



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας

Διπλωματική Εργασία

Ποσοτική και Ποιοτική Εκτίμηση Επικινδυνότητας

Αεροπορικών Υλικών

Σαπφώ Κουρμπέλη

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Σταυρούλα Τσιτσιφλή

Πάτρα, Ιούνιος 2023

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο 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 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 συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Ποσοτική και Ποιοτική Εκτίμηση Επικινδυνότητας
Αεροπορικών Υλικών

Σαπφώ Κουρμπέλη

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Σταυρούλα Τσιτσιφλή

Διδάκτωρ, Ελληνικό Ανοικτό
Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Νικόλαος Σαπίδης

Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Δυτικής
Μακεδονίας

Πάτρα, Ιούνιος 2023

*Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στον θείο μου, ο οποίος
κάλυψε τα έξοδα των μεταπτυχιακών σπουδών μου.*

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει μια σύντομη μεθοδολογία υπολογισμού και εκτίμησης επικινδυνότητας αεροπορικών υλικών σε καθορισμένο μελλοντικό χρονικό διάστημα. Σκοπός είναι η παρουσίαση μεθόδων που μπορεί να ακολουθήσει ένας μελετητής του τμήματος ποιοτικού ελέγχου εταιρίας συντήρησης αεροσκαφών προκειμένου να προβλέψει σε συγκεκριμένο μελλοντικό χρόνο τον αριθμό αστοχιών του υπό μελέτη κάθε φορά αεροπορικού υλικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση εφαρμογής ή όχι επέκτασης του ορίου ζωής-λειτουργίας του.

Τα Κεφάλαια 1 και 2 αποτελούν εισαγωγικά κεφάλαια, στα οποία αναλύονται βασικά στοιχεία για τον αναγνώστη σχετικά με τις κατηγορίες των αεροπορικών υλικών, την έννοια και εφαρμογή της αξιοπλοΐας συντήρησης και τα στατιστικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή των μεθόδων Ελαχίστων Τετραγώνων και Μέγιστης Πιθανοφάνειας και της ανάλυσης Weibull. Τέλος, ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της εκτίμησης επικινδυνότητας της χρήσης ενός αεροπορικού υλικού, βάσει της δριμύτητας και της πιθανότητας αστοχίας.

Το Κεφάλαιο 3 είναι αφιερωμένο στην εκτενή περιγραφή των βημάτων που προτείνεται να ακολουθήσει ο μελετητής για να εξάγει άνευ πειραμάτων αξιόπιστα συμπεράσματα για την μελλοντική συμπεριφορά του υπό μελέτη υλικού. Σε κάθε ενότητα παρουσιάζεται η σχετική μεθοδολογία, η οποία συνοδεύεται από επεξηγηματικό παράδειγμα του Παραρτήματος στο τέλος της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία αναπτύσσεται μέσω της συλλογής δεδομένων, τον υπολογισμό των συντελεστών της κατανομής Weibull, τη δημιουργία και ερμηνεία του Διαγράμματος Weibull, τον υπολογισμό μελλοντικών αστοχιών, την εκτίμηση δριμύτητας και τελικά την εκτίμηση επικινδυνότητας.

Το Κεφάλαιο 4 αποτελείται από δύο περιπτώσεις μελέτης επικινδυνότητας αεροπορικών υλικών. Τα στοιχεία για την διεξαγωγή και των δύο μελετών συλλέχθηκαν από την τεχνική βάση συντήρησης της 114 Πτέρυγας Μάχης που εδρεύει στην Τανάγρα Βοιωτίας. Η πρώτη μελέτη περίπτωση αφορά την επικινδυνότητα χρήσης του εκκινητή (Turbo-starter) του μαχητικού αεροσκάφους M2000-5. Πρόκειται για την μελέτη υλικού αθροιστικής κοπώσεως με ύπαρξη ιστορικού αστοχιών. Η

δεύτερη περίπτωση αφορά την επικινδυνότητα χρήσης του διαμοιραστή ροής υψηλής πίεσης (Connecting Block) του ίδιου τύπου αεροσκάφους. Η συγκεκριμένη μελέτη αφορά ημερολογιακή κόπωση και επιλέχθηκε σκοπίμως, διότι στο ιστορικό του υλικού δεν σημειώνονται αστοχίες. Επομένως, γίνεται εισαγωγή και περιγραφή της ανάλυσης Weibayes, ειδικής περίπτωσης της Weibull στην περίπτωση μηδενικών αστοχιών.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθεται η χρησιμοποιούμενη βιβλιογραφία χωρισμένη σε άρθρα, βιβλία και πρότυπα.

Λέξεις- Κλειδιά

Εκτίμηση Επικινδυνότητας

Ανάλυση Weibull

Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών

Εκτίμηση Δριμύτητας

Αξιοπλοΐα

Quantitative and Qualitative Risk Assessment of Aeronautical Materials

Sapfo Kourmpeli

Abstract

This thesis describes the methodology for calculating and assessing the risk of aeronautical materials in a defined future time period. The purpose is to present methods that can be followed by a specialist from the quality control department of an aircraft maintenance company in order to predict in a specific future time the number of failures of the aeronautical material and can also be used to assess the ability of the extension the life limit - of its operation.

Chapter 1 is an introductory chapter that provides basic information for the reader about the categories of aeronautical materials, the meaning and application of continuing airworthiness, and the statistical tools that we use. More specifically, are described the Least Squares and Maximum Likelihood methods and the Weibull analysis. Finally, we describe the risk assessment of the use of an aeronautical material, based on the severity and the probability of failure.

In Chapter 2 are described the steps that the specialist could follow in order to draw reliable conclusions, without experiments, about the future behavior of the under study material. In each section, the relevant methodology is presented, followed by an illustrative example. Especially, the methodology is developed through data collection, calculation of the coefficients of the Weibull distribution, creation and interpretation of the Weibull Diagram, calculation of future failures, severity assessment and finally the risk assessment.

Chapter 3 consists two hazard case studies of aeronautical material. The data of both studies were collected from the technical base of the 114CW based in Tanagra Boeotias . The first case study concerns the risk of using the turbo-starter of the M2000-

5 fighter aircraft. It is a study of cumulative fatigue material with failure history. The second case concerns the risk of using the high-pressure flow divider (Connecting Block) of the same type of aircraft. This material wears out by calendar fatigue and was chosen purposefully because there are no failures in the history of the material. Therefore, is described and used the Weibayes analysis, a special case of Weibull in the case of zero failures.

Keywords

Risk Assessment

Weibull Analysis

Predicting Future Failures

Severity Assessment

Airworthiness

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	6
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Πινάκων	11
Κατάλογος Εικόνων	13
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Προαπαιτούμενες Τεχνικές Έννοιες.....	15
1.1 Γενικά Περί Αεροσκάφους.....	15
1.2 Αξιοπλοΐα	16
1.2.1 Αξιοπλοΐα Σχεδίασης	17
1.2.2 Αξιοπλοΐα Συντήρησης	18
1.3 Κατηγορίες Αεροπορικών Υλικών.....	19
1.3.1 Ορισμός Κατηγοριών	19
1.3.2 ΛΟΖ-ΛΟΛ Υλικά.....	20
1.3.3 Αθροιστική και Ημερολογιακή Κόπωση	22
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Στατιστικές Μέθοδοι.....	24
2.1 Στατιστική Ανάλυση - Γενικά	24
2.1.1 Μέθοδος Ελάχιστων Τετραγώνων	24
2.1.2 Μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας	27
2.1.3 Κατανομή Weibull	27
2.2 Εκτίμηση Επικινδυνότητας	30
2.2.1 Αναγνώριση Κινδύνων.....	31
2.2.2 Ανάλυση Επικινδυνότητας.....	33
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Μεθοδολογία Μελέτης Επικινδυνότητας.....	40
3.1 Συλλογή Δεδομένων.....	40

3.2	Υπολογισμός και Ερμηνεία Παραμέτρων Weibull	43
3.2.1	Υπολογισμός Αθροιστικής Πιθανότητας Αστοχίας	43
3.2.2	Χρήση Μεθόδου Ελάχιστων Τετραγώνων	44
3.2.3	Χρήση Μεθόδου Μέγιστης Πιθανοφάνειας	45
3.2.4	Επιλογή Κατάλληλης Μεθόδου	46
3.2.5	Ερμηνεία Παραμέτρων	48
3.3	Δημιουργία και Ερμηνεία Διαγράμματος Weibull	49
3.4	Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών	52
3.5	Ποιοτική Εκτίμηση Επικινδυνότητας	53
3.5.1	Ποιοτική Εκτίμηση Πιθανότητας Αστοχίας	53
3.5.2	Εκτίμηση Δριμύτητας	54
3.5.3	Εκτίμηση Επικινδυνότητας	54
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Μελέτες Περίπτωσης	57
4.1	Μελέτη περίπτωσης υλικού με αθροιστική κόπωση-Εκκινήσεις	57
4.1.1	Περιγραφή Turbo-starter και μηχανισμών αστοχίας	57
4.1.2	Συλλογή και παρουσίαση δεδομένων	59
4.1.3	Εκτίμηση Δριμύτητας	61
4.1.4	Εκτίμηση Πιθανότητας Αστοχίας	63
4.1.5	Εκτίμηση Επικινδυνότητας	76
4.2	Μελέτη Περίπτωσης Υλικού με ημερολογιακή κόπωση- Χωρίς Αστοχία	78
4.2.1	Περιγραφή Connecting Block και μηχανισμών αστοχίας	79
4.2.2	Εκτίμηση Δριμύτητας	83
4.2.3	Εκτίμηση Πιθανότητας Αστοχίας	84
4.2.4	Εκτίμηση Επικινδυνότητας	92
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
	Παράρτημα «Α»: Επεξηγηματικά Παραδείγματα	96

Π.Α.1 Επεξηγηματικό Παράδειγμα 1	96
Π.Α.2 Επεξηγηματικό παράδειγμα 2	97
Π.Α.3 Επεξηγηματικό Παράδειγμα 3	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Β»: Αριθμητική Εφαρμογή- Ήλοι Αεραγωγού.....	99
Π.Β.1 Υπολογισμός Πιθανότητας Αστοχίας	99
Π.Β.2 Εφαρμογή Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων	101
Π.Β.3 Εφαρμογή Μεθόδου Μέγιστης Πιθανοφάνειας	102
Π.Β.4 Επιλογή Καταλληλότερης Μεθόδου	104
Π.Β.5 Ερμηνεία Παραμέτρων.....	105
Π.Β.6 Δημιουργία και Ερμηνεία Διαγράμματος Weibull.....	105
Π.Β.7 Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών	106
Π.Β.8 Ποιοτική Εκτίμηση Πιθανότητας.....	107
Π.Β.9 Εκτίμηση Δριμύτητας.....	108
Π.Β.10 Εκτίμηση Επικινδυνότητας	109
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας ΣΥΑ/ΥΠΕΘΑ περί εκτίμησης επικινδυνότητας.....	34
Πίνακας 2: Αξιολόγηση Πιθανότητας βασισμένη στο ΣΥΑ/ΥΠΕΘΑ	36
Πίνακας 3: Αξιολόγηση δριμύτητας βάσει ΣΥΑ/ΚΕΑΠΕ	37
<i>Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά σύγκρισης των Μεθόδων Ελάχιστων Τετραγώνων και Μέγιστης Πιθανοφάνειας</i>	<i>47</i>
Πίνακας 5: Βήματα διεξαγωγής μελέτης επικινδυνότητας.....	56
Πίνακας 6: Ιστορικά στοιχεία Turbo-starter	60
Πίνακας 7: Δεδομένα τμηματικής και πλήρους πληροφορίας για τον μηχανισμό αστοχίας «Ύπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο».....	64
Πίνακας 8: Υπολογισμός πιθανότητας αστοχίας για τον μηχανισμό « Ύπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο»	66
Πίνακας 9: Υπολογισμός σημείων του απλού γραμμικού προτύπου	66
Πίνακας 10: Δεδομένα των 15 Turbo-starter για την πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών	70
Πίνακας 11: Υπολογισμός μελλοντικής πιθανότητας αστοχίας σε βάθος 2 ετών	71
Πίνακας 12: Πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών σε βάθος 10 ετίας	72
Πίνακας 13: Δεδομένα τμηματικής και πλήρους πληροφορίας για τον μηχανισμό «Θραύση άξονα περιστροφής».....	73
Πίνακας 14: Πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών σε βάθος 2 ετών.....	75
Πίνακας 15: Πρόβλεψη αστοχιών σε βάθος 10ετίας	76
Πίνακας 16: Εκτίμηση επικινδυνότητας μελετώμενων μηχανισμών αστοχίας Turbostarter.....	77
Πίνακας 17: Τελική λίστα turbo-starter για εκμετάλλευση σε βάθος 2 ετών..	78
Πίνακας 18: Ιστορικά στοιχεία L/H Connecting Block.....	81
Πίνακας 19:Ιστορικά στοιχεία R/H Connecting Block	82
Πίνακας 20: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρου κλίμακας β	85
Πίνακας 21: Υπολογισμός παραμέτρου η L/H Connecting Block	86
Πίνακας 22:Υπολογισμός παραμέτρου η R/H Connecting Block.....	87
Πίνακας 23: L/H Connecting Block για πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών ...	88
Πίνακας 24: R/H Connecting Block για πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών. ..	89

Πίνακας 25: Υπολογισμός μελλοντικής αστοχίας των L/H Connecting Block σε βάθος 1 έτους	89
Πίνακας 26: Υπολογισμός μελλοντικών αστοχιών των R/H Connecting Block σε βάθος 1 έτους	90
Πίνακας 27:Υπολογισμός μελλοντικών αστοχιών L/H Connecting Block σε βάθος 10ετίας.....	91
Πίνακας 28: Υπολογισμός μελλοντικών αστοχιών R/H Connecting Block σε βάθος 10ετίας.....	91
Πίνακας 29: Εκτίμηση επικινδυνότητας μηχανισμών αστοχίας Connecting Block.....	92
Πίνακας 30: Connecting Block προς εκμετάλλευση σε βάθος ενός έτους.....	93
Πίνακας 31: Αστοχίες ήλων αεραγωγού ανάλογα των ωρών πτήσεως	96
Πίνακας 32: Δεδομένα αστοχιών ήλων αεραγωγού.....	99
Πίνακας 33: Δεδομένα αστοχίας ήλων-πλήρης πληροφορία	100
Πίνακας 34: Πιθανότητα αστοχίας ήλων-πλήρης πληροφορία.	100
Πίνακας 35:Τελικός Πίνακας Υπολογισμού Πιθανότητας Αστοχίας.....	101
Πίνακας 36: Υπολογισμός ζευγών συντεταγμένων.....	102
Πίνακας 37: Συγκεντρωτικός Πίνακας υπολογισμών για την επίλυση του τύπου (2.3).....	103
Πίνακας 38: Πίνακας ορθής καταγραφής των δεδομένων αστοχιών στο MINITAB.....	103
Πίνακας 39: Εκτιμήτριες των παραμέτρων β και η με χρήση του MINITAB ..	104
Πίνακας 40: Δεδομένα αστοχιών ήλων	105
Πίνακας 41: Υπολογισμός συνολικής πιθανότητας αστοχίας.....	107

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Βασικά μέρη αεροσκάφους	15
Εικόνα 2: Γραφική παράσταση σ.π.π κατανομής Weibull 2 παραμέτρων με $\eta=1$ για διάφορες τιμές β	28
Εικόνα 3: Γραφική παράσταση α.σ.π.π κατανομής Weibull 2 παραμέτρων με $\eta=1$ για διάφορα β	29
Εικόνα 4: Γραφική παράσταση συνάρτησης κινδύνου με $\eta=1$ για διάφορες τιμές του β	30
Εικόνα 5: Διάγραμμα Αιτίου-Αποτελέσματος.....	32
Εικόνα 6: Σύμβολα γεγονότων FTA.....	33
Εικόνα 7: Σύμβολα πυλών FTA.....	33
Εικόνα 8:Διάγραμμα Weibull στην περίπτωση λανθασμένης κατανομής	50
Εικόνα 9:Διάγραμμα Weibull δύο μηχανισμών αστοχίας	51
Εικόνα 10:Διάγραμμα Weibull ελαττωματικής παρτίδας.....	51
Εικόνα 12: Προσαρμογή γραμμικού προτύπου στα δεδομένα της μελέτης	67
Εικόνα 13: Διάγραμμα Weibull για τον μηχανισμό αστοχίας «Ύπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο»	68
<i>Εικόνα 13: Διάγραμμα Weibull</i>	106

Εισαγωγή

Τα τελευταία 20 χρόνια η δημιουργία πολλών αερογραμμών οδήγησε στην μείωση του κόστους των αεροπορικών ταξιδιών, με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση των προγραμμάτων πτήσεων των εταιριών. Η φύση της λειτουργίας του πτητικού μέσου τόσο στον αέρα όσο και στο έδαφος απαιτεί την εξασφάλιση κάθε στιγμή της ασφάλειας πτήσεων και εδάφους, μέσα από διάφορους ελέγχους. Οι προσομοιώσεις λειτουργίας σε διάφορα συστήματα του αεροσκάφους και οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (NDI) αποτελούσαν για χρόνια τις πιο γνωστές και εφαρμόσιμες μεθόδους ελέγχου της αξιοπλοΐας και ασφάλειας του πτητικού μέσου.

