34	K569	1984,4	S
35	G254	579,2	S
36	G544	1334,2	S
37	K897	1521,8	S
38	G200	211,5	S
39	G810	1558,1	S

Πίνακας 10 (συνέχεια)

A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
40	K366	509,3	S
41	G231	256,1	S
42	K333	2377,3	S
43	G878	2417,5	S
44	K233	2040,2	S
45	G177	831,1	S
46	K007	334,4	S
47	G369	1742,2	S
48	G778	1156,4	S
49	K336	392,9	S
50	G112	1288,4	S
51	G336	182,5	S
52	G522	2282,4	S
53	K885	721,1	S
54	G012	1690,1	S
55	K056	848,1	S
56	G775	1348,2	S
57	G211	1412,1	S

Πίνακας 10 (συνέχεια)

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων β και η της κατανομής Weibull, με τη χρήση ελαχίστων τετραγώνων. Λόγω του ότι έχουμε μεγάλο πλήθος δεδομένων τα οποία λειτούργησαν χωρίς αστοχία, θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο Bernard αλλά με διορθωμένη κατάταξη της διάμεσης βαθμίδας. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ο Πίνακας 11, με τις διορθωμένες κατατάξεις των αστοχιών ως εξής:

A/A	S/N	ΧΡΟΝΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ	F(T)
1	K180	107,8	S	57		
2	G336	182,5	S	56		
3	G200	211,5	S	55		
4	K101	252,8	S	54		
5	G231	256,1	S	53		
6	K007	334,4	S	52		
7	K336	392,9	S	51		
8	K257	434,8	S	50		
9	K366	509,3	S	49		
10	G254	579,2	S	48		
11	K562	585,8	S	47		
12	G744	585,9	S	46		
13	G235	670,9	S	45		
14	G623	676,1	S	44		
15	K885	721,1	S	43		
16	K921	771,6	S	42		
17	K009	801,1	S	41		
18	G177	831,1	S	40		
19	K056	848,1	S	39		
20	G456	899,5	F	38	1,487179487	0,020683
21	G778	979,3	S	37		
22	G048	1036,7	S	36		
23	G332	1058,7	S	35		
24	K008	1081,5	S	34		
25	G778	1156,4	S	33		
26	G996	1194,6	S	32		
27	G158	1203,5	F	31	2,858974359	0,044581
28	G698	1276,5	S	30		

Πίνακας 11: Διορθωμένη Κατάταξη Αστοχιών Υπολογισμός Διάμεσης Βαθμίδας

29	G112	1288,4	S	29		
30	K477	1331	S	28		
31	G544	1334,2	S	27		
32	G775	1348,2	S	26		
33	G211	1412,1	S	25		
34	K897	1521,8	S	24		
35	K789	1546,9	F	23	5,198179583	0,085334
36	K069	1547,2	S	22		
37	G810	1558,1	S	21		
38	G488	1568,4	S	20		
39	K587	1636,5	F	19	7,838270604	0,131329
40	G012	1690,1	S	18		
41	G186	1734,2	S	17		
42	G369	1742,2	S	16		
43	G699	1786,4	F	15	10,97337869	0,185947
44	K259	1789,5	F	14	14,10848678	0,240566
45	K849	1800,2	F	13	17,24359487	0,295185
46	G188	1911,8	S	12		
47	K089	1930	S	11		
48	K569	1984,4	S	10		
49	G166	2001,4	F	9	21,31923538	0,366189
50	K233	2040,2	S	8		
51	K002	2104,2	S	7		
52	G226	2159,8	S	6		
53	G522	2282,4	S	5		
54	G302	2288,8	S	4		
55	K333	2377,3	S	3		
56	G878	2417,5	S	2		
57	K905	2897,5	S	1		

Πίνακας 11 (συνέχεια)

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων βρίσκουμε τις συντεταγμένες των σημείων των αστοχιών ως κάτωθι, με τα $F(T)$ που υπολογίσαμε παραπάνω, συμφώνως (3.11), χρησιμοποιώντας ως i τη διορθωμένη κατάταξη των αστοχιών:

$X = \ln(T)$	$Y = \ln[-(\ln(1 - \ln(T)))]$
6,801839	-3,868032463
7,092989	-3,087721553
7,344008	-2,416913929
7,400315	-1,960482019
7,487958	-1,581189426
7,489692	-1,290323226
7,495653	-1,050338471
7,601602	-0,78525345

Πίνακας 12: Υπολογισμός Συντεταγμένων Σημείων Αστοχιών

Αντιμεταθέτοντας τις συντεταγμένες προκύπτει ο Πίνακας 13:

X'	Y'
-3,86803	6,801839053
-3,08772	7,092989257
-2,41691	7,344008207
-1,96048	7,400315094
-1,58119	7,487957701
-1,29032	7,48969153
-1,05034	7,495653049
-0,78525	7,601602215

Πίνακας 13: Αντιμετάθεση Συντεταγμένων για τα Δεδομένα Αστοχιών

Η παράμετρος A' της ευθείας $Y' = A'(X') + B'$ υπολογίζεται σε υπολογιστικό φύλλο του Microsoft Excel με χρήση της συνάρτησης “SLOPE” (Τιμές Y' ; Τιμές X') και η

παράμετρος B με τη χρήση της αντίστοιχης συνάρτησης “*INTERCEPT*” (Τιμές Y' ; Τιμές X') από όπου προκύπτει ότι: $A'=0,241444$ και $B'=7,82336$. Κάνοντας χρήση των (3.9) και (3.10) προκύπτει η τιμή των παραμέτρων της κατανομής Weibull:

$$\beta=4,141752 \text{ και } \eta=2498,284052$$

Η ανάλυση των δεδομένων με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων και εφαρμογή διορθωμένης διάμεσης βαθμίδας κατά τη μέθοδο Bernard οδήγησε σε εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull ως εξής: $\beta=4,141752$ και $\eta=2498,28$ ώρες. Η τιμή $\beta>1$, και συγκεκριμένα σημαντικά μεγαλύτερη της μονάδας υποδηλώνει έντονη φθορά με το χρόνο, γεγονός που είναι ενδεικτικό ενός μηχανισμού αστοχίας που σχετίζεται με γήρανση, κόπωση ή καταπόνηση λόγω χρήσης. Πρόκειται για μια χαρακτηριστική περίπτωση “wear-out” φάσης στον κύκλο ζωής εξαρτημάτων, όπου η πιθανότητα αστοχίας αυξάνεται ραγδαία όσο περνά ο χρόνος λειτουργίας. Η παράμετρος $\eta=2498$ εκφράζει τη χαρακτηριστική διάρκεια ζωής, δηλαδή το χρονικό σημείο όπου αναμένεται ότι περίπου το 63,2% των εξαρτημάτων θα έχουν αστοχήσει. Η συγκεκριμένη τιμή μπορεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς για τον καθορισμό κύκλων συντήρησης και για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε επίπεδο logistics και υποστήριξης υλικού.