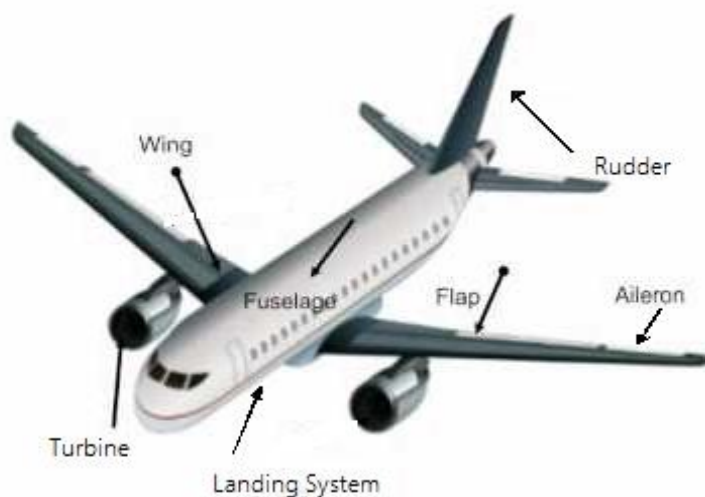
Η αύξηση της συχνότητας των πτήσεων ωστόσο, αύξησε και την συχνότητα των ελέγχων και συνεπώς και τα έξοδα των αερογραμμών. Έτσι σταδιακά ξεκίνησε η αντικατάσταση ενός τμήματος των φυσικών ελέγχων και επιθεωρήσεων από στατιστικούς ελέγχους. Το μεγαλύτερο μέρος της μέχρι τώρα έρευνας βασίζεται στην μελέτη επικινδυνότητας και ανάλυσης ρίσκου για τμήματα των αεροπορικών κινητήρων με χρήση της κατανομής Weibull και του μοντέλου Monte Carlo.

Η παρούσα εργασία θα γενικεύσει την μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενη μέθοδο, συνδυάζοντας τα στρατιωτικά πρότυπα του NATO, την στατιστική ανάλυση με Weibull κατανομή για όλα τα κρίσιμα υλικά ενός αεροσκάφους.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Προαπαιτούμενες Τεχνικές Έννοιες

1.1 Γενικά Περί Αεροσκάφους

Κάθε αεροσκάφος απαρτίζεται από πέντε βασικά συκροτήματα: πτέρυγα, άτρακτο, σύστημα προσγείωσης, κινητήρα/κινητήρες και κινητές επιφάνειες. Κάθε ένα εξ αυτών των συκροτημάτων χωρίζεται σε πολλά μικρότερα υποσυκροτήματα ή modules τα οποία απαρτίζονται από ποικίλα υλικά. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά καθώς και αυτά που χρησιμοποιούνται για την συναρμολόγηση-ένωση των μεγαλύτερων υποσυκροτημάτων (όπως βίδες, πριτσίνια, πίροι, κόλεις) εμπίπτουν σε διάφορες κατηγορίες διάρκειας ζωής.



Εικόνα 1: Βασικά μέρη αεροσκάφους

Στην σημερινή εποχή και στο άμεσο μέλλον τα περισσότερα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας θα ανήκουν σε εταιρίες μίσθωσης (Leasing Companies) οι οποίες

θα εξυπηρετούν μεγάλο πλήθος αερογραμμών. Τόσο με τα τωρινά δεδομένα όσο και σε ένα πλαίσιο συνεχούς δανεισμού και εναλλαγής αεροσκαφών, η αυστηρή τήρηση αρχείων για κάθε υλικό σε καθημερινή βάση είναι απαραίτητη για την ορθή εξυπηρέτηση των αεροσκαφών, την διασφάλιση ποιότητας των υπηρεσιών και την ασφάλεια των πτήσεων. Η συστηματική καταγραφή και αρχειοθέτηση των καταπονήσεων, των ωρών πτήσης, των εργασιών που πραγματοποιούνται κ.λπ. αποτελούν ένα δείγμα παρακολούθησης (monitoring) του αεροσκάφους κατά την διάρκεια ζωής του. Οι διαδικασίες αυτές, μεταξύ άλλων, καθιστούν ένα αεροπλάνο αξιόπλοο.

1.2 Αξιοπλοΐα

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) αξιοπλοΐα είναι η ικανότητα ενός αεροσκάφους, ή ενός αερομεταφερόμενου εξοπλισμού ή συστήματος, να λειτουργεί εν πτήση και στο έδαφος χωρίς σημαντικό κίνδυνο ως προς το πλήρωμα του σκάφους, το πλήρωμα εδάφους, τους επιβάτες και ως προς τρίτα πρόσωπα. Κατά τον ίδιο τρόπο, αξιόπλοο ορίζεται ένα αεροσκάφος, ένας κινητήρας ή ένα άλλο εξάρτημα του σκάφους όταν συμμορφώνεται με τον εγκεκριμένο σχεδιασμό του και βρίσκεται σε κατάσταση ασφαλούς λειτουργίας. Η αξιοπλοΐα αποτελεί ολόκληρο παράρτημα (Annex) των Standard Recommended Practices του ICAO, και πιο συγκεκριμένα το Annex 8: Airworthiness of Aircraft. Το Annex 8 αποτελεί με απλά λόγια το νομοθετικό πλαίσιο γύρω από την Αξιοπλοΐα, ενώ οι διατάξεις κάθε άρθρου του βρίσκονται στο ICAO Doc 9760: Airworthiness Manual.

Η πιστοποίηση ενός αεροσκάφους ή ενός εξαρτήματος ως αξιόπλοο δεν πραγματοποιείται μόνο μετά το πέρας της κατασκευής, αλλά εξετάζεται και επαναπιστοποιείται καθ' όλη την διάρκεια ζωής του. Υπάρχουν δηλαδή δύο είδη αξιοπλοΐας:

- i. Αξιοπλοΐα Σχεδίασης (Continued Airworthiness) : Αποτελείται από όλα τα έργα που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να επιβεβαιωθεί ότι οι συνθήκες υπό τις οποίες έχει εκδοθεί ένα Πιστοποιητικό Τύπου (Type Certificate) ή ένα Συμπληρωματικό Πιστοποιητικό Τύπου (Supplemental Type Certificate) συνεχίζουν να πληρούνται ανά πάσα στιγμή σε όλη την διάρκεια ισχύος του.

- ii. Αξιοπλοΐα Συντήρησης (Continuing Airworthiness): Αποτελείται από το σύνολο των διεργασιών με τις οποίες ένα αεροσκάφος, κινητήρας, έλικα ή άλλο εξάρτημα συμμορφώνεται με τις ισχύουσες απαιτήσεις αξιοπλοΐας και διατηρείται σε κατάσταση ασφαλούς λειτουργίας καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας του.

Στην Ευρώπη για διευκόλυνση, αμεσότητα και κοινή στρατηγική ιδρύθηκε ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Ασφάλειας Πτήσεων (EASA), ο οποίος αναλαμβάνει την αρχική πιστοποίηση και έγκριση παραγωγής κάθε αεροπορικού εξαρτήματος των χωρών της Ε.Ε. Αντίστοιχη αρχή υπάρχει και στις ΗΠΑ, η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας (FAA).

1.2.1 Αξιοπλοΐα Σχεδίασης

Μετά την αρχική έγκριση αξιοπλοΐας του αεροσκάφους εκδίδεται όπως αναφέρθηκε και στον ανωτέρω ορισμό το Πιστοποιητικό Τύπου. Πιστοποιητικό Τύπου είναι ένα έγγραφο που εκδίδεται από ένα συμβαλλόμενο κράτος και ορίζει το σχέδιο του αεροσκάφους ή κινητήρα ή έλικας ή άλλου εξαρτήματος και πιστοποιεί ότι το σχέδιο αυτό συμμορφώνεται με τις καθορισμένες απαιτήσεις αξιοπλοΐας του Κράτους. Το Πιστοποιητικό Τύπου, δηλαδή, ορίζει την ονομασία ενός νέου προϊόντος και περιγράφει την βασική δομή του. Για παράδειγμα μετά την ανάπτυξη του και την δοκιμή του το αεροσκάφος A321 της AIRBUS πήρε το Type Certificate από την EASA που ορίζει την ονομασία και την βασική δομή του αεροσκάφους. Έπειτα κατά την φάση μαζικής παραγωγής κάθε αεροσκάφος με το μοναδικό Serial Number του οφείλει να πιστοποιείται βάσει του προτύπου.

Σε επόμενο βήμα απαραίτητη είναι η έκδοση του Πιστοποιητικού Αξιοπλοΐας (Certificate of Airworthiness-CofA) το οποίο αποτελεί ουσιαστικά την άδεια ή το επίσημο έγγραφο που εκδίδεται από εθνικό φορέα αξιοπλοΐας και πιστοποιεί ότι το αεροσκάφος είναι αξιόπλοο. Στην Ελλάδα, η Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ) είναι αρμόδια για την έκδοση CofA για κάθε αεροσκάφος που είναι καταχωρημένο στην χώρα.

Το Part 21 του Annex 8 περιλαμβάνει τις απαιτήσεις για όλες τις άδειες που οφείλει να εκδώσει ένα αεροπλάνο ή αεροπορικό εξάρτημα πριν την έναρξη κανονικής λειτουργίας του.

1.2.2 Αξιοπλοΐα Συντήρησης

Τα παραπάνω πιστοποιητικά αφορούν την φάση Αξιοπλοΐας Σχεδίασης. Η παρούσα εργασία ωστόσο, μελετά την συμπεριφορά των εξαρτημάτων κατά την διάρκεια λειτουργίας τους, συνεπώς περισσότερη έμφαση θα δοθεί στην Αξιοπλοΐα Συντήρησης. Η Αξιοπλοΐα Συντήρησης έχει μεγάλο εύρος καθηκόντων για να διατελέσει επιτυχώς το έργο της. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τον Commission Regulation (EU) No 1321/2014 της 26^{ης} Νοεμβρίου 2014 η αξιοπλοΐα συντήρησης περιλαμβάνει τα εξής αντικείμενα:

- i. **Part M:** Διαχείριση δεδομένων και απαιτήσεων συντήρησης, διαχείριση του προσωπικού συντήρησης, CAMO, Πιστοποίηση αποδέσμευσης αεροσκάφους κλπ .
- ii. **Part 145:** Έλεγχος και Πιστοποίηση των Οργανισμών Συντήρησης (π.χ. Τεχνική Βάση Aegean, EAB), καθορισμός όλων των απαραίτητων προτύπων με τα οποία θα πρέπει να συμμορφώνονται το σύστημα ποιότητας τους, ο εξοπλισμός, οι εγκαταστάσεις τους κλπ.
- iii. **Part 66:** Αδειοδότηση, εκπαίδευση και καθορισμός απαραίτητων προσόντων του προσωπικού ανά κατηγορία άδειας (PPL, ATPL, CPL, B1, B2 κλπ) και τύπο αεροσκάφους (Type Rating).
- iv. **Part 147:** Οργανισμοί εκπαίδευσης προσωπικού, καθορισμός απαιτήσεων όσον αφορά τις εγκαταστάσεις, το εκπαιδευτικό προσωπικό, την εξεταστέα ύλη και τις επιδόσεις, πιστοποίηση τμημάτων βασικής εκπαίδευσης και τμημάτων εκπαίδευσης (π.χ. Σχολή Ικάρων, ΣΜΥΑ κλπ) σε συγκεκριμένα τύπο.

Το Part II: Procedures for Certification and Continuing Airworthiness του Annex 8 διαθέτει 6 κεφάλαια εκ των οποίων το Chapter 4 είναι αποκλειστικά αφιερωμένο στην Αξιοπλοΐα Συντήρησης, ενώ το Part III: Large Airplanes διαθέτει το Chapter 10 το οποίο περιγράφει προγράμματα συντήρησης και πληροφορίες συντήρησης από την έναρξη της πιστοποίησης του σκάφους.

Γενικά η αξιοπλοΐα αποτελεί ένα σύνολο ελέγχων, δοκιμών και πιστοποιήσεων που ακολουθούν το κάθε εξάρτημα από την δημιουργία του, καθ' όλη την διάρκεια ζωής και λειτουργίας του και μέχρι την χρονική στιγμή που κρίνεται άχρηστο. Η

αξιοπλοΐα δεν πρέπει να συγχέεται με την Ασφάλεια Πτήσεων Εδάφους ή με την Διασφάλιση Ποιότητας, καθώς οι έννοιες αυτές αποτελούν τμήμα της. Όπως είναι αντιληπτό για να κριθεί ένα εξάρτημα αξιόπλοο το νομοθετικό πλαίσιο και οι διαδικασίες που κρύβονται πίσω από την πιστοποίηση ή επαναπιστοποίηση, απαιτούν χρόνο και χρήματα. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής επομένως δεν αποτελεί το να διαβεβαιώσει ότι ένα εξάρτημα συνεχίζει να είναι αξιόπλοο, αλλά να δώσει μία εκτίμηση, σε σύντομο χρόνο και με χαμηλό κόστος, για το αν δύναται το εκάστοτε εξάρτημα να είναι αξιόπλοο. Εάν οι ενδείξεις του στατιστικού ελέγχου έχουν θετικά αποτελέσματα, μπορεί έπειτα η κάθε εταιρία συντήρησης να προχωρήσει σε περεταίρω ελέγχους, με την σιγουριά μιας αρχικής εκτίμησης.

1.3 Κατηγορίες Αεροπορικών Υλικών

1.3.1 Ορισμός Κατηγοριών

Σύμφωνα με το ευρετήριο ορισμών της EASA ο ορισμός της συντήρησης (Maintenance) περιλαμβάνει την επιθεώρηση, γενική επισκευή (overhaul), επισκευή έπειτα από βλάβη (repair), συντήρηση και αντικατάσταση εξαρτημάτων εξαιρώντας την προληπτική συντήρηση. Η παρακολούθηση και συντήρηση κάθε υλικού του σκάφους για την εξασφάλιση της ορθής και ασφαλούς λειτουργίας του γίνεται με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία αυτό κάθε φορά εμπίπτει. Πιο συγκεκριμένα με βάση την χρονική διάρκεια που χαρακτηρίζεται εύχρηστο ένα υλικό και την δυνατότητα επισκευής του αναπτύσσονται οι εξής κατηγορίες:

- i. On condition (ανταλλακτικά): το υλικό θεωρείται εύχρηστο μέχρι την στιγμή που θα διαπιστωθεί βλάβη. Τα on condition υλικά δηλαδή, υφίστανται περιοδικά επιθεωρήσεις στο πλαίσιο προληπτικής συντήρησης. Σκοπός των επιθεωρήσεων αυτών είναι η διάγνωση pass-no pass του υλικού, η οποία καθορίζει αν το υλικό συνεχίζει να είναι λειτουργικό ή όχι, οπότε και αφαιρείται από το αεροσκάφος και αντικαθίσταται για την πρόληψη πιθανού ατυχήματος. Το πρόγραμμα συντήρησης των υλικών αυτών ορίζεται είτε από την κατασκευάστρια εταιρία είτε από την εταιρία που το χρησιμοποιεί.

- ii. Life limited (υλικά λήξης ορίου ζωής-ΛΟΖ): το υλικό έχει υποχρεωτικό όριο αντικατάστασης το οποίο ορίζεται με μία συγκεκριμένη μονάδα μέτρησης, η οποία μπορεί να είναι ώρες πτήσεις, ώρες λειτουργίας, κύκλοι λειτουργίας, ημερολογιακό όριο κ.λπ. Πρόκειται, δηλαδή, για υλικά περιορισμένου χρόνου ζωής και πρέπει να αφαιρούνται από το σκάφος ή από το μείζον εξάρτημα που τα περιλαμβάνει πριν λήξει το όριο ζωής τους.
- iii. Hard life (υλικά λήξης ορίου λειτουργίας-ΛΟΛ): το υλικό επιδέχεται επιθεωρήσεις διαφόρων κλιμάκων (πχ overhaul, bench check κλπ) σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα μετρούμενα και πάλι σε διάφορες μονάδες μέτρησης, όπως ώρες πτήσεις, κύκλοι λειτουργίας κ.λπ. που ορίζονται από τον κατασκευαστή. Τα υλικά αυτά έπειτα από κάθε επιθεώρηση το όριο λειτουργίας τους ανανεώνεται με ίδια ή διαφορετική τιμή λειτουργίας έως την επόμενη επιθεώρηση. Όταν δεν υπάρχει κάποιος επιπλέον καθορισμός μπορούν να επιθεωρούνται και να θεωρούνται εύχρηστα επ' άπειρο.
- iv. Consumable (αναλώσιμα υλικά): υλικά χαμηλού κόστους τα οποία αντικαθίστανται έπειτα από κάθε είδος συντήρησης.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στα Hard Life υλικά και πιο συγκεκριμένα στην δυνατότητα παράτασης του ορίου που ορίζει ο κατασκευαστής για την γενική επισκευή. Σύμφωνα με την FAA «γενική επισκευή» ή «Overhaul» είναι η διαδικασία που διασφαλίζει ότι το υπό εξέταση υλικό είναι σε πλήρη συμμόρφωση με τις ισχύουσες ανοχές που καθορίζονται από το Πιστοποιητικό Τύπου ή τις οδηγίες αξιοploϊας σχεδίασης του κατασκευαστή ή από δεδομένα εγκεκριμένα από την Αρχή. Έπειτα από την γενική επισκευή το υλικό θεωρείται και πάλι καινούργιο και οι τιμές κοπώσεων σε ώρες ή κύκλους λειτουργίας που είχε διατελέσει πριν την επιθεώρηση μηδενίζονται.

1.3.2 ΛΟΖ-ΛΟΛ Υλικά

Υπάρχουν υλικά που ανήκουν σε μία μόνο εκ των ανωτέρω κατηγοριών, ωστόσο υπάρχουν και αρκετές περιπτώσεις υλικών που ενσωματώνουν τους κανόνες παραπάνω κατηγοριών. Τα On condition και τα Consumable υλικά συνήθως δεν συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά τους με κάποια άλλη κατηγορία υλικών. Οι κατηγορίες των Hard Life και Life Limited, από την άλλη, πολύ συχνά απαντώνται στο ίδιο υλικό,

οπότε και δημιουργούν την κατηγορία των Hard Life-Limited Life, η οποία από εδώ και στη εξής, χάριν συντομίας θα αναφέρεται ως ΛΟΖ-ΛΟΛ.

Η κατηγορία στην οποία θα ανήκει το κάθε υλικό ανάλογα με την συντήρηση που απαιτεί προκειμένου να είναι εύχρηστο και αξιόπλοο καθορίζεται από την κατασκευάστρια εταιρία. Συνεπώς δεν υπάρχει κάποιος αυστηρός κανόνας για τα είδη των υλικών της κάθε κατηγορίας. Ωστόσο, ένα πολύ σύνηθες παράδειγμα αποτελεί το συγκρότημα προσγειώσης του αεροσκάφους (Landing Gear), λόγω αφενός των υψηλών τιμών καταπόνησης που δέχεται, αλλά και αφετέρου λόγω της κρισιμότητας του για την διεξαγωγή ασφαλών πτήσεων. Έτσι το Landing Gear στα περισσότερα είδη αεροσκαφών αποτελεί ΛΟΖ-ΛΟΛ υλικό. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει πως το υλικό περνά από περιοδικές επιθεωρήσεις όταν συμπληρώνει το καθορισμένο αριθμό προσγειώσεων, αλλά μετά από κάθε γενική επισκευή οι προσγειώσεις του δεν μηδενίζονται. Πιο συγκεκριμένα, ενώ το συγκρότημα θεωρείται μετά το overhaul καινούργιο, αυτό συνεχίζει να αθροίζει από εκεί που είχε μείνει τις προσγειώσεις του, διότι ο κατασκευαστής του έχει ορίσει ένα ακόμη όριο προσγειώσεων ή/και αριθμό γενικών επισκευών, το οποίο μόλις επιτευχθεί από το συγκεκριμένο συγκρότημα, αυτό πλέον είναι ληγμένο από το όριο ζωής του και θεωρείται άχρηστο.

Αριθμητικό Παράδειγμα: Το Landing Gear του αεροσκάφους Χ τύπου έχει όριο προσγειώσεων για γενική επισκευή τις 1500 προσγειώσεις και όριο λήξης ζωής τις 9000 προσγειώσεις. Οι 1500 προσγειώσεις αποτελούν το όριο λήξης λειτουργίας του υλικού και είναι ο περιορισμός που καθιστά το υλικό Hard Life. Οι 9000 προσγειώσεις είναι ο συνολικός αριθμός προσγειώσεων που δύναται να διατελέσει το συγκρότημα και όταν αυτές ολοκληρωθούν, ανεξαρτήτως της κατάστασης του υλικού εκείνη τη χρονική στιγμή, αυτό θεωρείται πλέον άχρηστο. Αυτός ο περιορισμός καθιστά το συγκρότημα Life Limited. Επομένως είναι κατανοητό ότι πρόκειται για ΛΟΖ-ΛΟΛ υλικό. Αν υπήρχε μόνο ο περιορισμός του Hard Life μετά από κάθε γενική επισκευή στις 1500 προσγειώσεις, η κόπωση του υλικού θα μηδενιζόταν και ξεκινούσε ξανά το μέτρημα έως τις 1500 προσγειώσεις επ' άπειρον. Τώρα όμως που υπάρχει και ο περιορισμός του Life Limited μετά την γενική επισκευή, οι προσγειώσεις συνεχίζουν να αθροίζονται στο 1500 και το υλικό θα περάσει την δεύτερη γενική επισκευή στις 3000, την τρίτη στις 4500 έως και την πέμπτη στις 7500 προσγειώσεις. Στις επόμενες 1500 προσγειώσεις όπου πλέον το συγκρότημα φτάνει αθροιστικά τις 9000 λήγει η ζωή

του και θεωρείται άχρηστο. Συνεπώς το συγκεκριμένο Landing Gear μπορεί να περάσει έως και 5 γενικές επισκευές στην διάρκεια ζωής του.

1.3.3 Αθροιστική και Ημερολογιακή Κόπωση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα Hard Life υλικά υπόκεινται επιθεωρήσεις μικρής (π.χ. bench check) και μεγάλης κλίμακας (overhaul) με βάση ένα όριο κοπώσεων που θέτει ο κατασκευαστής. Αυτό το όριο μπορεί να είναι ώρες πτήσεις, αριθμός εκκινήσεων, αριθμός πραγματικών ή/και συνολικό προσγειώσεων αλλά μπορεί να είναι ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε μήνες ή χρόνια. Η πρώτη περίπτωση ορίου, όπου οι κοπώσεις προστίθενται μέχρι της κρίσιμης τιμής για την εκάστοτε επιθεώρηση ονομάζεται αθροιστική κόπωση του υλικού. Ομοίως η δεύτερη περίπτωση που αφορά ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, το οποίο περιορίζει την λειτουργία του υλικού, ονομάζεται ημερολογιακή κόπωση. Σε μία τεχνική βάση υπάρχουν πάντα εφεδρικά υλικά αεροσκαφών σε περιπτώσεις αντικατάστασης είτε για προγραμματισμένη επιθεώρηση είτε για κάποια απρόβλεπτη βλάβη. Επομένως μπορεί κάποιο υλικό να παραμένει σε κατάσταση αποθήκευσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για την περίπτωση αυτή ο κατασκευαστής έχει ορίσει ένα χρονικό όριο αποθήκευσης στο οποίο το υλικό θα πρέπει να επιθεωρηθεί ως προς την καταλληλότητά του. Στην περίπτωση επομένως της ημερολογιακής κόπωσης υπάρχουν οι δύο υποπεριπτώσεις του ημερολογιακού ορίου εν ενεργείας υλικού και του ημερολογιακού ορίου αποθήκευσης υλικού.

Κατά την διάρκεια των περιόδων αιχμής των πτήσεων ένα αεροσκάφος εκτελεί περισσότερες πτήσεις τόσο σε αριθμό αλλά και σε διάρκεια σε σχέση με τις υπόλοιπες περιόδους, με αποτέλεσμα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα να καταπονείται περισσότερο από ότι συνήθως. Από την άλλη πλευρά κατά την διάρκεια μία συντήρησης δομής του αεροσκάφους, τα υλικά του συχνά παραμένουν πάνω στο σκάφος χωρίς να σημειώνουν αθροιστικές καταπονήσεις. Για την αποφυγή επομένως πιθανόν κινδύνων από λάθος συντήρηση και επιθεώρηση αρκετά κρίσιμα Hard Life υλικά διαθέτουν όρια και στους 2 τύπους κοπώσεων, αθροιστικό όριο κόπωσης και ημερολογιακό όριο κόπωσης. Για παράδειγμα, ένα servo-actuator για την κίνηση των

slats του αεροσκάφους τύπου X έχει όριο αθροιστικής κοπώσεως 1800 ώρες πτήσεις και όριο ημερολογιακής κοπώσεως 30 μήνες για γενική επισκευή. Συνεπώς, ο υπεύθυνος των Hard Life υλικών του γραφείου ποιοτικού ελέγχου κάθε τεχνικής βάσης ελέγχει σε καθημερινή βάση τα όρια και των δύο τύπων κοπώσεων του servo-actuator. Όποια από τις δύο κοπώσεις φτάσει πρώτη στην κρίσιμη τιμή της, το υλικό θεωρείται ληγμένο ως προς της λειτουργία του και χρήζει γενικής επισκευής.

Είναι προφανές σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στα παραπάνω υποκεφάλαια ότι η κατηγοριοποίηση, η συστηματική παρακολούθηση και συντήρηση των αεροπορικών υλικών είναι μια απαιτητική εργασία η οποία απαιτεί υψηλό βαθμό συγκέντρωσης και υπευθυνότητας από το εμπλεκόμενο προσωπικό. Συγκεκριμένα στην περίπτωση των Hard Life υλικών σημαντικό ρόλο, πέραν της προσεκτικής παρακολούθησης των ορίων κοπώσεως τους, διαδραματίζει η σωστή καταγραφή των καταπονήσεων που υπόκεινται τα υλικά χωρίς κανένα περιθώριο παράληψης ή απροσεξίας. Μία σωστή και οργανωμένη καταγραφή του ιστορικού του κάθε υλικού αποτελεί σημαντική διευκόλυνση στην εφαρμογή στατιστικών αναλύσεων με στοιχεία των υλικών αυτών και μάλιστα προσθέτει μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας στην εκάστοτε μελέτη.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Προαπαιτούμενες Γνώσεις Στατιστικής

2.1 Στατιστική Ανάλυση

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη ανάλυση των στατιστικών μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν για την διεξαγωγή των μελετών επικινδυνότητας στο επόμενο κεφάλαιο. Η διεξαγωγή της μελέτης στην παρούσα εργασία απαιτεί ένα συνδυασμό γνωστών στατιστικών κατανομών και μεθόδων, και πιο συγκεκριμένα την Μέθοδο Ελάχιστων Τετραγώνων ή/και την Μέθοδο Μέγιστης Πιθανοφάνειας και της Κατανομή Weibull.

2.1.1 Μέθοδος Ελάχιστων Τετραγώνων

Έστω το πρότυπο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης

$$y = Ax + B_0 + e \quad (1.1)$$

όπου με x συμβολίζεται η ανεξάρτητη μεταβλητή, με y η εξαρτημένη από τις τιμές της x μεταβλητή και ως e συμβολίζεται το τυχαίο σφάλμα. Στην περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης σκοπός είναι η εύρεση της γραμμικής σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών x, y , δηλαδή οι τιμές των παραμέτρων A και B_0 . Για να βρεθεί η σχέση μεταξύ του ζεύγους των μεταβλητών, απαραίτητο είναι να είναι δεδομένες n τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής x καθώς και οι αντίστοιχες παρατηρήσεις της εξαρτημένης μεταβλητής y . Δηλαδή, ο μελετητής πρέπει να διαθέτει n γνωστά ζεύγη (x_i, y_i) , για $i = 1, 2, \dots, n$. Είναι προφανές ότι όσο περισσότερα ζεύγη τιμών των μεταβλητών είναι γνωστά τόσο πιο ακριβής θα είναι η προσέγγιση του προτύπου. Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμα μόνο δύο ζεύγη τιμών τότε είναι άμεσα αντιληπτό ότι η προσαρμοσμένη ευθεία του προτύπου θα είναι αυτή που θα περνά από τα δύο αυτά σημεία. Ωστόσο σε μελέτες επικινδυνότητας υλικών οι παρατηρήσεις που διαθέτει ο μελετητής είναι πάντα περισσότερες σε αριθμό. Συνεπώς, μία μέθοδος απλή και ευρέως

γνωστή για τον υπολογισμό των παραμέτρων του προτύπου είναι η Μέθοδος Ελάχιστων Τετραγώνων.

Για την εφαρμογή της μεθόδου θεωρείται δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων με τον άξονα y να παριστάνει τα δεδομένα της εξαρτημένης μεταβλητής και τον άξονα x τα δεδομένα της ανεξάρτητης μεταβλητής. Τα n δεδομένα ζεύγη μεταβλητών τοποθετούνται στο επίπεδο. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θεωρείται δεδομένο, λόγω παρατηρήσεων που θα ειπωθούν σε επόμενο κεφάλαιο, ότι τα δεδομένα έχουν γραμμική συσχέτιση. Σε διαφορετική περίπτωση η πιο απλή μέθοδος επαλήθευσης της γραμμικής συσχέτισης απορρέει από την αναπαράσταση των σημείων πάνω στο επίπεδο και την εξαγωγή συμπερασμάτων οπτικά¹. Επιπλέον προκειμένου να εφαρμοσθεί η μέθοδος θα πρέπει να ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις για την εξαρτημένη μεταβλητή:

- i. Η διασπορά της $Y = y_x$ δεν εξαρτάται από την τιμή της x , δηλαδή

$$\text{var}(y_x) = \sigma^2, \text{για κάθε } x$$

- ii. Η συνδιασπορά μεταξύ τυχαίων παρατηρήσεων y_i, y_j για διαφορετικές τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής είναι μηδενική, δηλαδή

$$\text{cov}(y_i, y_j) = 0$$

- iii. Για κάθε τιμή x η εξαρτημένη μεταβλητή $Y = y_x$ έχει κανονική κατανομή.

Σύμφωνα με την Μέθοδο Ελάχιστων Τετραγώνων η ευθεία που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα είναι αυτή που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των σφαλμάτων, δηλαδή της κάθετης απόστασης της ευθείας από τα δεδομένα ζεύγη των παρατηρήσεων. Μάλιστα χρησιμοποιείται το τετράγωνο της απόστασης προκειμένου να αποφευχθούν ζητήματα όσον αφορά τις θετικές και αρνητικές διαφορές. Ο υπολογισμός των παραμέτρων της σχέσης (1.1) μπορεί να γίνει με την χρήση τύπων και γραφικά. Στην παρούσα εργασία θα αναπτυχθεί μόνο η γραφική μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων, λόγω του υψηλού όγκου δεδομένων που θα έχει να διαχειριστεί ο μελετητής. Πιο συγκεκριμένα ο υπολογισμός θα γίνει με χρήση EXCEL και με την χρήση MINITAB. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως σε όλες τις περιπτώσεις

¹ Ο έλεγχος παλινδρόμησης μπορεί να γίνει και μέσω ελέγχου F. Βλ. Βασικά Εργαλεία και Μέθοδοι για τον Έλεγχο της Ποιότητας, Τόμος Β, ΔΙΠ50, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, σελ.: 159-160.

οι παράμετροι A και B_0 που υπολογίζονται αποτελούν προσεγγίσεις των πραγματικών τιμών, οι οποίες δεν μπορούν να υπολογιστούν ακριβώς, παρά μόνο με την χρήση διαστημάτων εμπιστοσύνης.