Για την εκτίμηση της πιθανότητας σύμφωνα με τον πίνακα κατανομής της πιθανότητας θα πρέπει να αναχθούν τα αποτελέσματα στην 5ετία, σύμφωνα με τις ώρες εκμετάλλευσης των συστημάτων που εξετάζουμε. Υπολογίζεται ότι το A/Φ με τα συστήματά του, σε βάθος 5ετίας θα λειτουργήσει κατά μέσο όρο 970 ώρες, το οποίο θέτουμε ως χρόνο u . Ως χρόνο t θέτουμε το χρόνο που έχει λειτουργήσει το εκάστοτε σύστημα έως και την παρούσα χρονική στιγμή χωρίς να αστοχήσει. Η μεθοδολογία Weibull για την πρόβλεψη των μελλοντικών αστοχιών δίνεται από την (3.11) ανωτέρω. Στον Πίνακα 14 παρουσιάζεται ο υπολογισμός για την πρόβλεψη των μελλοντικών αστοχιών για τις 48 αντλίες καυσίμου που βρίσκονται τοποθετημένες αυτή τη στιγμή στα 24 A/Φ Rafale. Σημειώνεται ότι οι αντλίες που τηρούνται ως απόθεμα καθώς και αντλίες που βρίσκονται υπό επισκευή δεν συνεισφέρουν στην πρόβλεψη αυτή. Συναφώς, σε περίπτωση αντικατάστασης υλικού θα πρέπει το νέο υλικό να αντικαθιστά το παλιό και ο υπολογισμός να γίνεται εκ νέου.

A/A	SN	t	$\frac{F(t+u) - F(t)}{1 - F(t)}$
1	G226	2159,8	0,864120089
2	G332	1058,7	0,325386112
3	G698	1276,5	0,4412645
4	G744	585,9	0,129083162
5	K562	585,8	0,129052068
6	K101	252,8	0,050470606
7	K002	2104,2	0,845883422
8	G302	2288,8	0,900784516
9	K905	2897,5	0,985911981
10	K180	107,8	0,030278925
11	G186	1734,2	0,688938449
12	G188	1911,8	0,771566267
13	K921	771,6	0,194822566
14	G235	670,9	0,157198961
15	G623	676,1	0,159028043
16	K008	1081,5	0,337000606
17	K089	1930	0,779316042
18	K069	1547,2	0,5911031
19	G048	1036,7	0,314325461
20	G488	1568,4	0,602591574
21	K257	434,8	0,087369395
22	K009	801,1	0,206708046
23	G778	979,3	0,28619905
24	G996	1194,6	0,396578529
25	K569	1984,4	0,801606713
26	G254	579,2	0,12701017
27	G544	1334,2	0,4732109
28	K897	1521,8	0,577243513
29	G200	211,5	0,043953674
30	G810	1558,1	0,597019582

Πίνακας 14: Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών Αντλιών Καυσίμου

A/A	SN	t	$\frac{F(t+u) - F(t)}{1 - F(t)}$
31	K366	509,3	0,106626668
32	G231	256,1	0,05101927
33	K333	2377,3	0,921520784
34	G878	2417,5	0,929815716
35	K233	2040,2	0,823068249
36	G177	831,1	0,21918364
37	K007	334,4	0,065303643
38	G369	1742,2	0,692908782
39	G778	1156,4	0,376128647
40	K336	392,9	0,077630322
41	G112	1288,4	0,447829923
42	G336	182,5	0,039753779
43	G522	2282,4	0,899148518
44	K885	721,1	0,175377241
45	G012	1690,1	0,66668999
46	K056	848,1	0,226423628
47	G775	1348,2	0,480994979
48	G211	1412,1	0,516573725

Πίνακας 14 (συνέχεια)

Αθροίζοντας τις επιμέρους αστοχίες για κάθε μία από τις 48 αντλίες των 24 Α/Φ, προκύπτει αναμενόμενος αριθμός αστοχιών, για την επόμενη πενταετία, περίπου ίσος με 20,611 συνεπώς με βάση τον Πίνακα 1 για την ταξινόμηση της πιθανότητας αυτή κατηγοριοποιείται ως Υψηλή, εφόσον είναι τιμή μεγαλύτερη του 4 για την επόμενη 5ετία.

Με βάση τα τηρούμενα στοιχεία για επισκευές και αντικαταστάσεις των επηρεαζόμενων υλικών, και με γνώμονα το ότι δεν έχει προκύψει ποτέ τραυματισμός προσωπικού, η δριμύτητα κατηγοριοποιείται ως Μέτρια, συμφώνως του Πίνακα 2. Συγκεκριμένα, το μέσος κόστος επισκευής των αντλιών που αστόχησαν προκύπτει ίσο με 2788,9 ευρώ και επομένως το συνολικό κόστος ανέρχεται σε 2788,9 x 7 (αριθμός

αστοχιών) = 22311,2, το οποίο είναι μεγαλύτερο των 20 χιλιάδων ευρώ αλλά μικρότερο των 500 χιλιάδων. Συνεπώς, η επικινδυνότητα προκύπτει Κατηγορίας «B» (Πίνακας 3), ήτοι Μεγάλη. Το επίπεδο αυτό της επικινδυνότητας κρίνεται μη αποδεκτό, και πρέπει να εφαρμοστούν άμεσα μέτρα ελέγχου χωρίς να διακοπεί η λειτουργία των αντλιών και κατ' επέκταση η δραστηριότητα των Α/Φ. Επομένως, επιβάλλεται για τη μείωση ή αποφυγή παρόμοιων περιστατικών στο μέλλον, να αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης για τις αντλίες καυσίμου των Α/Φ Rafale. Σημειώνεται πως τα οφέλη θα είναι η ανίχνευση του μηχανισμού αστοχίας πριν αυτή συμβεί, το οποίο θα έχει και επιχειρησιακό όφελος καθώς θα προλαμβάνονται ματαιώσεις πτήσεων την τελευταία στιγμή και ενώ το Α/Φ έχει εκκινήσει για την εκτέλεση της αποστολής του ή η επιστροφή του Α/Φ από πτήση με διαδικασίες έκτακτης ανάγκης.