2.1.1.1 Προσέγγιση παραμέτρων με χρήση του Excel

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του γραμμικού προτύπου της σχέσης (1.1) ακολουθούνται τα εξής βήματα σε ένα φύλλο Excel² :

- i. Καταγραφή των τιμών της ανεξάρτητης μεταβλητής x στην 1^η στήλη και των αντίστοιχων τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής στην 2^η στήλη
- ii. Σε κενό κελί εισάγεται η συνάρτηση " $=slope(B_1 : B_n, A_1 : A_n)$ ". Ο αριθμός που θα προκύψει αποτελεί την παράμετρο A του γραμμικού προτύπου
- iii. Σε κενό κελί εισάγεται η συνάρτηση " $=intercept(B_1 : B_n, A_1 : A_n)$ ". Ο αριθμός που προκύπτει αποτελεί την παράμετρο B_0 του προτύπου.

2.1.1.2 Προσέγγιση παραμέτρων με χρήση του MINITAB

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων ακολουθούνται τα εξής βήματα στο MINITAB:

- i. Πληκτρολόγηση στην στήλη C1: «Predictor X» τις τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής
- ii. Πληκτρολόγηση στην στήλη C2: «Response Y» τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής
- iii. Επιλογή Stat->Regression->Regression
- iv. Response-> επιλογή της συνονόματης στήλης και Predictors-> αντίστοιχα επιλογή της C2.
- v. Ok

Ο πίνακας αποτελεσμάτων δίνει πολλά δεδομένα μεταξύ των οποίων την ευθεία παλινδρόμησης, τις παραμέτρους κατά μέση τιμή και τις τυπικές τους αποκλίσεις και γραφική αναπαράσταση της προσαρμοσμένης ευθείας και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της. $\pi X.X$.

² Αφορά την έκδοση Microsoft Excel 2021

2.1.2 Μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Όπως και η Μέθοδος Ελάχιστων Τετραγώνων έτσι και η Μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας αποσκοπεί στην εκτίμηση παραμέτρων, όταν υπάρχουν δεδομένες τιμές από έναν πληθυσμό. Αποτελεί μία από τις γνωστότερες μεθόδους εύρεσης σημειοεκτιμητών και οδηγεί σε εκτιμήτριες μεγάλης αποτελεσματικότητας, όταν χρησιμοποιούνται μεγάλα δείγματα (παραπάνω από 20). Μάλιστα όσο ο αριθμός των δειγμάτων τείνει στο άπειρο τόσο η εκτιμήτρια της αναζητούμενης παραμέτρου πλησιάζει την αμεροληψία. Η Μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας εκτιμά την ζητούμενη παράμετρο μεγιστοποιώντας τη συνάρτηση πιθανοφάνειας.

Έστω x_1, x_2, \dots, x_n οι δεδομένες τιμές από έναν πληθυσμό με συγκεκριμένη κατανομή, έστω συνεχής, και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(x, \beta)$, όπου β η ζητούμενη παράμετρος. Τότε η συνάρτηση πιθανοφάνειας της παραμέτρου β δίνεται από τον τύπο

$$L(\beta, x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \beta) \quad (1.2)$$

Η μέθοδος επιλέγει την τιμή της παραμέτρου β , η οποία έχει την καλύτερη συμβατότητα με τα δεδομένα, δηλαδή την τιμή που μεγιστοποιεί την συνάρτηση (1.2). Συνεπώς, υπολογίζεται η πρώτη παράγωγος της (1.2) και εξισώνεται με το μηδέν. Η προκύπτουσα τιμή του β είναι η ζητούμενη.

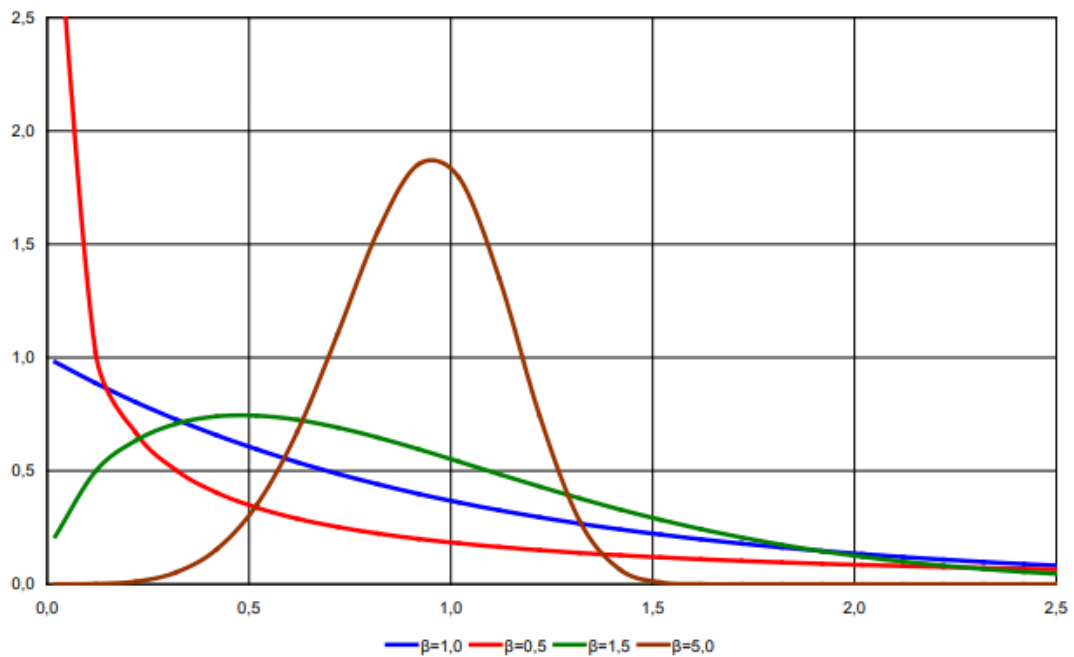
2.1.3 Κατανομή Weibull

Η κατανομή Weibull αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα και συνηθέστερα εργαλεία στον υπολογισμό της αξιοπιστίας και καταπόνησης και στον έλεγχο μακροβιότητας εξαρτημάτων. Η ανάλυση λειτουργεί ακόμη και με μικρά δείγματα ή ακόμα και με μηδενικό αριθμό αστοχιών. Για αυτό τον λόγο και επιλέχθηκε για την μελέτη επικινδυνότητας που θα παρουσιαστεί στην παρούσα εργασία. Η συνεχής τ.μ. X ακολουθεί τη κατανομή Weibull, δηλαδή $X \sim WEI(\beta, \eta, \gamma)$, όταν η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της είναι

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^\beta}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

όπου β είναι η παράμετρος μορφής, η είναι η παράμετρος κλίμακας και γ είναι η παράμετρος θέσης. Πιο συγκεκριμένα η μορφή της γραφικής παράστασης της σ.π.π αλλάζει δραματικά ανάλογα με τις τιμές της παραμέτρου μορφής β , όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2. Επίσης η παράμετρος θέσης στην συγκεκριμένη μελέτη θα εκφράζει τον χρόνο έναρξης αστοχιών, ο οποίος θα ξεκινάει από το μηδέν. Επομένως, αυτομάτως η μελετώμενη κατανομή θα γίνει 2 παραμέτρων και το $\gamma=0$. Δηλαδή η σχέση (1.7) γίνεται

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{\eta^\beta} x^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\eta} \right)^\beta}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (1.8)$$



Εικόνα 2: Γραφική παράσταση σ.π.π κατανομής Weibull 2 παραμέτρων με $\eta=1$ για διάφορες τιμές β .

Επιπλέον η αθροιστική συνάρτησης της κατανομής είναι

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^\beta}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

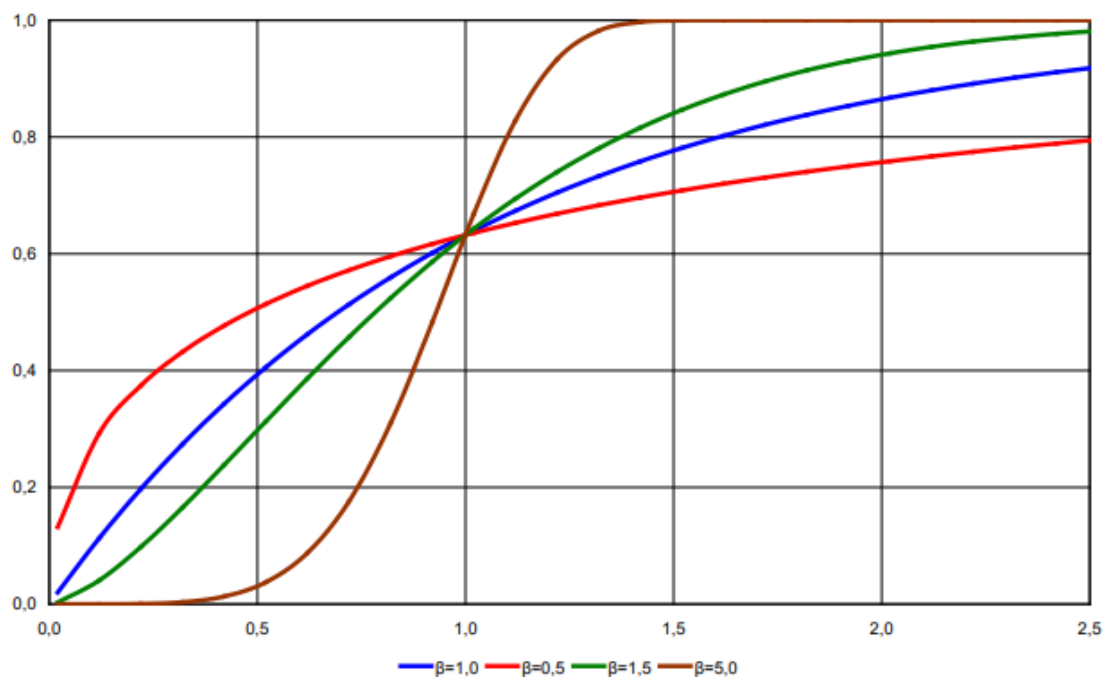
Και σε αυτή τη συνάρτηση η μεταβολή των τιμών της παραμέτρου β , επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την μορφή της γραφικής παράστασης της αθροιστικής

συνάρτησης, ενώ το ίδιο ισχύει και για την γραφική παράσταση της συνάρτησης κινδύνου, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 3 και 4. Ο ρυθμός αποτυχίας/ αστοχίας ή η συνάρτηση κινδύνου της κατανομής Weibull δίνεται από τον τύπο:

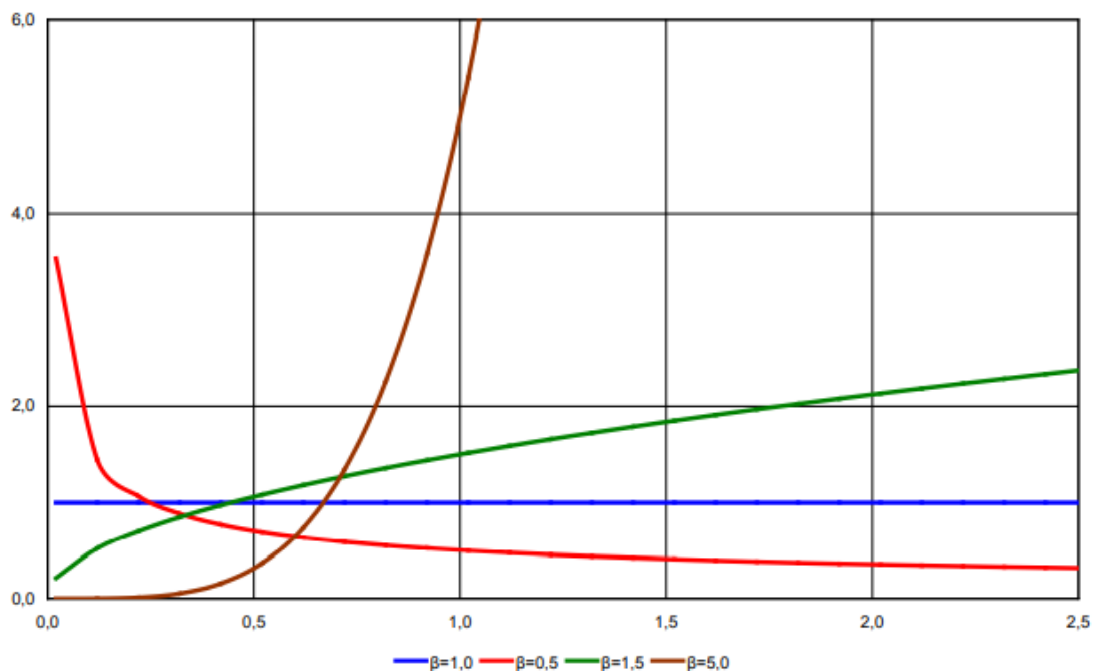
$$h(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}, x > 0 \quad (1.10)$$

ο οποίος ορίζεται μόνο για θετικές τιμές της τ.μ. X αφού πρόκειται για χρόνο.

Από τις μορφές όλων των γραφικών παραστάσεων γίνεται προφανές ότι η προσαρμογή των καμπύλων στα εκάστοτε κάθε φορά δεδομένων, αλλά και η σύγκριση τους είναι αρκετά δύσκολη. Μια απλούστευση των διαγραμμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί έπειτα από μια σειρά μετατροπών των συναρτήσεων και αλλαγής των συντεταγμένων των αξόνων των διαγραμμάτων. Σε αυτό το σημείο γίνεται η σύνδεση της Μεθόδου των Ελάχιστων Τετραγώνων ή/και της Μεθόδου Μέγιστης Πιθανοφάνειας με την μελέτη.



Εικόνα 3: Γραφική παράσταση α.σ.π.π κατανομής Weibull 2 παραμέτρων με $\eta=1$ για διάφορα β .



Εικόνα 4: Γραφική παράσταση συνάρτησης κινδύνου με $\eta=1$ για διάφορες τιμές του β .

2.2 Εκτίμηση Επικινδυνότητας

Οι αποφάσεις που κάθε φορά οφείλει να λάβει η διοίκηση του οργανισμού απορρέουν από τον κίνδυνο σε σχέση με το αναμενόμενο κέρδος. Η Διαχείριση Επικινδυνότητας αποσκοπεί στην επίτευξη ασφάλειας πτήσεων και εδάφους, επικεντρώνοντας τις προσπάθειες και την προσοχή του οργανισμού στους κινδύνους που ελλοχεύουν τις δυσμενέστερες συνέπειες. Νοείται επίσης, ως ο προσδιορισμός, η ανάλυση και η μείωση σε αποδεκτό επίπεδο (ή ιδανικά η αποβολή) των κινδύνων και των επακόλουθων συνεπειών τους, οι οποίοι υπονομεύουν την αποτελεσματικότητα του οργανισμού. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο διαχείρισης επικινδυνότητας του NATO (ARAMP-1:2012) τα πέντε βασικά βήματα που αυτή ακολουθεί είναι:

- i. Σχεδιασμός Διαχείρισης Επικινδυνότητας (Risk Management Planning): Σχεδιάζονται οι απαιτούμενες ενέργειες διαχείρισης της επικινδυνότητας και καθορίζονται οι εμπλεκόμενοι φορείς.
- ii. Αναγνώριση κινδύνων (Risk Identification) Αναγνωρίζονται με την χρήση διάφορων μεθόδων οι κίνδυνοι και καταγράφονται.
- iii. Ανάλυση Επικινδυνότητας:

- Ποιοτική Ανάλυση Επικινδυνότητας (Qualitative Risk Analysis): Εκτιμώνται ποιοτικά και ιεραρχούνται οι κίνδυνοι. Η ανάλυση θα γίνει στο παρών υποκεφάλαιο.
 - Ποσοτική Ανάλυση Επικινδυνότητας (Quantitative Risk Analysis): Εκτιμάται ποσοτικά η επίδραση των κινδύνων, με χρήση των στατιστικών εργαλείων που αναλύθηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια.
- iv. Προσδιορισμός Μέτρων Αντιμετώπισης (Risk Response Planning): Αναπτύσσονται στρατηγικές αντιμετώπισης των κινδύνων, με σκοπό την εξάλειψη ή την επαρκή μείωση τους.
- v. Εφαρμογή, έλεγχος και ανατροφοδότηση επικινδυνότητας (Risk Monitoring and Control): Εφαρμόζεται το σχέδιο αντιμετώπισης και ταυτόχρονα παρακολουθείται η πορεία εξέλιξης των μελετώμενων κινδύνων. Με βάση τις παρατηρήσεις γίνονται τροποποιήσεις του αρχικού συστήματος.

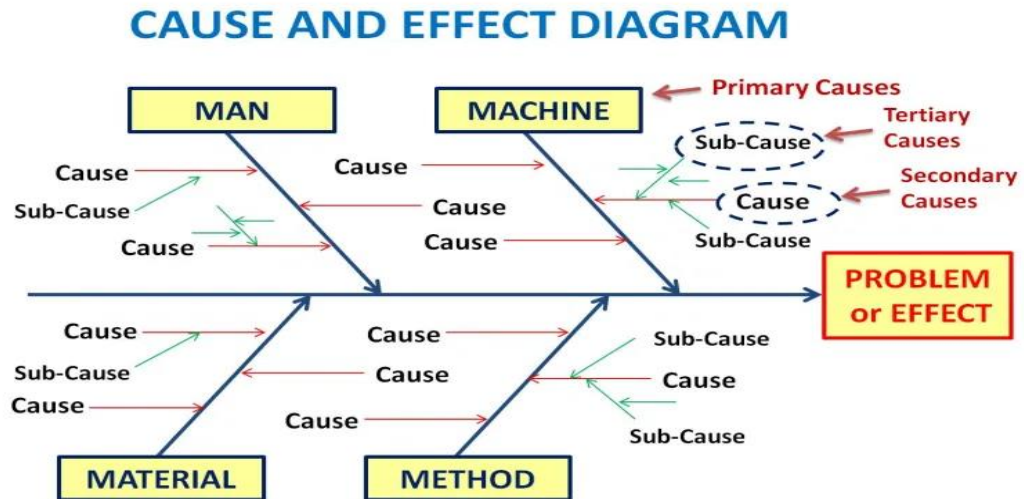
Η εκτίμηση επικινδυνότητας αφορά το 2^ο και 3^ο βήμα της Διαχείρισης Επικινδυνότητας, δηλαδή την αναγνώριση κινδύνων και την ανάλυση επικινδυνότητας, τα οποία αφορούν και το βασικό σκοπό της παρούσας εργασίας. Στα επόμενα υποκεφάλαια αναφέρονται στις γενικές αρχές και το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο των δύο σταδίων.

2.2.1 Αναγνώριση Κινδύνων

Η αναγνώριση κινδύνων ακολουθεί την λογική της αντίστροφης αναζήτησης. Δηλαδή από τις συνέπειες που εκδηλώνονται και μέσω των άμεσων και έμμεσων αιτιών εντοπίζεται το βασικό αίτιο. Πραγματοποιείται δηλαδή, η καταγραφή της αλυσίδας εκδήλωσης του κινδύνου, από το τέλος προς την αρχή, μέχρι την εύρεση της πηγής. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι αναγνώρισης κινδύνων με σημαντικότερες και συνηθέστερες τις ακόλουθες:

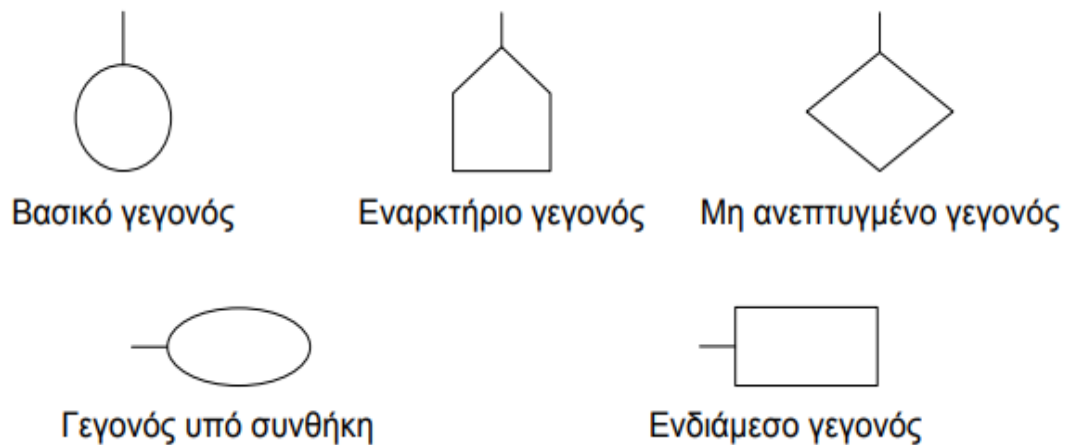
- i. “What if” Analysis: αποτελεί μια μέθοδο Brainstorming για την διατύπωση πιθανών αστοχιών. Έχει χαλαρή δομή, μπορεί να εφαρμοσθεί από όλους τους μελετητές με διαφορετικό υπόβαθρο και εμπειρία, ωστόσο η αποτελεσματικότητα της εξαρτάται από την εμπειρία και την κατάρτιση των εμπλεκομένων.

- ii. Διάγραμμα Αιτίου- Αποτελέσματος: Πρόκειται για το γνωστό Fishbone Diagram, όπου σκοπό έχει τον διαχωρισμό των αιτιών σε βασικές κατηγορίες και έπειτα την εύρεση επιμέρους αιτιών. Το πιο γνωστό Fishbone έχει ως βασικές κατηγορίες αιτιών τις μεθόδους, υλικά/πόρους, ανθρώπινο δυναμικό και εξοπλισμό και απεικονίζεται στην Εικόνα 5.

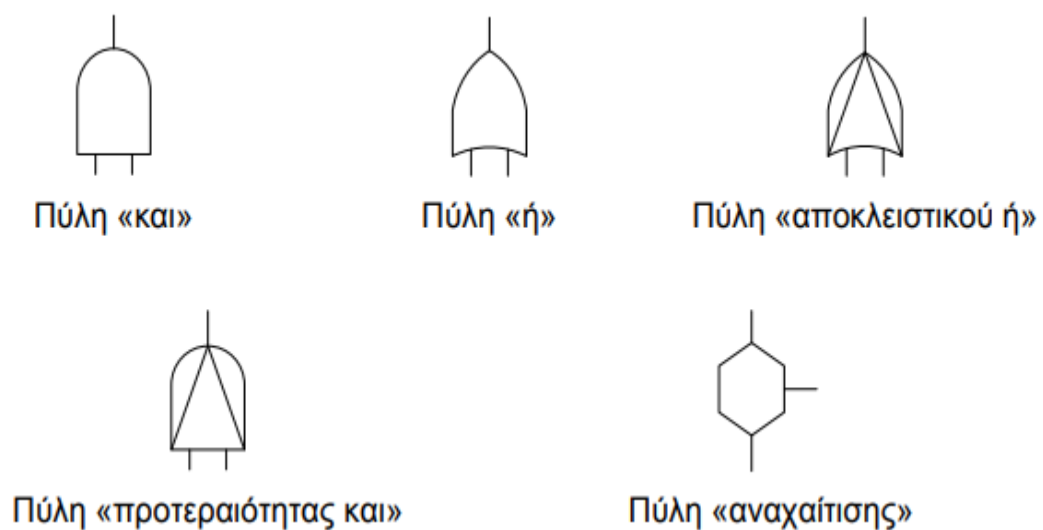


Εικόνα 5: Διάγραμμα Αιτίου-Αποτελέσματος

- iii. Δέντρο Σφαλμάτων (Fault Tree Analysis): Πρόκειται για μία ανάλυση συμπερασμάτων αστοχίας από την κορυφή προς τα κάτω (top to down), στην οποία μία ανεπιθύμητη κατάσταση ενός συστήματος αναλύεται, ώστε να συνδυάσει μία σειρά γεγονότων του χαμηλότερου επιπέδου χρησιμοποιώντας την λογική Boolean. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως από μηχανικούς αξιοπιστίας και υπεύθυνους ασφαλείας για τον καθορισμό της πιθανότητας πρόκλησης ενός ατυχήματος ή της αστοχίας ενός συστήματος σε συγκεκριμένο επίπεδο λειτουργίας. Για την κατασκευή ενός FTA χρησιμοποιούνται τα σύμβολα της άλγεβρας Boolean, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 6, μαζί με την ερμηνεία τους. Η σύνδεση των γεγονότων γίνεται με τα σύμβολα λογικής or , and κλπ τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 7. Ο σχεδιασμός ενός FTA είναι χρονοβόρος και πολύπλοκος, αλλά το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να περιγράψει αναλυτικά την σειρά και την αλληλεπίδραση γεγονότων, χωρίς την χρήση άλλης μεθόδου.



Εικόνα 6: Σύμβολα γεγονότων FTA



Εικόνα 7: Σύμβολα πυλών FTA

2.2.2 Ανάλυση Επικινδυνότητας

Ο προσδιορισμός της επικινδυνότητας βασίζεται στον συνδυασμό της πιθανότητας να λάβει χώρα ένα επικίνδυνο γεγονός και της σοβαρότητας των συνεπειών ή αλλιώς της δριμύτητας που δύναται να έχει ή είχε βάσει ιστορικών στοιχείων, το υπόψιν περιστατικό στο προσωπικό, το υλικό, τις εγκαταστάσεις ή το περιβάλλον. Ο προσδιορισμός της πιθανότητας και της δριμύτητας διεξάγεται τόσο με

ποσοτικές όσο και με ποιοτικές μεθόδους, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα κατά την χρονική στιγμή της εκτίμησης. Η πιθανότητα και η δριμύτητα του επικινδύνου γεγονότος διαχωρίζονται σε κατηγορίες (μικρή, μέτρια, μεγάλη, υψηλή) σε αντιστοιχία με τα επίπεδα επικινδυνότητας. Αφού υπολογισθούν και τα δύο μεγέθη η επικινδυνότητα υπολογίζεται ποιοτικά (εκτιμάται) σύμφωνα με το Εγχειρίδιο ΣΥΑ/ΥΠΕΘΑ 2007 με την χρήση του εξής 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 1: Πίνακας ΣΥΑ/ΥΠΕΘΑ περί εκτίμησης επικινδυνότητας

Τα επίπεδα επικινδυνότητας του πίνακα αντιστοιχούν στα εξής:

- Υψηλή Επικινδυνότητα (Α): Μη αποδεκτή επικινδυνότητα: Απαιτείται άμεση διακοπή της δραστηριότητας, εφόσον δεν δύναται να εφαρμοσθούν άμεσα μέτρα ελέγχου.
- Μεγάλη Επικινδυνότητα (Β): Μη αποδεκτή επικινδυνότητα: Άμεση εφαρμογή μέτρων ελέγχου για την μείωση της επικινδυνότητας, χωρίς τη διακοπή της διεργασίας.
- Μέτρια Επικινδυνότητα (Γ): Ανεκτή επικινδυνότητα: Συνεχής παρακολούθηση της διεργασίας, ή / και εφαρμογή μέτρων για περαιτέρω μείωση της επικινδυνότητας εφόσον δεν έχει δυσανάλογο κόστος (τόσο σε χρόνο όσο και σε χρήμα)
- Μικρή Επικινδυνότητα (Δ): Αποδεκτή επικινδυνότητα: Εξασφάλιση της παραμονής της επικινδυνότητας σε αυτό το επίπεδο, χωρίς να είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων.

Ακολουθεί ο υπολογισμός πιθανότητας και δριμύτητας.

2.2.2.1 Υπολογισμός Πιθανότητας

Η πιθανότητα ενός κινδύνου ή μιας αστοχίας, κατά την εκτίμηση επικινδυνότητας, ορίζεται ως η συχνότητα εμφάνισης αυτού του κινδύνου/αστοχίας σε ανεξάρτητα γεγονότα στο παρελθόν. Ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, αλλά και το χρονικό περιθώριο που ορίζει κάθε φορά η μελέτη, ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας μπορεί να υπολογισθεί με την χρήση στατιστικών εργαλείων, όπως των κατανομών που αναλύθηκαν σε προηγούμενα υποκεφάλαια (π.χ. κατανομή Weibull). Σε περίπτωση που τα στοιχεία είναι ελλιπή, λόγω απουσίας παλαιότερων στοιχείων ή λανθασμένων αναφορών, είτε ο χρόνος είναι πολύ περιορισμένος, η πιθανότητα μπορεί να εκτιμηθεί ποιοτικά από εμπειρογνώμονες.

Αφού γίνει ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας, αυτή αξιολογείται ως μικρή, μέτρια, μεγάλη ή υψηλή σύμφωνα με τον Πίνακα 3, όπως αυτός ορίζεται στην ενότητα «Εκτίμηση Επικινδυνότητας» του εγχειριδίου ΣΥΑ/ΥΠΕΘΑ. Στον πίνακα ο διαχωρισμός των κατηγοριών της πιθανότητας δεν περιορίζεται μόνο στα έτη εκμετάλλευσης³, αντιθέτως έχει γίνει βάσει του τρόπου έκθεσης στον κίνδυνο που έχει ένα αεροπορικό υλικό, δηλαδή ώρες πτήσεις, ώρες λειτουργίας, πραγματικές ή συνολικές προσγειώσεις, εκκινήσεις και έξοδοι.⁴

³ Αρχική φιλοσοφία του εγχειριδίου

⁴ Η μετατροπή των ετών εκμετάλλευσης στις υπόλοιπες μονάδες μέτρησης επιλέχθηκε να γίνει αναλογικά.

Μονάδα μέτρησης Εκμετάλλευσης	Πιθανότητα			
	Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη	Υψηλή
Έτη Εκμετάλλευσης	<1/10 ΕΤΗ	≥1/10 ΕΤΗ και <1/5 ΕΤΗ	≥1/5 ΕΤΗ και <4/5 ΕΤΗ	≥4/5 ΕΤΗ
Ώρες Πτήσης	<1/ΩΠ 10ετίας	≥1/ΩΠ 10ετίας και <1/ΩΠ 5ετίας	≥1/ΩΠ 5ετίας και <4/ΩΠ 5ετίας	≥4/ΩΠ 5ετίας
Ώρες Λειτουργίας	<1/ΩΛ 10ετίας	≥1/ΩΛ 10ετίας και <1/ΩΛ 5ετίας	≥1/ΩΛ 5ετίας και <4/ΩΛ 5ετίας	≥4/ΩΛ 5ετίας
Αριθμός Εκκινήσεων	<1/ΕΚ 10ετίας	≥1/ΕΚ 10ετίας και <1/ΕΚ 5ετίας	≥1/ΕΚ 5ετίας και <4/ΕΚ 5ετίας	≥4/ΕΚ 5ετίας
Αριθμός Εξόδων	<1/ΕΞ 10ετίας	≥1/ΕΞ 10ετίας και <1/ΕΞ 5ετίας	≥1/ΕΞ 5ετίας και <4/ΕΞ 5ετίας	≥4/ΕΞ 5ετίας
Πραγματικές Προσγειώσεις	<1/(R)ΠΓ 10ετίας	≥1/(R)ΠΓ 10ετίας και <1/(R)ΠΓ 5ετίας	≥1/(R)ΠΓ 5ετίας και <4/(R)ΠΓ 5ετίας	≥4/(R)ΠΓ 5ετίας
Συνολικές Προσγειώσεις	<1/(T)ΠΓ 10ετίας	≥1/(T)ΠΓ 10ετίας και <1/(T)ΠΓ 5ετίας	≥1/(T)ΠΓ 5ετίας και <4/(T)ΠΓ 5ετίας	≥4/(T)ΠΓ 5ετίας

Πίνακας 2: Αξιολόγηση Πιθανότητας βασισμένη στο ΣΥΑ/ΥΠΕΘΑ

2.2.2.2 Υπολογισμός Δριμύτητας

Ως δριμύτητα ορίζεται το μέγεθος της καραστροφής ή της βλάβης που σύναται να δημιουργήσει ένας κίνδυνος. Η δριμύτητα κατηγοριοποιείται σε τέσσερεις γενικές κατηγορίες:

- Υψηλή: οι συνθήκες λειτουργίες είναι τέτοιες που το ανθρώπινο λάθος ή το περιβάλλον ή οποιαδήποτε άλλη παρέμβαση μπορεί να οδηγήσει σε θάνατος ή/και σοβαρή απώλεια του συστήματος.
- Μεγάλη: οι συνθήκες λειτουργίες είναι τέτοιες που το ανθρώπινο λάθος ή το περιβάλλον ή οποιαδήποτε άλλη παρέμβαση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρό τραυματισμό ή ασθένεια ή/και σημαντική βλάβη του συστήματος που απαιτεί άμεση διορθωτική ενέργεια.