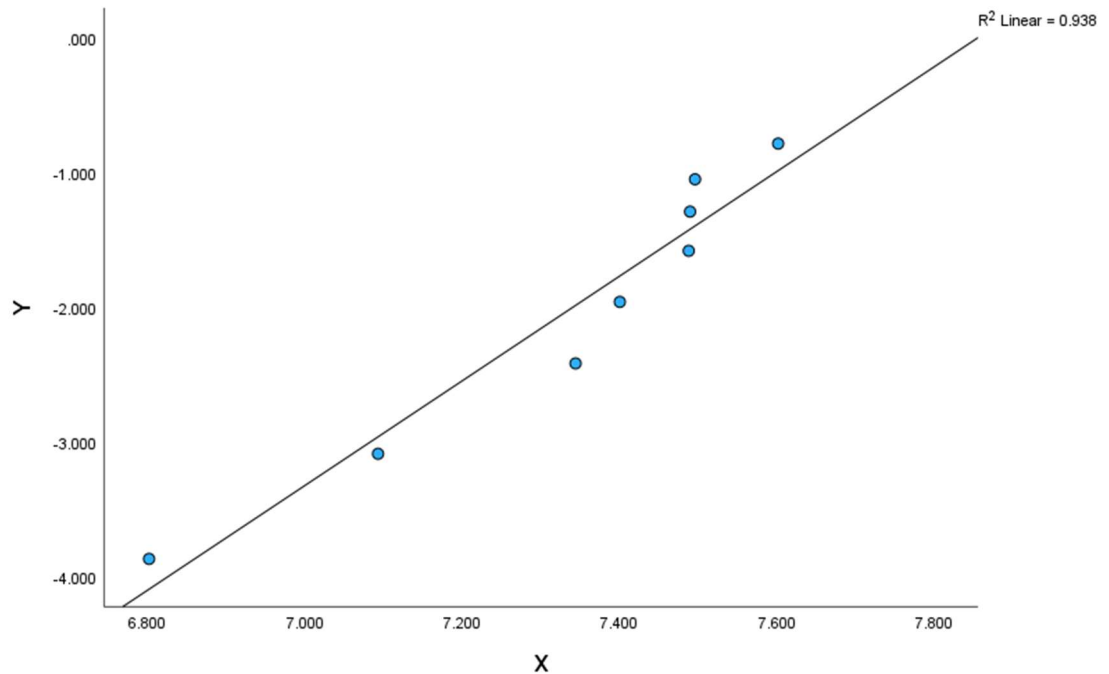
4.2.1 Καταλληλότητα Κατανομής

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας της κατανομής πραγματοποιήθηκε σύγκριση των κατανομών Weibull, Lognormal και Exponential μέσω probability plots. Η γραμμικότητα των μετασχηματισμένων δεδομένων αξιολογήθηκε με χρήση γραμμικής παλινδρόμησης. Η κατανομή Weibull παρουσίασε τον υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού ($R^2=0,938$), ακολουθούμενη από την Lognormal ($R^2=0,893$) και την Exponential ($R^2=0,750$). Συνεπώς κρίθηκε ως η καταλληλότερη κατανομή για την περιγραφή των δεδομένων αστοχιών των αντλιών υδραυλικού συστήματος.

Συγκεκριμένα, για τη σύγκριση της εκάστοτε προσαρμογής έγινε χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS, με την εισαγωγή δεδομένων των αστοχιών και υπολογισμό παραμέτρων της κάθε κατανομής. Για τον υπολογισμό των συντελεστών προσδιορισμού επιλέγουμε Analyze – Regression – Linear, και εισάγουμε τις αντίστοιχες εξαρτημένες (dependent) και ανεξάρτητες (independent) μεταβλητές, ως κάτωθι:

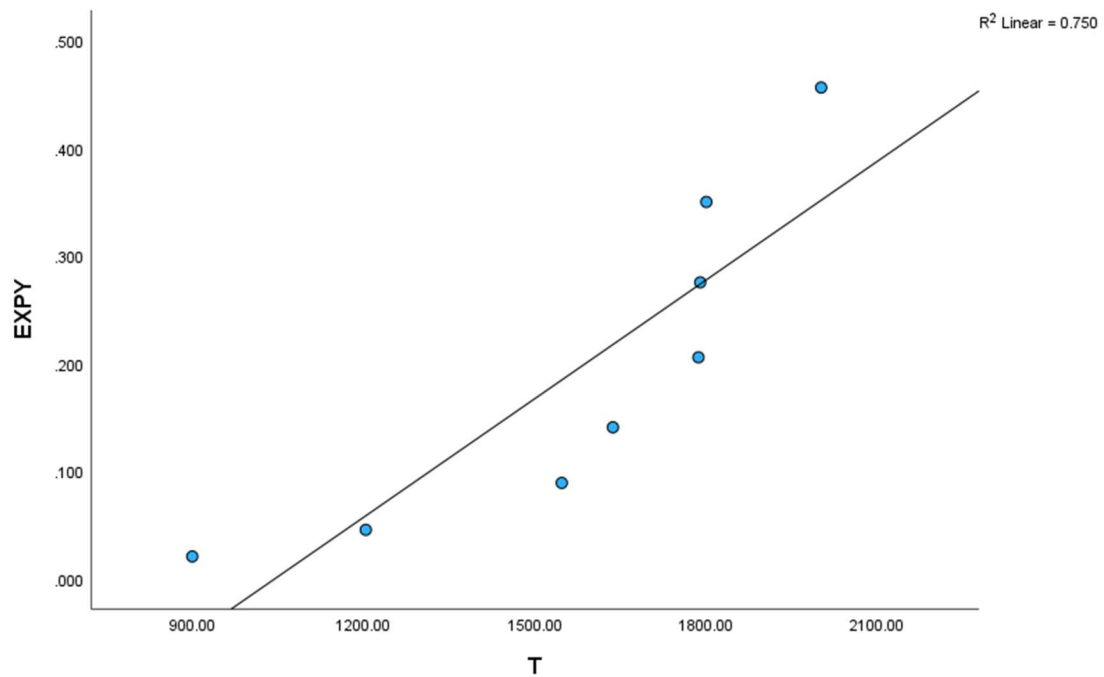
- Weibull: Ως εξαρτημένη μεταβλητή εισάγουμε τη στήλη $Y=LN(-(LN(1-F(T))))$ με τα αντίστοιχα $F(T)$ που υπολογίσαμε παραπάνω για την κάθε αστοχία, ενώ ως ανεξάρτητη μεταβλητή τη στήλη $X=LN(T)$, όπου T οι χρόνοι που