- iii. Μεσαία: οι συνθήκες λειτουργίες είναι τέτοιες που το ανθρώπινο λάθος ή το περιβάλλον ή οποιαδήποτε άλλη παρέμβαση μπορούν να ελεγχθούν και αντιμετωπιστούν χωρίς να προκληθεί σοβαρός τραυματισμός ή βλάβη του συστήματος.
- iv. Μικρή: Δεν τίθεται κίνδυνος τραυματισμού ή βλάβης.⁵

Ο υπολογισμός της δριμύτητας έγκειται στην αξιολόγηση των συνεπειών σε περίπτωση εμφάνισης της εν λόγω αστοχίας, βάσει των διαθέσιμων ιστορικών στοιχείων. Η αξιολόγηση της δριμύτητας της αστοχίας αφορά τόσο τις υλικές συνέπειες, οι οποίες μεταφράζονται σε κόστος για τον οργανισμό, όσο και τους τραυματισμούς του προσωπικού, οι οποίοι μεταφράζονται σε χρόνο αποχής από την εργασία ή/ και σε σοβαρές περιπτώσεις ως ποσοστό αναπηρίας. Οι υλικές συνέπειες περιλαμβάνουν όλους τους τομείς ενδιαφέροντος της εταιρίας, δηλαδή εκτός από τον εξοπλισμό, τα υλικά και τις υποδομές, αφορά επίσης την αποκατάσταση του περιβάλλοντος, παροχή αποζημιώσεων κλπ. Μάλιστα, ομοίως με τον υπολογισμό της πιθανότητας, η δριμύτητα αξιολογείται ως μικρή, μέτρια, μεγάλη ή υψηλή, βάσει του Πίνακα 4. Ο Πίνακας 4 αντλήθηκε από το εγχειρίδιο ΣΥΑ/ΚΕΑΠΕ (Κέντρο Ασφαλείας Πτήσεων και Εδάφους)⁶ και προσαρμόστηκε στα δεδομένα της εργασίας.

Κριτήρια	Δριμύτητα			
	Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη	Υψηλή
Συνολικό κόστος (€) (Σύστημα, εξοπλισμός, Υλικά, Υποδομές, Περιβάλλον)	≤20.000	>20.000 και ≤500.000	>500.000 και ≤2.000.000	≥2.000.000 (απώλεια ή καταστροφή μείζονος συστήματος)
Τραυματισμός Προσωπικού	Απουσία 5- 9 εργάσιμες ημέρες ή προσωρινής φύσεως περιορισμοί στην εργασία	Απουσία >10 εργάσιμες ημέρες ή μόνιμος περιορισμός στην φύση της εργασίας	Σοβαρός τραυματισμός ή μόνιμη μερική αναπηρία	Θάνατος τραυματισμός ή ασθένεια ή μόνιμη ολική ανικανότητα/αναπηρία

Πίνακας 3: Αξιολόγηση δριμύτητας βάσει ΣΥΑ/ΚΕΑΠΕ

⁵ Snyder, 2018

⁶ Η χρήση του συγκεκριμένου εγχειριδίου επιλέχθηκε λόγω της άμεσης προσβασιμότητας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις και κυρίως στον τομέα της εξυπηρέτησης και συντήρησης αεροσκαφών , μία αστοχία έχει συνέπειες και στις δύο κατηγορίες.

2.2.2.2.1 Ταυτόχρονη επίδραση σε κόστος και προσωπικό

Όταν υπάρχει ταυτόχρονη επίδραση τόσο σε κόστος όσο και σε ανθρώπινο τραυματισμό και οι επιμέρους δριμύτητες έχουν αξιολογηθεί, τότε ως συνολική δριμύτητα λαμβάνεται η δυσμενέστερη εκ των δύο.

Για παράδειγμα, έστω η αστοχία μιας σωλήνας υψηλής πίεσης καυσίμου κοστολογήθηκε σε 300.000€ για την αντικατάστασή της, τις εργατοώρες, το ποσό καυσίμου που χάθηκε και τις ζημιές στα γειτονικά συστήματα που επηρέασε η αστοχία. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4 η δριμύτητα λόγω κόστους χαρακτηρίζεται «Μεσαία». Παράλληλα, η αστοχία προκάλεσε τον σοβαρό τραυματισμό ενός τεχνικού του προσωπικού συντήρησης. Επομένως η δριμύτητα λόγω τραυματισμού αξιολογείται ως «Μεγάλη». Τελικά, η δριμύτητα της συγκεκριμένης αστοχίας χαρακτηρίζεται ως «Μεγάλη», αφού επιλέγεται η δυσμενέστερη εκ των δύο.

2.2.2.2.2 Πολλαπλές περιπτώσεις ίδιας αστοχίας- Κόστος

Υπάρχει περίπτωση στα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία της εταιρίας να υπάρχουν παραπάνω από μία περιπτώσεις εμφάνισης μίας συγκεκριμένης αστοχίας με διαφορετικές κάθε φορά επιπτώσεις όσον αφορά το υλικό κόστος. Τότε υπολογίζεται ο μέσος όρος των κοστών που δαπανήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις και η δριμύτητα αξιολογείται με βάση το τελικό αποτέλεσμα.

Για παράδειγμα, έστω ότι υπήρξαν τέσσερα περιστατικά αστοχίας ενός πτερυγίου της πρώτης βαθμίδας του συμπιεστή του αεροκινητήρα. Οι ζημιές που προκλήθηκαν σε κάθε μία εκ των περιπτώσεων ανέρχονταν σε 75.000€, 10.000€, 130.000€ και καμία υλική ζημία στην τελευταία περίπτωση. Επομένως η δριμύτητα θα αξιολογηθεί βάσει του μέσου κόστους:

$$(75.000+10.000+130.000+0)/4=53.750\text{€}$$

Με βάση τον Πίνακα 4 η δριμύτητα της αστοχίας ενός τέτοιου πτερυγίου είναι «Μεσαία».

2.2.2.2.3 Πολλαπλές περιπτώσεις ίδιας αστοχίας- Τραυματισμός

Εδώ πρόκειται για την περίπτωση που η ίδια αστοχία έχει προκαλέσει διαφορετικού επιπέδου συνέπειες στο προσωπικό κάθε φορά που είχε καταγραφεί. Η

δριμύτητα αυτή τη φορά δεν εκτιμάται βάσει του μέσου όρου των επιμέρους συνεπειών, αλλά με βάση τη δυσμενέστερη περίπτωση.

Για παράδειγμα τα τελευταία 20 χρόνια καταγράφηκαν τρία περιστατικά απώλειας ισχύος της συσκευής πλήρωσης υδραυλικού. Οι δύο πρώτες περιπτώσεις προκάλεσαν μικρούς τραυματισμούς στο εμπλεκόμενο προσωπικό, το οποίο έλαβε μία εβδομάδα αναρρωτική άδεια. Άρα οι δύο πρώτες περιπτώσεις εμπίπτουν στην κατηγορία «Μικρή» δριμύτητα. Ωστόσο η πιο πρόσφατη περίπτωση αστοχίας της συσκευής προκάλεσε σοβαρό τραυματισμό ενός τεχνικού, με αποτέλεσμα την χορήγηση αναρρωτικής άδεια 2 μηνών και στην συνέχεια την απασχόληση του μόνο σε θέσεις γραφείου. Η δριμύτητα σε αυτό το περιστατικό αξιολογείται ως «Μεσαία». Άρα η δριμύτητα της αστοχίας: «Απώλεια ισχύος συσκευής πλήρωσης υδραυλικού» είναι «Μεσαία».

Είναι προφανές πως στη συνδυαστική περίπτωση πολλαπλών περιστατικών με διαφορετικές υλικές ζημιές και τραυματισμούς θα ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

- i. Υπολογισμός του μέσου όρου των υλικών κοστών όλων των περιπτώσεων και αξιολόγηση δριμύτητας κόστους.
- ii. Αξιολόγηση δριμύτητας τραυματισμών βάσει της δυσμενέστερης περίπτωσης τραυματισμού.
- iii. Υπολογισμός δριμύτητας αστοχίας βάσει της δυσμενέστερης εκ των δύο επιμέρους αστοχιών.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Μεθοδολογία Μελέτης Επικινδυνότητας

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν κατά σειρά τα βήματα που ακολουθούνται για την διεξαγωγή μίας μελέτης επικινδυνότητας για την παράταση του ορίου ζωής ενός αεροπορικού υλικού. Η διεξαγωγή και τα αποτελέσματα της μελέτης θα βασιστούν στις κατανομές και τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο πρώτο και δεύτερο κεφάλαιο.⁷

3.1 Συλλογή Δεδομένων

Για τη διεξαγωγή μιας μελέτης επικινδυνότητας καθοριστικής σημασίας είναι ο υπεύθυνος μελετητής να κατέχει επαρκή γνώση του υπό εξέταση συστήματος και να βρίσκεται στην διάθεση του η τεχνική βιβλιογραφία. Πριν την έναρξη της μελέτης, για την συλλογή των δεδομένων αρχικά ορίζεται ο υπό μελέτη πληθυσμός. Έπειτα, αφού πρόκειται να μελετηθεί η πιθανότητα αστοχίας του πληθυσμού, συλλέγονται τα ιστορικά στοιχεία εμφάνισης κινδύνου του υπό μελέτη υλικού σε επίπεδο οργανισμού. Στην περίπτωση που κριθεί ότι τα στοιχεία του οργανισμού/ εταιρίας είναι ελλιπή ή ανεπαρκή, τότε μπορούν στην μελέτη να συμπεριληφθούν και ιστορικά στοιχεία αστοχίας άλλου χρήστη του συγκεκριμένου υλικού. Τέλος, συγκεντρώνονται από τα μητρώα των υλικών του υπό μελέτη πληθυσμού όλα τα στοιχεία συντήρησης και λειτουργίας, δηλαδή οι ώρες λειτουργίας, η τοποθεσία του υλικού, οι επιθεωρήσεις κλπ.

Κατά την έναρξη της ανάλυσης των δεδομένων, πρέπει να ορισθεί η τυχαία μεταβλητή ενδιαφέροντος, δηλαδή ο χρόνος στον οποίο αναμένεται η εμφάνιση αστοχίας. Επομένως η τυχαία μεταβλητή είναι ο χρόνος/διάρκεια ζωής ή λειτουργίας του υπό μελέτη υλικού. Η έναρξη μέτρησης του χρόνου ζωής ενός υλικού συνήθως είναι η έναρξη λειτουργίας του, ενώ σπανιότερα ως έναρξη λογίζεται και η λειτουργία έπειτα από την γενική επισκευή (overhaul) του εξαρτήματος. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην συγκεκριμένη εργασία η έναρξη της διάρκειας ζωής θα ταυτίζεται με την έναρξη λειτουργίας, ώστε η σ.π.π Weibull να

⁷ Ball, 2012

εξαρτάται από δύο μεταβλητές. Στο σημείο αυτό τέλος, απαιτείται να προσδιορισθεί η μονάδα μέτρησης του χρόνου που εκφράζει την κόπωση του υλικού και δυνητικά μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία. Οι συνηθέστερες μονάδες, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν και στην παρούσα εργασία, είναι οι ώρες πτήσεις, οι ώρες λειτουργίας και οι κύκλοι κόπωσης όπως οι εκκινήσεις, οι προσγειώσεις κλπ.

Για την σωστή άντληση και κατάταξη των δεδομένων επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός της βλάβης ή του μηχανισμού αστοχίας που μελετάται. Η κατηγοριοποίηση του πληθυσμού ανά παράγοντα αστοχίας γίνεται με καταγραφή των δεδομένων σε πίνακα με συγκεκριμένη στήλη παρατηρήσεων για την κατάσταση του υλικού («εν ενεργεία» ή «αστοχία λόγω...»). Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο, καθώς η μέθοδος Weibull μπορεί να εφαρμοστεί για έναν μηχανισμό αστοχίας την φορά. Συνεπώς, εάν για τον πληθυσμό κριθεί σημαντική η επίδραση παραπάνω από ενός παράγοντα αστοχίας, τότε η ανάλυση πρέπει να επαναληφθεί για τον καθένα ξεχωριστά.

Αφού γίνει σαφής ο μηχανισμός αστοχίας που θα μελετηθεί, πρέπει να ορισθεί και το εύρος των τιμών που διαχωρίζουν την κατάσταση «εν ενεργεία» από την κατάσταση «αστοχία». Για την καλύτερη κατανόηση αυτού του βήματος παρουσιάζονται δύο παραδείγματα. Το πρώτο παράδειγμα αφορά την μελέτη των πτερυγίων της 1^{ης} βαθμίδας του συμπιεστή, όπου ως μηχανισμός αστοχίας έχει ορισθεί η ρωγμή, πρέπει να γίνει σαφές το μήκος της ρωγμής από το οποίο και μετά το πτερύγιο εμπίπτει στην κατηγορία «αστοχία». Το δεύτερο παράδειγμα αφορά την μελέτη των ταχυμετρικών γεννητριών των τροχών, όπου ο μηχανισμός αστοχίας είναι η τάση του ηλεκτρικού ρεύματος, πρέπει να ορισθεί σαφώς το εύρος των τιμών διαφοράς δυναμικού εκτός του οποίου το υλικό εμπίπτει στην κατηγορία «αστοχία».

Τελευταίο στάδιο της συλλογής των δεδομένων για τον υπό μελέτη πληθυσμό είναι η συλλογή όλων των χρόνων λειτουργίας (ή της αντίστοιχης μονάδας κοπώσεως που έχει επιλεγεί). Οι χρόνοι λειτουργίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- i. Ο χρόνος λειτουργίας να ταυτίζεται με τον χρόνο αστοχίας (σε ώρες πτήσεις, ώρες λειτουργίας, εκκινήσεις κλπ), για τα εξαρτήματα του πληθυσμού που ανήκουν στην κατηγορία «αστοχία» .
- ii. Ο χρόνος λειτουργίας δεν ταυτίζεται με τον χρόνο αστοχίας, διότι το εξάρτημα ανήκει στην κατηγορία «εν ενεργεία» και συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά κατά την διάρκεια διεξαγωγής της μελέτης. Στην περίπτωση αυτή ως χρόνος

λειτουργίας ορίζεται η τιμή κόπωσης που είχε το εξάρτημα κατά την έναρξη της μελέτης και η οποιαδήποτε παράταση του ορίου λειτουργίας του ξεκινά να μετρά από την συγκεκριμένη τιμή κοπώσεως.

Κατά την συλλογή, επομένως, των δεδομένων τα δύο είδη των χρόνων λειτουργίας των ανωτέρω περιπτώσεων διαχωρίζονται. Ο χρόνος αστοχίας θα συμβολίζεται με F (Failure) , ενώ για τα εξαρτήματα, που δεν έχει επέλθει αστοχία και λειτουργούν κανονικά, ο χρόνος λειτουργίας θα συμβολίζεται με S (Suspension). Είναι σημαντικό για την διεξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων, η μελέτη να περιλαμβάνει το σύνολο των δεδομένων. Οι χρόνοι λειτουργίας των εξαρτημάτων που ακόμα δεν έχουν αστοχήσει, αποτελούν την τμηματική πληροφορία. Για να προσδιοριστεί ένας συγκεκριμένο διάστημα στο οποίο αναμένεται να αστοχήσουν αυτά τα εξαρτήματα, πρέπει να διατίθενται και οι χρόνοι των εξαρτημάτων που αστόχησαν, οι οποίοι αποτελούν την πλήρη πληροφορία. Για παράδειγμα, έστω ότι για ένα υλικό έχει συγκεντρωθεί πληθυσμός 50 διαφορετικών αριθμών σειράς (Serial Number -S/N) και ένα από αυτά τα S/N είναι εξάρτημα «εν ενεργεία» και ο χρόνος λειτουργίας του κατά την έναρξη της μελέτης είναι $S=800$ ΩΠ. Αυτό το δεδομένο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για το συγκεκριμένο S/N ο χρόνος λειτουργίας του μέχρι την αστοχία είναι σίγουρα μεγαλύτερος από $800\Omega\P$. Η πληροφορία αυτή επηρεάζει σημαντικά την τελική εκτίμηση, γιατί και είναι απαραίτητο όλα τα δεδομένα να συμπεριλαμβάνονται στην μελέτη.

Τέλος, ο πίνακας με τον συνολικό αριθμό των S/N του υπό μελέτη εξαρτήματος και τους καταγεγραμμένους χρόνους αστοχίας ή λειτουργίας, θα πρέπει να συμπληρωθεί με μια επιπλέον στήλη, όπου θα κατηγοριοποιεί εκ νέου τα τεμάχια με βάση χαρακτηριστικά που ενδεχομένως να επηρεάζουν τον μηχανισμό αστοχίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι διαφορετικοί Αριθμοί Ονομαστικό (Part Number-P/N) που μπορεί να αποκτήσει το υλικό με την πάροδο του χρόνου, το διαφορετικό περιβάλλον λειτουργίας κυρίως στις περιπτώσεις όπου μελετάται η διάβρωση (π.χ. εγγύτητα στην θάλασσα), το διαφορετικό επίπεδο συντήρησης που έχει υποβληθεί το υλικό (π.χ. συντήρηση 1^{ου} Βαθμού, εργοστασιακή συντήρηση) κλπ.

3.2 Υπολογισμός και Ερμηνεία Παραμέτρων Weibull

Αφού συγκεντρωθούν τα δεδομένα, τα οποία αφορούν το κάθε υλικό ξεχωριστά, απαραίτητη ενέργεια για τη σωστή αξιολόγηση και ερμηνεία τους, είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων Weibull. Τόσο η παράμετρος κλίμακας η όσο και η παράμετρος σχήματος β , δίνουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά τον χρόνο αναμενόμενης αστοχίας και τον ρυθμό εξέλιξης της. Ωστόσο για τον υπολογισμό τους προηγείται ο υπολογισμός της αναμενόμενης πιθανότητας αστοχίας.

3.2.1 Υπολογισμός Αθροιστικής Πιθανότητας Αστοχίας

Ο υπολογισμός της πιθανότητας $F(t_i)$, σε χρόνο t_i όπου λαμβάνει χώρα η i -αστοχία σε πλήθος N υλικών, θα γίνει με τη χρήση της μεσοσταθμικής πιθανότητας. Τονίζεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί σε μία εκτίμηση της ζητούμενης πιθανότητας και όχι στην ακριβή πραγματική τιμή.

Η κατανομή των τιμών της πιθανότητας αστοχίας είναι διωνυμική κατανομή, αφού τα συμβάντα είναι διακριτά και υπάρχουν μόνο δύο περιπτώσεις: υλικό εν ενεργεία ή αστοχία υλικού. Επιπλέον, αφού η διωνυμική κατανομή είναι συμμετρική, η τιμή p που αντιστοιχεί στην μέγιστη πυκνότητα πιθανότητα είναι η $p=P=0,5$, η οποία αποτελεί την μεσοσταθμική τιμή της πιθανότητας αστοχίας. Επομένως, η πιθανότητα αστοχίας $F(t_i)$ αποτελεί την μεσοσταθμική πιθανότητα, όπου λαμβάνει χώρα η i -αστοχία σε ένα πλήθος N υλικών, με $p=50\%$. Τελικά η πιθανότητα αστοχίας $F(t_i) = Z$ αντιπροσωπεύοντας την πιθανότητα αστοχίας σε χρόνο t_i της i -αστοχίας, μπορεί να υπολογιστεί μέσω της αθροιστικής συνάρτησης της διωνυμικής κατανομής ως εξής:

$$P = \sum_{j=i}^N \binom{N}{j} Z^j (1-Z)^{(N-j)}$$

όπου i : ο αύξων αριθμός αστοχίας

N : το μέγεθος του δείγματος

P : η μεσοσταθμική τιμή της πιθανότητας αστοχίας, η οποία θα θεωρείται $P=0,5$.

Η επίλυση της ανωτέρω εξίσωσης είτε με χρήση του Excel με δοκιμές, είτε με χρήση του MINITAB δίνει τις τιμές της πιθανότητας $F(t)$ που απαιτούνται για το διάγραμμα Weibull. Για την καλύτερη κατανόηση του υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας,

γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων στο Παράρτημα Β: «Αριθμητική Εφαρμογή-Ήλοι Αεραγωγού», παράγραφος Π.Β.1 στο τέλος της εργασίας.

3.2.2 Χρήση Μεθόδου Ελάχιστων Τετραγώνων

Επόμενο βήμα μετά την εκτίμηση της αθροιστικής πιθανότητας αστοχίας είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων β και η της κατανομής Weibull. Ένας τρόπος εκτίμησης των δύο παραμέτρων είναι ο μετασχηματισμός της αθροιστικής συνάρτησης της κατανομής της σχέσης (1.9) στη μορφή του προτύπου απλής γραμμικής παλινδρόμησης και ακολούθως η εφαρμογή της μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων. Επομένως η σχέση (1.9) μετασχηματίζεται ως εξής:

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

ή έπειτα από πράξεις

$$\ln\left(\frac{1}{\ln(1-F(t))}\right) = \beta \ln t - \beta \ln \eta \quad (2.1)$$

Αντιστοιχίζοντας τώρα τους όρους του απλού γραμμικού προτύπου της σχέσης (1.1) με την σχέση (2.1), γίνεται η εξής συσχέτιση:

- $Y = \ln\left(\frac{1}{\ln(1-F(t))}\right)$
- $X = \ln t$
- $A = \beta$
- $B = -\beta \ln \eta$

Πριν γίνει η εφαρμογή της μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων μέσω MINITAB όπως περιεγράφηκε στην υποπαράγραφο 2.1.1.2 πρέπει να σημειωθεί πως στην γραμμική σχέση (2.1) η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η X , δηλαδή ο χρόνος αστοχίας, αφού αυτός είναι το ζητούμενο της ανάλυσης, και η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η Y . Οπότε στην εφαρμογή της μεθόδου, στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των τετραγώνων της απόστασης των σημείων ως προς τον X άξονα, δηλαδή η ελαχιστοποίηση της οριζόντιας απόστασης. Επομένως στη σχετική διαδικασία της υποπαραγράφου 2.1.1.2 στο MINITAB ως Response ονομάζεται και επιλέγεται η στήλη της X μεταβλητής ενώ στην επιλογή Predictors εισάγεται η στήλη της Y . Για την καλύτερη κατανόηση της

διαδικασίας, γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων στο Παράρτημα Β, παράγραφος Π.Β.2, στο τέλος της εργασίας

3.2.3 Χρήση Μεθόδου Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Ένας δεύτερος τρόπος εκτίμησης των παραμέτρων β και η της κατανομής Weibull, είναι με τη χρήση της Μεθόδου Μέγιστης Πιθανοφάνειας. Η μέθοδος αυτή σε αντίθεση με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων δεν προϋποθέτει την εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας $F(t)$, αλλά σύμφωνα με την υπό-ενότητα 2.1.2, μόνο την χρήση του τύπου (1.2). Στις περισσότερες μελέτες ωστόσο υπάρχουν πέρα από τα δεδομένα αστοχιών και ιστορικά στοιχεία/δεδομένα για S/N υλικών που δεν έχουν ακόμα αστοχήσει. Σε αυτή την περίπτωση ο τύπος (1.2) παίρνει την εξής μορφή:

$$L = \prod_{i=1}^r f(x_i) \prod_{j=1}^k (1 - F(T_j)) \quad (2.2)$$

όπου r : το πλήθος των υλικών που αστόχησαν

i : ο αύξων αριθμός της αστοχίας

x_i : ο χρόνος λειτουργίας των υλικών έως την αστοχία

f : η σ.π.π Weibull

k : το πλήθος των υλικών που δεν έχουν ακόμα αστοχήσει ως προς την μελετώμενη αστοχία

T_j : ο χρόνος λειτουργίας των υλικών που δεν έχουν αστοχήσει

Επομένως αντικαθιστώντας στην σχέση (2.2) τους τύπους της σ.π.π και της α.σ.π.π της κατανομής Weibull των τύπων (1.8) και (1.9) και εφαρμόζοντας της μέθοδο λογαρίθμισης που παρουσιάστηκε στην υπό-ενότητα 2.1.2, προκύπτουν οι εξής τύποι για τις εκτιμήτριες των συντελεστών:

$$\frac{\sum_{i=1}^r (x_i^\beta \ln x_i) + \sum_{j=1}^k (T_j^\beta \ln T_j)}{\sum_{i=1}^r x_i^\beta + \sum_{j=1}^k T_j^\beta} - \frac{1}{\beta} - \frac{\sum_{i=1}^r \ln x_i}{r} = 0 \quad (2.3)$$

$$\eta = \left(\frac{\sum_{i=1}^r x_i^\beta + \sum_{j=1}^k T_j^\beta}{r} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.4)$$

Είναι αντιληπτό πως για την επίλυση των παραπάνω τύπων είναι απαραίτητη η χρήση του Excel, η οποία παρουσιάζεται στην αριθμητική εφαρμογή του παραρτήματος. Ωστόσο ο υπολογισμός των παραμέτρων μπορεί να γίνει και με χρήση του MINITAB, ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- i. Καταγραφή όλων των χρόνων λειτουργίας και αστοχίας με αύξουσα σειρά στην 1^η στήλη
- ii. Εισαγωγή στην 2^η στήλη τον αριθμό 0 στους χρόνους λειτουργίας των υλικών και 1 για τους χρόνους αστοχίας
- iii. Stat->Reliability/Survival-> Distribution Analysis (Right Censoring)-> Parametric Distribution Analysis
- iv. Variables-> Εισαγωγή στήλης C1
- v. Επιλογή Censor->Using Censoring Columns-> Επιλογή στήλης C2
- vi. Censoring value-> 0
- vii. Ok.

3.2.4 Επιλογή Κατάλληλης Μεθόδου

Στις περισσότερες περιπτώσεις μελετών επικινδυνότητας τα αποτελέσματα των παραμέτρων με την χρήση των δύο μεθόδων είναι διαφορετικά. Επομένως, θα πρέπει κάθε φορά να χρησιμοποιείται η καταλληλότερη μέθοδος, ανά περίπτωση. Κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της εκάστοτε μελέτης επικινδυνότητας. Ορισμένα από αυτά είναι:

- Δυνατότητα γραφικής απεικόνισης: Η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων οδηγεί στην κατασκευή του απλού γραμμικού προτύπου (2.1) το οποίο εύκολα απεικονίζεται στο επίπεδο με την μορφή ευθείας. Επομένως η καταλληλότητα ή μη της μεθόδου γίνεται αντιληπτή από τον βαθμό προσαρμογής των δεδομένων στην ευθεία παλινδρόμησης. Παράλληλα από τον υπολογισμό της διάμεσης βαθμίδας συλλέγονται τα απαραίτητα δεδομένα για την δημιουργία του διαγράμματος Weibull, το οποίο επίσης παρέχει πολλές πληροφορίες σχετικά με την ορθότητα των ληφθέντων παραδοχών. Αντιθέτως, η Μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας δεν εξασφαλίζει γραφική απεικόνιση των δεδομένων.

- Εφαρμογή με δεδομένα άνευ αστοχίας: Η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων δεν μπορεί να αποδώσει αποτελέσματα μόνο με τμηματική πληροφορία, σε αντίθεση με την Μέγιστης Πιθανοφάνειας
- Ακρίβεια: Η Μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας όσο μεγαλώνει το μέγεθος του δείγματος, τόσο υπερέχει ως προς την ακρίβεια σε σχέση με τα ελάχιστα τετράγωνα. Αυτό γιατί η πρώτη λαμβάνει υπόψη τους ακριβείς χρόνους των υλικών και όχι απλά την σειρά τους, όπως συμβαίνει με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.
- Μέγεθος δείγματος: Η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων μπορεί και με αρκετά μικρό αριθμό δείγματος να επιφέρει ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με την Μέθοδο Μέγιστης Πιθανοφάνειας που απαιτεί πλήθος δείγματος $n > 20$ για να θεωρείται ακριβής.

Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται συνοπτικά ορισμένες διαφορές των δύο μεθόδων:

Χαρακτηριστικά	Ελάχιστα Τετράγωνα	Μέγιστη Πιθανοφάνεια
Γραφική Απεικόνιση	Ναι, με διάγραμμα Weibull	Περιορισμένα
Εφαρμογή με δεδομένα άνευ αστοχίας (τμηματική πληροφορία)	Περιορισμένα: Εκτός από δεδομένα αστοχιών εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος	Ναι
Συστηματικό Σφάλμα	Περίπου το ίδιο	Περίπου το ίδιο
Ακρίβεια	Χειρότερη	Καλύτερη
Εκτίμηση Αβεβαιότητας	Όχι	Ναι
Λαμβάνει υπόψην τους ακριβείς χρόνους των υλικών άνευ αστοχίας	Όχι, λαμβάνει υπόψην μόνο τη σειρά	Ναι
Δυνατότητα εκτίμησης παραμέτρων με μία μόνο αστοχία	Όχι	Ναι
Απαίτηση μεγάλου αριθμού δείγματος για καλή ακρίβεια (>20)	Όχι	Ναι

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά σύγκρισης των Μεθόδων Ελαχίστων Τετραγώνων και Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Παράλληλα με τον παραπάνω πίνακα, ο μελετητής μπορεί να προβεί και σε στατιστικό έλεγχο για την σύγκριση των δύο μεθόδων, με την βοήθεια του MINITAB.

Έναν τέτοιο έλεγχο αποτελεί η σύγκριση των συντελεστών Anderson-Darling, για την καλύτερη προσαρμογή των προκυπτουσών κατανομών στα δεδομένα. Ο στατιστικός έλεγχος, τόσο για την επιλογή της καταλληλότερης κατανομής (Weibull, Lognormal, Normal κλπ), όσο και της κατάλληλης μεθόδου είναι προτιμότερος, διότι η τελική απόφαση είναι σαφής και τεκμηριωμένη με αριθμητικά δεδομένα. Για τον έλεγχο Anderson-Darling ισχύει πως όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής, τόσο καλύτερα προσαρμόζεται η κατανομή στα δεδομένα.

Ωστόσο, αν παρά την εφαρμογή των δύο παραπάνω τρόπων για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου υπάρχουν αμφιβολίες, τότε ο μελετητής μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν συνδυασμό των παραμέτρων β και η που έχουν προκύψει, ο οποίος να αντιστοιχεί στην συντηρητικότερη προσέγγιση, αυτή δηλαδή που δίνει την μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας. Για την καλύτερη κατανόηση του στατιστικού ελέγχου, αυτός εφαρμόζεται στο παράδειγμα του παραρτήματος στο τέλος της εργασίας.

3.2.5 Ερμηνεία Παραμέτρων

Αφού υπολογιστούν οι εκτιμήτριες των παραμέτρων της κατανομής Weibull, επόμενο στάδιο της μελέτης είναι η ερμηνεία των τιμών τους. Όπως αναφέρθηκε και στην υπό-ενότητα 2.1.3 η παράμετρος η είναι η παράμετρος κλίμακας ή και χαρακτηριστική ζωή και η β είναι η παράμετρος μορφής.

Η τιμή της παραμέτρου η αντιστοιχεί στον χρόνο (διάρκεια ζωής) που αναμένεται το εξάρτημα να παρουσιαστεί βλάβη με πιθανότητα 63,2%. Η τιμή της παραμέτρου β εκτός από την μορφή της γραφικής παράστασης της κατανομής εκφράζει και τον ρυθμό αστοχίας του υλικού, αφού όπως διατυπώνεται και στον τύπο (1.10) της συνάρτησης κινδύνου, το β έχει εκθετική συσχέτιση με τον ρυθμό αστοχιών:

$$h(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Πιο συγκεκριμένα:

- $0 < \beta < 1$: Μειούμενος ρυθμός αστοχιών. Αυτό σημαίνει πως με το πέρασμα του χρόνου λειτουργίας του εξαρτήματος, η πιθανότητα να εμφανίσει βλάβη μειώνεται. Αποτελεί περίπτωση βρεφικής θνησιμότητας και είναι

χαρακτηριστική εξαρτημάτων τα οποία δεν συναρμολογήθηκαν σωστά ή δεν έγινε επαρκής έλεγχος πριν την μαζική παραγωγή τους.