συνέβησαν οι αστοχίες. Για τη δημιουργία του Probability Plot επιλέγουμε Graphs – Simple – Linear, και παίρνουμε το κάτωθι διάγραμμα:



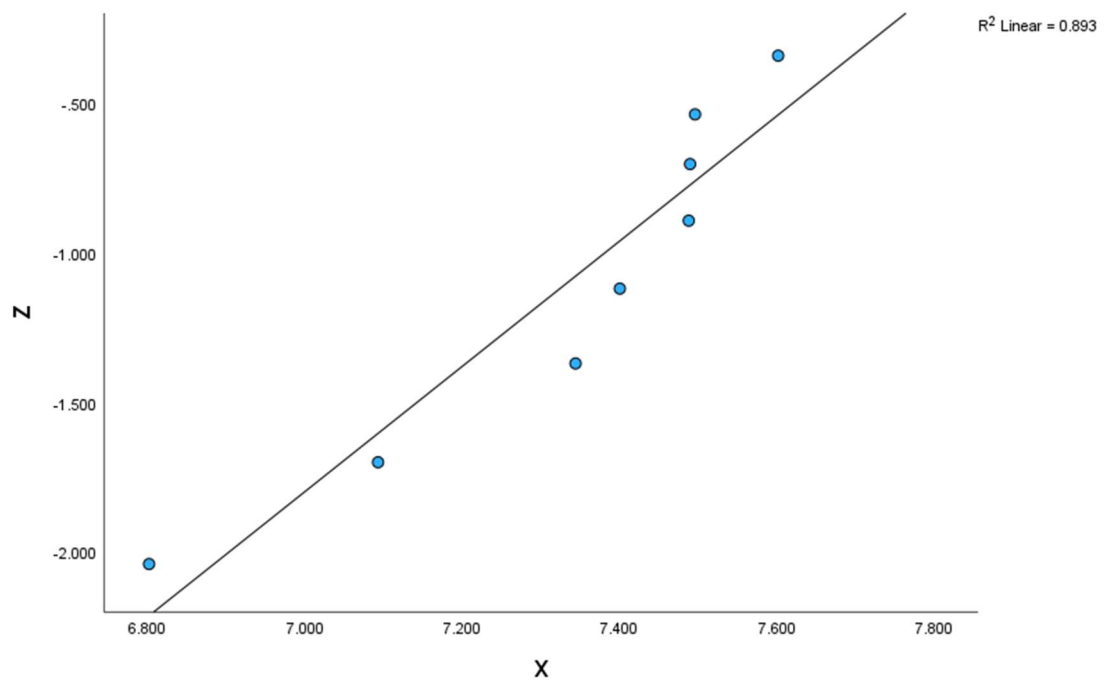
Διάγραμμα 6: Weibull Probability Plot

- Εκθετική (Exponential): Για τον υπολογισμό της εξαρτημένης μεταβλητής υπολογίζουμε το EXP_Y όπου $Y = -\ln(1-F)$, με την επιλογή τους SPSS “Compute Variable”, και με F τις υπολογισμένες, ως παραπάνω, τιμές. Ως ανεξάρτητη μεταβλητή χρησιμοποιούμε τη στήλη T με τους χρόνους των αστοχιών. Το διάγραμμα Probability Plot που προκύπτει είναι το κάτωθι:



Διάγραμμα 7: Exponential Probability Plot

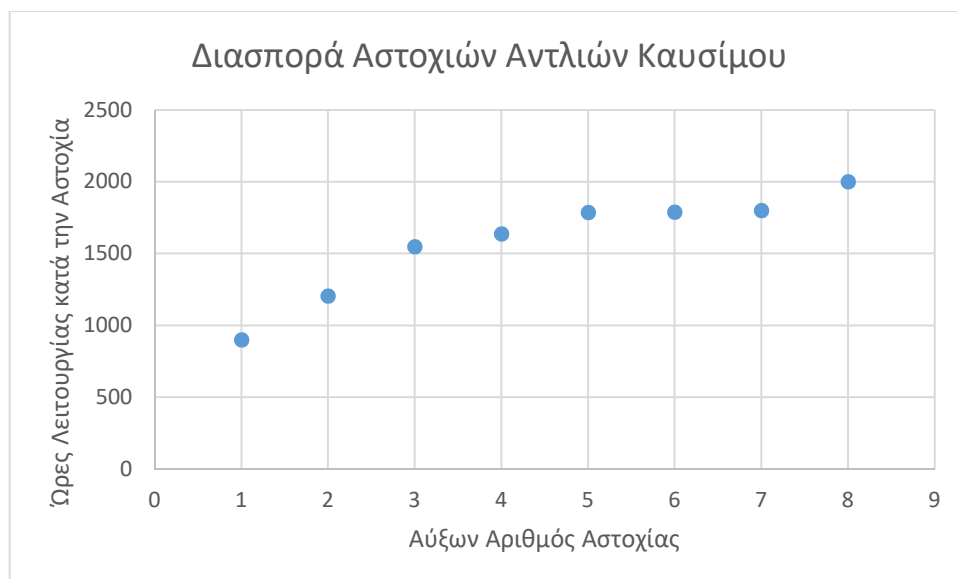
- Λογαριθμική (Lognormal): Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας της κατανομής Lognormal χρησιμοποιήθηκε διάγραμμα πιθανότητας (Lognormal Probability Plot). Η κατανομή Lognormal χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι ο φυσικός λογάριθμος του χρόνου αστοχίας ακολουθεί κανονική κατανομή. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές της αθροιστικής πιθανότητας αστοχίας $F(T)$, οι οποίες είχαν ήδη υπολογιστεί μέσω της μεθόδου της διορθωμένης διάμεσης βαθμίδας, μετατράπηκαν σε αντίστοιχες τιμές της τυπικής κανονικής κατανομής. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτημένη μεταβλητή Z , ενώ ως αντίστοιχη ανεξάρτητη η $X=LN(T)$, όπου T οι χρόνοι που συνέβησαν οι αστοχίες. Με τα ανωτέρω προκύπτει το κάτωθι Probability Plot:



Διάγραμμα 8: Lognormal Probability Plot

4.2.2 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Αν παρουσιάσουμε τις ώρες λειτουργίας του συστήματος όταν προέκυψαν οι αστοχίες με τους αύξοντες αριθμούς τους σε ένα διάγραμμα διασποράς, προκύπτει το παρακάτω:



Διάγραμμα 9: Διασπορά Αστοχιών Αντλιών Καυσίμου

Ερμηνεύοντας τη διασπορά των αστοχιών παρατηρούμε ότι το σύνολο των αστοχιών παρουσιάστηκαν σε ώρες μικρότερες από τις 2001,4 ώρες λειτουργίας, οι οποίες είναι λίγες συγκριτικά με το γεγονός πως η γενική επισκευή τους στην κατασκευάστρια εταιρεία λαμβάνει χώρα στις 2200 ώρες λειτουργίας. Σημειώνεται επίσης ότι η πλειοψηφία των αστοχιών έχει συμβεί πριν την εκτέλεση της πρώτης Γενικής Επισκευής σε αυτές, όπου οι ώρες θεωρητικά μηδενίζονται για το υλικό. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, προτείνονται τα κάτωθι:

- Αποστολή της μελέτης στην κατασκευάστρια εταιρεία και πρόταση για εξέταση εκτέλεσης της Γενικής Επισκευής σε ώρες μικρότερες από τις 2200, το οποίο είναι το υφιστάμενο καθεστώς, και συγκεκριμένα στις 1600 ώρες λειτουργίας. Η εκτέλεση Γενικής Επισκευής σε λιγότερες ώρες από τις υφιστάμενες θα αυξήσει το κόστος συντήρησης για την Πολεμική Αεροπορία μακροπρόθεσμα, καθώς μια αντλία στη διάρκεια της ζωής της θα υποστεί μεγαλύτερο πλήθος αυτών.
- Αποστολή ερωτήματος προς την κατασκευάστρια εταιρεία ώστε να μας διαθέσει τα ευρήματα από την εκτέλεση Γενικών Επισκευών των αντλιών, με σκοπό την ενσωμάτωσή τους στην παρούσα μελέτη ή εκπόνηση ξεχωριστής μελέτης αν αυτό απαιτηθεί.

- Εξέταση δυνατότητας μη καταστροφικών ελέγχων σε επίπεδο Μονάδας σε ετήσια βάση, για ανίχνευση ρωγμών ή άλλων ευρημάτων που δυνητικά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστοχία, εν προκειμένω διαρροή. Στην περίπτωση αυτή, το όριο για την εκτέλεση Γενικής Επισκευής θα μπορούσε να παραμείνει ως έχει, χωρίς με αυτό τον τρόπο να προκύψει επιπρόσθετο κόστος συντήρησης λόγω περισσότερων επισκευών, πλην των δαπανούμενων εργατοωρών από το προσωπικό της Πολεμικής Αεροπορίας, καθώς μόνο οι αντλίες με ευρήματα θα αποσταλούν στην κατασκευάστρια εταιρεία για επισκευή.
- Εκπόνηση εκ νέου μελέτης σε περίπτωση νέας αστοχίας και επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση, προτείνεται η συνεχής εκτίμηση της επικινδυνότητας με ενημέρωση των ωρών λειτουργίας και των αστοχιών σε μηνιαία βάση, το οποίο ενδεχομένως να διαφοροποιήσει το σκοπό και τις προτάσεις για τη δημιουργία του νέου προγράμματος προληπτικής συντήρησης.

4.2.3 Κόστος Αλλαγής Πολιτικής Συντήρησης

Με βάση το υφιστάμενο όριο γενικής επισκευής των 2200 ωρών και το προτεινόμενο όριο των 1600 ωρών, η εφαρμογή της νέας πολιτικής συντήρησης αναμένεται να αυξήσει τον αριθμό των προγραμματισμένων γενικών επισκευών κατά τη διάρκεια ζωής των αντλιών μέχρι τις 6000 ώρες λειτουργίας. Δεδομένου ότι το κόστος γενικής επισκευής ανέρχεται σε 5.150 € ανά αντλία, η προτεινόμενη πολιτική συνεπάγεται αύξηση του προγραμματισμένου κόστους συντήρησης.

Λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των αντλιών που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη, το μέγιστο θεωρητικό πρόσθετο κόστος δύναται να ανέλθει σε περίπου 293.550 €, υπό την παραδοχή ότι κάθε αντλία θα υποβληθεί σε μία επιπλέον γενική επισκευή μέχρι τη συμπλήρωση των 6000 ωρών λειτουργίας. Ωστόσο, η εκτίμηση αυτή θεωρείται συντηρητική, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την υφιστάμενη κατάσταση κάθε αντλίας ούτε το γεγονός ότι μέρος του στόλου ενδέχεται να αποσυρθεί πριν από τη συμπλήρωση του ορίου ζωής.

Η αύξηση του προγραμματισμένου κόστους συντήρησης αναμένεται να αντισταθμιστεί από τη μείωση της πιθανότητας αστοχίας, τη βελτίωση της διαθεσιμότητας των αεροσκαφών και τη μείωση του κόστους αποκατάστασης απρογραμματίστων βλαβών.

4.3 Τεκμηρίωση Επιλογής Κατανομής Weibull

Η επιλογή της κατανομής Weibull στην παρούσα εργασία δεν βασίζεται αποκλειστικά στη γραμμική παλινδρόμηση των σημείων του probability plot, αλλά και στην καταλληλότητά της για την περιγραφή μηχανισμών αστοχίας μηχανολογικών εξαρτημάτων. Η κατανομή Weibull χρησιμοποιείται ευρέως σε αναλύσεις αξιοπιστίας, διότι μέσω της παραμέτρου σχήματος β μπορεί να περιγράψει διαφορετικές φάσεις ζωής ενός εξαρτήματος.

Συγκεκριμένα, όταν η παράμετρος β είναι μικρότερη της μονάδας, η κατανομή υποδηλώνει αυξημένη πιθανότητα πρώιμων αστοχιών. Όταν η β προσεγγίζει τη μονάδα, η συμπεριφορά του εξαρτήματος προσεγγίζει την εκθετική κατανομή, δηλαδή αστοχίες τυχαίου χαρακτήρα με περίπου σταθερό ρυθμό αστοχίας. Αντίθετα, όταν η β είναι μεγαλύτερη της μονάδας, η πιθανότητα αστοχίας αυξάνεται με τη χρήση, γεγονός που συνδέεται με φαινόμενα φθοράς, κόπωσης ή γήρανσης.

Η ιδιότητα αυτή καθιστά τη Weibull καταλληλότερη από την εκθετική κατανομή στην παρούσα περίπτωση, καθώς η εκθετική κατανομή προϋποθέτει σταθερό ρυθμό αστοχίας και δεν μπορεί να αποτυπώσει ικανοποιητικά φαινόμενα προοδευτικής φθοράς. Αντίστοιχα, η λογαριθμοκανονική κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες εφαρμογές αξιοπιστίας, όμως δεν παρέχει την ίδια άμεση φυσική ερμηνεία της παραμέτρου σχήματος σε σχέση με τους μηχανισμούς αστοχίας.

Επιπλέον, τα δεδομένα συντήρησης περιλαμβάνουν τόσο αστοχίες όσο και δεδομένα χωρίς αστοχία, δηλαδή λογοκριμένες παρατηρήσεις. Η ύπαρξη λογοκριμένων δεδομένων αποτελεί χαρακτηριστικό των πραγματικών δεδομένων αξιοπιστίας, καθώς δεν έχουν αστοχήσει όλα τα εξαρτήματα κατά τον χρόνο της παρατήρησης. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της καταλληλότητας της κατανομής δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο στο οπτικό αποτέλεσμα του probability plot ή στον συντελεστή προσδιορισμού R^2 , αλλά πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη φύση των δεδομένων και την τεχνική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο πλαίσιο αυτό, η γραμμική απεικόνιση Weibull χρησιμοποιείται ως αρχικό εργαλείο διερεύνησης της προσαρμογής, ενώ η σύγκριση με την εκθετική και τη λογαριθμοκανονική κατανομή λειτουργεί ως πρόσθετος έλεγχος τεκμηρίωσης. Η Weibull θεωρείται κατάλληλη για τη συνέχεια της ανάλυσης, διότι συνδυάζει στατιστική προσαρμογή, δυνατότητα αξιοποίησης λογοκριμένων δεδομένων και

φυσική ερμηνεία των παραμέτρων της σε σχέση με τους μηχανισμούς φθοράς των αντλιών. Επιπρόσθετα, η μέθοδος που ακολουθήθηκε προβλέπεται από το εγχειρίδιο ΕΠΑ Γ-3 της Πολεμικής Αεροπορίας, συνεπώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρακτικά και τεκμηριωμένα για την εισαγωγή νέας πολιτικής συντήρησης για τα συστήματα του Α/Φ.

4.4 Αξιολόγηση Προτεινόμενης Πολιτικής Συντήρησης

Αναφορικά και με τις δύο μελέτες και προτεινόμενες αλλαγές στην πολιτική συντήρησης, σημειώνεται ότι η αξιολόγηση μιας προτεινόμενης αλλαγής στην πολιτική συντήρησης δεν μπορεί να περιορίζεται αποκλειστικά στο άμεσο κόστος της επιθεώρησης ή της γενικής επισκευής. Στην περίπτωση αεροπορικών συστημάτων υψηλής επιχειρησιακής σημασίας, όπως οι υδραυλικές αντλίες και οι αντλίες καυσίμου μαχητικού αεροσκάφους, το πραγματικό κόστος μιας αστοχίας περιλαμβάνει τόσο άμεσες όσο και έμμεσες επιπτώσεις.

Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει το κόστος ανταλλακτικών, αναλωσίμων, εργατοωρών τεχνικού προσωπικού, διαδικασιών ελέγχου, μεταφοράς και γενικής επισκευής. Ειδικά στην περίπτωση της γενικής επισκευής, το κόστος δεν αφορά μόνο την ίδια την εργασία αποκατάστασης, αλλά και τις διοικητικές διαδικασίες που απαιτούνται για την αποστολή, παρακολούθηση, παραλαβή και επανένταξη του εξαρτήματος σε κατάσταση χρήσης.

Το έμμεσο κόστος συνδέεται κυρίως με την απώλεια διαθεσιμότητας του αεροσκάφους ή του εξοπλισμού. Μία απρογραμματίστη αστοχία μπορεί να οδηγήσει σε καθήλωση αεροσκάφους, ακύρωση ή αναπρογραμματισμό αποστολών, ανάγκη άμεσης διάθεσης εφεδρικού υλικού, πρόσθετη απασχόληση προσωπικού και αυξημένη πίεση στο σύστημα τεχνικής υποστήριξης. Συνεπώς, ακόμη και όταν το άμεσο κόστος αποκατάστασης μιας βλάβης φαίνεται περιορισμένο, το συνολικό επιχειρησιακό κόστος μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερο.

Η προτεινόμενη εφαρμογή προγραμματισμένων μη καταστροφικών ελέγχων (NDI) σε επίπεδο Μονάδας εντάσσεται στην κατηγορία του κόστους πρόληψης και αξιολόγησης. Το κόστος αυτό είναι εκ των προτέρων γνωστό, προγραμματίσιμο και ελεγχόμενο. Αντίθετα, το κόστος μιας απρογραμματίστης αστοχίας είναι αβέβαιο και δυνητικά υψηλότερο, καθώς επηρεάζεται από τη διαθεσιμότητα ανταλλακτικών, τον

χρόνο αποκατάστασης, την κρισιμότητα της αποστολής και την επιχειρησιακή κατάσταση της Μονάδας.

Η οικονομική λογική της προτεινόμενης πολιτικής στηρίζεται στην αρχή ότι ένα περιορισμένο και προγραμματισμένο κόστος ελέγχου μπορεί να μειώσει την πιθανότητα εμφάνισης αστοχίας και, κατά συνέπεια, να περιορίσει το συνολικό κόστος αστοχιών. Η προσέγγιση αυτή είναι συμβατή με τη θεωρία του κόστους ποιότητας, σύμφωνα με την οποία η αύξηση του κόστους πρόληψης και αξιολόγησης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους εσωτερικών και εξωτερικών αστοχιών.

Για την πληρέστερη αξιολόγηση της προτεινόμενης πολιτικής μπορούν να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες κατηγορίες κόστους:

- Κόστος προγραμματισμένου ελέγχου: εργατοώρες, χρήση εξοπλισμού NDI, αναλώσιμα και διοικητική υποστήριξη.
- Κόστος γενικής επισκευής: κόστος αποσυναρμολόγησης, αντικατάστασης εξαρτημάτων, δοκιμών, πιστοποίησης και επαναφοράς σε κατάσταση χρήσης.
- Κόστος απρογραμματίστης αστοχίας: αντικατάσταση εξαρτήματος, αποκατάσταση βλάβης, καθυστέρηση επιστροφής σε υπηρεσία και πιθανή επιβάρυνση άλλων διαθέσιμων μέσων.
- Κόστος ακινησίας: απώλεια διαθεσιμότητας αεροσκάφους ή μείωση της επιχειρησιακής ευελιξίας της Μονάδας.
- Κόστος αποθεμάτων: ανάγκη διατήρησης επαρκούς αριθμού εφεδρικών αντλιών, δεσμευμένο κεφάλαιο και κόστος αποθήκευσης.

Με βάση τα παραπάνω, η προτεινόμενη πολιτική δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο ως πρόσθετη δαπάνη συντήρησης, αλλά ως μέτρο μείωσης τεχνικού και επιχειρησιακού κινδύνου. Η εφαρμογή προληπτικών ελέγχων μπορεί να αυξήσει προσωρινά το κόστος πρόληψης, όμως δύναται να μειώσει τις απρογραμματίστες αστοχίες, να περιορίσει τον χρόνο ακινησίας και να βελτιώσει τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού. Επομένως, η τελική απόφαση πρέπει να βασίζεται στη σύγκριση μεταξύ του ελεγχόμενου κόστους πρόληψης και του αβέβαιου αλλά δυνητικά υψηλού κόστους αστοχίας. Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με συγκριτική ανάλυση της υφιστάμενης με την προτεινόμενη πολιτική συντήρησης και για τις δύο περιπτώσεις μελέτης που πραγματοποιήθηκαν.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
Τρόπος Συντήρησης	Γενική Επισκευή (Overhaul) στο καθορισμένο όριο από την τεχνική βιβλιογραφία	Γενική Επισκευή (Overhaul) στο καθορισμένο όριο ή σε πιο συντηρητικό και μη καταστροφικοί έλεγχοι (NDI) σε επίπεδο μονάδας
Εντοπισμός Αστοχίας	Κατά την εμφάνιση αυτής ή στη Γενική Επισκευή	Πριν την εκδήλωση αυτής ή στους ελέγχους NDI
Απρογραμμάτιστες Αστοχίες	Πιθανές	Αναμένεται μείωση
Διαθεσιμότητα Α/Φ	Επηρεάζεται από τις αστοχίες	Βελτιωμένη λόγω έγκαιρου εντοπισμού
Κόστος Πρόληψης	Χαμηλότερο	Αυξημένο
Κόστος Αστοχιών	Δυνητικά Υψηλό	Αναμένεται Μειωμένο
Επιχειρησιακός Κίνδυνος	Υψηλότερος	Μειωμένος

Πίνακας 15: Σύγκριση Πολιτικών Συντήρησης

Από επιχειρησιακής πλευράς, η εφαρμογή ενός συστήματος προληπτικής συντήρησης δεν αποσκοπεί αποκλειστικά στη μείωση του κόστους, αλλά κυρίως στη βελτίωση της διαθεσιμότητας του στόλου και στη μείωση της αβεβαιότητας που προκαλούν οι απρογραμμάτιστες αστοχίες. Η έγκαιρη ανίχνευση ενδείξεων υποβάθμισης επιτρέπει τον προγραμματισμό των απαιτούμενων ενεργειών συντήρησης σε χρονικές περιόδους που επηρεάζουν λιγότερο το πτητικό έργο της Μονάδας. Παράλληλα, διευκολύνεται ο προγραμματισμός προσωπικού, ανταλλακτικών και μέσων υποστήριξης, μειώνοντας τις έκτακτες απαιτήσεις και την ανάγκη διατήρησης αυξημένων αποθεμάτων. Επομένως, ακόμη και αν η εφαρμογή πρόσθετων επιθεωρήσεων συνεπάγεται αύξηση του κόστους πρόληψης, το συνολικό κόστος κύκλου ζωής του εξοπλισμού δύναται να

μειωθεί μέσω της αποφυγής απρογραμματίστων αστοχιών, της μείωσης του χρόνου ακινησίας και της αποτελεσματικότερης αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο την ανάπτυξη ενός πλαισίου πρόληπτικής συντήρησης για κρίσιμα εξαρτήματα του μαχητικού αεροσκάφους Rafale της Πολεμικής Αεροπορίας, αξιοποιώντας στατιστικές μεθόδους ανάλυσης αξιοπιστίας και τη μεθοδολογία του εγχειριδίου ΕΠΑ Γ-3. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στις υδραυλικές αντλίες και στις αντλίες καυσίμου, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα αστοχιών και δεδομένα χωρίς αστοχία, με σκοπό την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης μελλοντικών αστοχιών και την υποστήριξη τεκμηριωμένων αποφάσεων συντήρησης.

Η εφαρμογή της κατανομής Weibull επέτρεψε την εκτίμηση των παραμέτρων αξιοπιστίας των εξεταζόμενων εξαρτημάτων και την πρόβλεψη της εξέλιξης της πιθανότητας αστοχίας σε συνάρτηση με τις ώρες λειτουργίας. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με την εκθετική και τη λογαριθμοκανονική κατανομή, ώστε να αξιολογηθεί η καταλληλότητα των διαφορετικών στατιστικών μοντέλων. Η Weibull κρίθηκε ως η πλέον κατάλληλη προσέγγιση, καθώς, εκτός από την ικανοποιητική προσαρμογή στα διαθέσιμα δεδομένα, παρέχει φυσική ερμηνεία των μηχανισμών αστοχίας μέσω της παραμέτρου σχήματος β και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία της αξιοπιστίας και της αεροπορικής συντήρησης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων συντήρησης μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά την πρόβλεψη αστοχιών και να συμβάλει στον σχεδιασμό περισσότερο αποδοτικών πολιτικών συντήρησης. Η έγκαιρη αναγνώριση της αυξημένης πιθανότητας εμφάνισης αστοχιών επιτρέπει την πραγματοποίηση προγραμματισμένων ενεργειών συντήρησης πριν από την εκδήλωση λειτουργικών προβλημάτων, περιορίζοντας τις απρογραμμάτιστες βλάβες και αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα των αεροσκαφών.

Επιπλέον, η τεχνικοοικονομική αξιολόγηση έδειξε ότι, παρότι η εφαρμογή πρόσθετων επιθεωρήσεων ή μη καταστροφικών ελέγχων συνεπάγεται αύξηση του κόστους πρόληψης, το κόστος αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί από τη μείωση των απρογραμμάτιστων αστοχιών, τη μείωση του χρόνου ακινησίας των αεροσκαφών και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων συντήρησης. Ως εκ τούτου, η προτεινόμενη πολιτική συντήρησης δεν αξιολογείται αποκλειστικά με

οικονομικά κριτήρια, αλλά και με βάση τη συμβολή της στη βελτίωση της επιχειρησιακής διαθεσιμότητας και της ασφάλειας πτήσεων.

Πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί ότι η παρούσα εργασία βασίστηκε στα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα των εξεταζόμενων εξαρτημάτων και κυρίως στις ώρες πτήσης ως μέτρο χρήσης. Η ενσωμάτωση πρόσθετων παραμέτρων, όπως ο αριθμός προσγειώσεων, οι κύκλοι λειτουργίας, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και δεδομένα συνεχούς παρακολούθησης της κατάστασης των εξαρτημάτων (Condition Monitoring), θα μπορούσε να βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια των προβλέψεων.

Στο πλαίσιο μελλοντικής έρευνας προτείνεται η εφαρμογή της ίδιας μεθοδολογίας και σε άλλα κρίσιμα συστήματα του αεροσκάφους, η αξιοποίηση μεγαλύτερου πλήθους δεδομένων αστοχιών και η διερεύνηση σύγχρονων τεχνικών πρόβλεψης, όπως μοντέλα μηχανικής μάθησης σε συνδυασμό με τις κλασικές μεθόδους αξιοπιστίας. Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατή η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων προγνωστικής συντήρησης, ικανών να υποστηρίζουν αποτελεσματικότερα τη λήψη αποφάσεων και τη διατήρηση υψηλής διαθεσιμότητας του στόλου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Εγχειρίδιο Πολεμικής Αεροπορίας ΕΠΑ Γ-3/ΓΕΑ, «Περί Εκτίμησης Επικινδυνότητας», Φεβρουάριος 2016

Κανονισμός Πολεμικής Αεροπορίας ΚΠΑ Γ-4/2011/ΓΕΑ, «Κανονισμός Τεχνικής Υποστήριξης Α/Φ – Ε/Π Πτερύγων – Σμηναρχιών ΠΑ», Δεκέμβριος 2011

Campanella, J. (1999). Principles of Quality Costs: Principles, Implementation and Use. 3rd Edition, ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin.

Duc-Hanh Dinh, Phuc Do, Minh-Hien Bui, Phuoc-Vinh Dang, A dynamic inspection model for predictive maintenance considering different degrees of inspection quality, Reliability Engineering & System Safety, Volume 261, 2025, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111165>

Ebeling, C. E. (2019). An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering (3rd ed.). Long Grove, IL: Waveland Press.

Izaak Stanton, Kamran Munir, Ahsan Ikram, Murad El-Bakry, Predictive maintenance analytics and implementation for aircraft: Challenges and opportunities, , 25 December 2022, <https://doi.org/10.1002/sys.21651> (ARTICLE)

Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (1999). Juran's Quality Handbook. 5th Edition, McGraw-Hill, New York.

Karaoğlu, U., Mbah, O., & Zeeshan, Q. (2023). Applications of machine learning in aircraft maintenance. Journal of Engineering Management and Systems Engineering, 2(1), 76-95.

Kowalski Mirosław, Izdebski Mariusz, Żak Jolanta, Gołda Paweł, Manerowski Jerzy , Planning and management of aircraft maintenance using a genetic algorithm, , vol. 23, no. 1, 2021, DOI:10.17531/ein.2021.1.15

Modarres, M., Kaminskiy, M., & Krivtsov, V. (2017). Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

Mohamed Ben-Daya, Salih O. Duffuaa, Abdul Raouf, Jezdimir Knezevic, Daoud Ait-Kadi, Handbook of Maintenance Management and Engineering, 2009, <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0>

Pedro Andrade, Catatina Silva, Bernardete Ribeiro, Bruno F. Santos, Aircraft Maintenance Check Scheduling Using Reinforcement Learning, *Aerospace* 2021, 8(4), 113; <https://doi.org/10.3390/aerospace8040113>

Shama, M. S., Alharthi, A. S., Almulhim, F. A., Gemeay, A. M., Meraou, M. A., Mustafa, M. S., Aljohani, H. M. (2023). Modified generalized Weibull distribution: theory and applications. *Scientific Reports*, 13(1), 12828.

Stefania Ferrisi, Paolo Cappellari, Rosita Guido, Domenico Umbrello, Giuseppina Ambrogio, Application of Two-Parameter Weibull Distribution for Predictive Maintenance: A Case Study, *Procedia Computer Science*, Volume 253, 2025, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.041>.

. Taherdoost, H. (2022). Different types of data analysis; data analysis methods and techniques in research projects. *International Journal of Academic Research in Management*, 9(1), 1-9.

Teimourian, H., Abubakar, M., Yildiz, M., & Teimourian, A. (2022). A comparative study on wind energy assessment distribution models: a case study on Weibull distribution. *Energies*, 15(15), 5684.

Y. Yang, J. Li and C. Xu, "Reliability Data Analysis of Aviation Equipment Based on Weibull Distribution," 2022 4th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC), Qingdao, China, 2022, pp. 342-345, doi: 10.1109/ICFTIC57696.2022.10075118