- $\beta=1$: Σταθερός ρυθμός αστοχιών. Πρόκειται για υλικά, τα οποία σε όλη την διάρκεια ζωής τους έχουν την ίδια πιθανότητα αστοχίας. Σε αυτή την περίπτωση η κατανομή Weibull αντικαθίσταται από την εκθετική και η διασπορά αστοχιών είναι τυχαία και ομοιόμορφα κατανεμημένη.
- $1<\beta<4$: Αυξανόμενος ρυθμός αστοχιών. Τέτοιες τιμές β εκφράζουν τα εξαρτήματα τα οποία υπόκεινται σε γήρανση. Η εκδήλωση της εξεταζόμενης αστοχίας οφείλεται στην καταπόνηση του εξαρτήματος και την συσσώρευση πολλαπλών μη καταστροφικών αστοχιών μικρής κλίμακας κατά την λειτουργία του, δηλαδή πρόκειται για φυσιολογική φθορά. Σε αυτή την περίπτωση όσο αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας, τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα εμφάνισης αστοχίας.
- $\beta>4$: Αποτελεί ειδικές περιπτώσεις ταχείας φθοράς του εξαρτήματος, που μπορεί να οφείλονται σε διάβρωση, τριβή κλπ.

3.3 Δημιουργία και Ερμηνεία Διαγράμματος Weibull

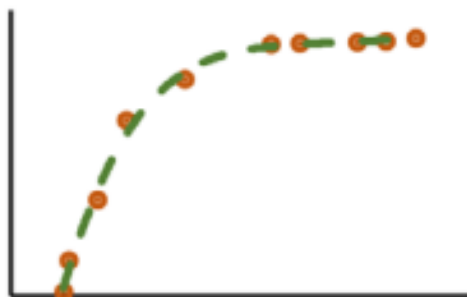
Αφού υπολογίστηκαν και οι τιμές των πιθανοτήτων $F(t)$, βάσει της μεθόδου που επιλέχθηκε, μπορεί να γίνει οπτικοποίηση των δεδομένων με τη δημιουργία του διαγράμματος. Ανάλογα με την μορφή που θα έχει το τελικό διάγραμμα, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την καταλληλότητα της κατανομής, αλλά και των υποθέσεων που άρθηκαν για την μελέτη (π.χ. η θεώρηση ότι η έναρξη αστοχιών είναι και η στιγμή έναρξης λειτουργίας του εξαρτήματος: $\gamma=0$). Επιπλέον, με το διάγραμμα Weibull είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή η ύπαρξη ανωμαλιών, που μπορεί να επηρεάζουν τα δεδομένα και τα συμπεράσματα της μελέτης.

Τα ζεύγη των δεδομένων $(t, F(t))$ διατάσσονται από τον μικρότερο χρόνο και αναπαρίστανται στο επίπεδο. Εάν υπάρχουν δύο υλικά που έχουν τον ίδιο χρόνο αστοχίας, τίθενται σε τυχαία σειρά μεταξύ της. Εάν η κατανομή που έχει επιλεγεί και οι προϋποθέσεις που έχουν οριστεί απεικονίζουν ικανοποιητικά τα δεδομένα της

μελέτης, τότε το διάγραμμα Weibull θα πρέπει να προσεγγίζει μια ευθεία γραμμή. Σε διαφορετική περίπτωση, είναι πιθανή η ύπαρξη ανωμαλιών.

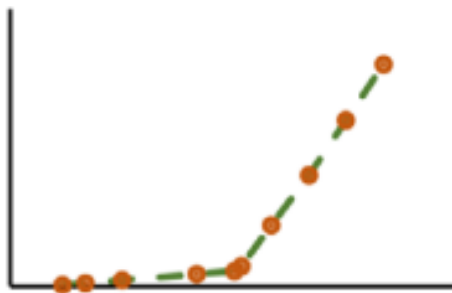
Οι πιο συχνές περιπτώσεις εμφάνισης ανωμαλιών έχουν της παρακάτω μορφές και ερμηνείες:

- i. Επιλογή λανθασμένης κατανομής. Στην Εικόνα 8 παρατηρείται ότι στην θέση της αναμενόμενης ευθείας υπάρχει μια καμπύλη. Αυτό είναι χαρακτηριστικό είτε ότι έγινε λάθος υπόθεση σχετικά με τον χρόνο έναρξης αστοχιών $\gamma=0$ και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η κατανομή Weibull 3 παραμέτρων, είτε είναι εξ αρχής λάθος η χρήση της κατανομής Weibull για την προσαρμογή των δεδομένων. Σε μία τέτοια περίπτωση, αρχικό βήμα είναι η επανάληψη των υπολογισμών με διαφορετικές παραμέτρους (γ , β και η) και η κατασκευή νέου διαγράμματος. Εάν και πάλι προκύπτει καμπύλη αντί για ευθεία, ο μελετητής θα πρέπει να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η κατανομή Weibull δεν είναι κατάλληλη, οπότε και θα επιλέξει νέα κατανομή (συνήθως επικρατέστερη είναι η Lognormal) έως ότου αυτή να προσαρμόζεται στα δεδομένα.



Εικόνα 8: Διάγραμμα Weibull στην περίπτωση λανθασμένης κατανομής

- ii. Πολλαπλοί τρόποι αστοχίας: Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται το διάγραμμα Weibull που είναι χαρακτηριστικών δύο διαφορετικών τρόπων αστοχίας του εξαρτήματος. Αυτό είναι εμφανές από τα δύο ευθύγραμμα τμήματα διαφορετικής κλίσης. Σε αυτή την περίπτωση, ο μελετητής θα πρέπει να κατηγοριοποιήσει τα δεδομένα του τις δύο ξεχωριστές περιπτώσεις και να διεξάγει δύο ξεχωριστές μελέτες για κάθε μηχανισμό αστοχίας.



Εικόνα 9: Διάγραμμα Weibull δύο μηχανισμών αστοχίας

- iii. Προβληματική παρτίδα υλικών: Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα Weibull, όπου έχει την μορφή ευθείας, με πολύ απότομη, ωστόσο, κλίση. Η απότομη κλίση, η οποία πιθανώς αντιστοιχεί σε $\beta > 4$, καθώς και η διαπίστωση ότι η χρόνοι λειτουργίας των υλικών βρίσκονται πολύ δεξιότερα των χρόνων αστοχίας, είναι χαρακτηριστικά ελαττωματικής παρτίδας υλικών. Εάν μάλιστα τα S/N των υλικών που αστόχησαν είναι παραπλήσια (π.χ. 1051, 1052, 1053) πρόκειται για χαρακτηριστική περίπτωση προβληματικής μερίδας παραγωγής και θα πρέπει να εξαιρεθεί από την μελέτη και να μελετηθεί ξεχωριστά.



Εικόνα 10: Διάγραμμα Weibull ελαττωματικής παρτίδας.

Η κατασκευή του διαγράμματος είναι απλή διαδικασία τόσο με την χρήση του Excel, όσο και με την χρήση του MINITAB. Στην περίπτωση που ως καταλληλότερη μέθοδος έχει κριθεί αυτή των Ελάχιστων Τετραγώνων, οι τιμές της πιθανότητας αστοχίας $F(t)$, έχουν ήδη υπολογιστεί, με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στην υπό-ενότητα 3.2.1. Εάν έχει επιλεγεί η μέθοδος Μέγιστης Πιθανοφάνειας, τότε πρέπει να γίνει εκ νέου υπολογισμός των $F(t)$. Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει εύκολα με την χρήση του τύπου (1.9) και την χρήση του Excel, είτε μέσω MINITAB ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- iv. Calc->Probability Distribution->Weibull
- v. Επιλογή Cumulative Probability
- vi. Shape parameter->εισαγωγή της τιμής του β

- vii. Scale parameter-> εισαγωγή της τιμής του η
- viii. Input column-> εισαγωγή της στήλης των χρόνων αστοχιών.
- ix. Ok

Η ερμηνεία του διαγράμματος Weibull παρουσιάζεται και στο παράδειγμα του παραρτήματος: Αριθμητική Εφαρμογή στο τέλος της εργασίας.

3.4 Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών

Τελικό υπολογιστικό βήμα της μελέτης είναι η πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών για τον συγκεκριμένο μηχανισμό αστοχίας, για το συγκεκριμένο πληθυσμό υλικών που μελετάται. Η πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών είναι μια από της σπουδαιότερες εφαρμογές της κατανομής Weibull και υπολογίζεται με χρήση της εξής δεσμευμένης πιθανότητας:

$$P = \frac{F(t+u) - F(t)}{1 - F(t)} \quad (2.5)$$

Αφού λοιπόν έχει ολοκληρωθεί η εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής Weibull, θα ακολουθήσει ο υπολογισμός των τιμών $F(t)$ και $F(t+u)$ για το πλήθος των εν ενεργεία υλικών που πρόκειται να εκμεταλλευτούν στο μελλοντικό χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος u , είτε πρόκειται για μήνες, είτε για ώρες λειτουργίας, είτε για κύκλους λειτουργίας κλπ. Έπειτα θα υπολογιστεί η τιμή της πιθανότητας (2.5) για κάθε S/N ξεχωριστά και τέλος η αθροιστική τιμή F_{total} , των συνολικών αστοχιών, για το σύνολο του πληθυσμού. Η τιμή της συνολικής δεσμευμένης πιθανότητας για όλα τα εν ενεργεία S/N υλικών αποτελεί την ζητούμενη πιθανότητα αστοχίας, αφού αυτή εκφράζει τον κίνδυνο να αστοχήσει ένα υλικό στο u μελλοντικό χρονικό διάστημα, δεδομένου ότι μέχρι την παρούσα χρονική στιγμή t λειτουργεί άνευ αστοχίας με αξιοπιστία $R = 1 - F(t)$.

Ο υπολογισμός της συνολικής τιμής της δεσμευμένης πιθανότητας μπορεί να γίνει μέσω την εξισώσεων (1.9) και (2.5) με χρήση του Excel, είτε με χρήση του MINITAB. Με χρήση του MINITAB οι μελλοντικές αστοχίες προβλέπονται με τα εξής βήματα:

- i. Έχει προηγηθεί η πληκτρολόγηση των χρόνων αστοχίας και λειτουργίας στην στήλη C1 του MINITAB και των τιμών «1» και «0» για την αστοχία και λειτουργία, αντίστοιχα.
- ii. Ονομασία της στήλης C3 ως «t+u» και εισαγωγή του μελλοντικού χρονικού διαστήματος ενδιαφέροντος για κάθε S/N υλικού που θα εκμεταλλευτεί.
- iii. Ονομασία στήλης C4 ως «F(t)», C5 ως «F(t+u)», C6 ως «P» και C7 ως «Ftotal».
 - i. Calc-> Probability Distributions->Weibull
 - ii. Επιλογή Cumulative Probability
 - iii. Shape parameter->συμπλήρωση τιμής β
 - iv. Scale parameter-> συμπλήρωση τιμής η
 - v. Input column-> Επιλογή στήλης t
 - vi. Optional Storage-> Επιλογή στήλης F(t)
 - vii. Ok
 - viii. Επανάληψη των βημάτων iv. έως x. για την στήλη t+u και F(t+u)
 - ix. Calc->Calculator->Store Result in variable->Επιλογή στήλης P
 - x. Expression->εισαγωγή τύπου (2.5)
 - xi. Ok
 - xii. Calc->Calculator->Store result in variable->Επιλογή στήλης Ftotal
 - xiii. Function->Statistics->SUM->Επιλογή στήλης P.
 - xiv. Ok.

Η εφαρμογή του υπολογισμού μελλοντικών αστοχιών παρουσιάζεται αναλυτικά με αριθμητικά δεδομένα στο Παράρτημα Β, παράγραφος Π.Β.7 στο τέλος της εργασίας.

3.5 Ποιοτική Εκτίμηση Επικινδυνότητας

3.5.1 Ποιοτική Εκτίμηση Πιθανότητας Αστοχίας

Παρόλο που στην προηγούμενη ενότητα υπολογίστηκε η πιθανότητα αστοχίας στο μελλοντικό διάστημα ενδιαφέροντος, αυτή η τιμή δεν μπορεί να αντιστοιχηθεί στις κατηγορίες του Πίνακα 3, προκειμένου να κατηγοριοποιηθεί η πιθανότητα αστοχίας ως

«Μικρή», «Μεσαία», «Μεγάλη» ή «Υψηλή». Για να γίνει η κατηγοριοποίηση θα πρέπει η συνολική πιθανότητα αστοχίας να αναχθεί στο χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος που αναφέρει ο προαναφερόμενος πίνακας, δηλαδή σε ώρες λειτουργίας, ώρες πτήσης κλπ σε διάστημα 10ετίας ή/και 5ετίας.

Η κατηγοριοποίηση της πιθανότητας σε διάστημα 10ετίας ή/ και 5ετίας δεν αποτελεί αυτό καθ' αυτό τον ζητούμενο δείκτη, αλλά αποτελεί μια συντηρητική προσέγγιση, καθώς αν η πιθανότητα και κατ' επέκταση η επικινδυνότητα εμφάνισης αστοχιών είναι αποδεκτή σε βάθος 10ετίας, είναι σίγουρα αποδεκτή για μικρότερα μελλοντικά χρονικά διαστήματα.

Για καλύτερη κατανόηση του συγκεκριμένου βήματος, η προαναφερθείσα αναγωγή παρουσιάζεται στην παράγραφο Π.8 του παραρτήματος στο τέλος της εργασίας.

3.5.2 Εκτίμηση Δριμύτητας

Η εκτίμηση της δριμύτητας που θα προκαλέσει ο υπό μελέτη μηχανισμός αστοχίας μπορεί να γίνει είτε στα τελευταία βήματα της μελέτης, είτε στα πρώτα. Η κατηγοριοποίηση της γίνεται με βάσει τις συνέπειες της αστοχίας σε όρους τραυματισμού του ανθρώπινου προσωπικού και σε όρους κόστους, όπως αναλύθηκε στην υπό-ενότητα 2.2.2.2.

Συγκεκριμένα, εάν υπάρχει η υποψία ότι η δριμύτητα της αστοχίας εντάσσεται στην κατηγορία «Μικρή» του Πίνακα 4, τότε με βάσει τον Πίνακα 2 της εκτίμησης επικινδυνότητας παρατηρείται ότι για οποιαδήποτε κατηγορία της πιθανότητας αστοχίας, η επικινδυνότητα προκύπτει «Μικρή» ή «Μέτρια». Αυτό σημαίνει ότι η τελευταία κινείται σε αποδεκτά επίπεδα και δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας, που αποτελεί και το μεγαλύτερο έργο της μελέτης. Εφαρμογή της εκτίμησης δριμύτητας παρουσιάζεται στην παράγραφο Π.9 του παραρτήματος: Αριθμητική Εφαρμογή.

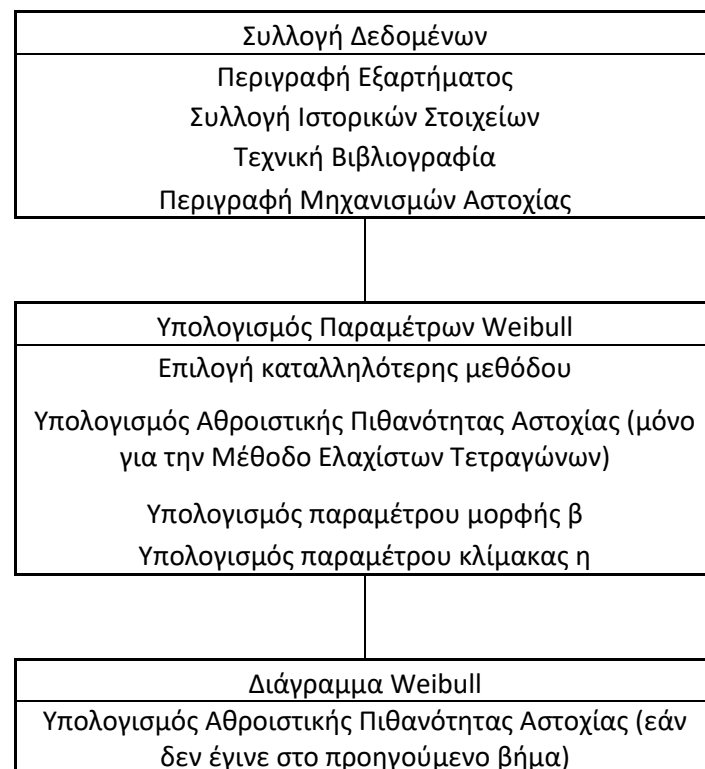
3.5.3 Εκτίμηση Επικινδυνότητας

Τελικό βήμα της μελέτης είναι η εκτίμηση της επικινδυνότητας που επιφέρει ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας που μελετήθηκε. Όπως αναφέρθηκε και

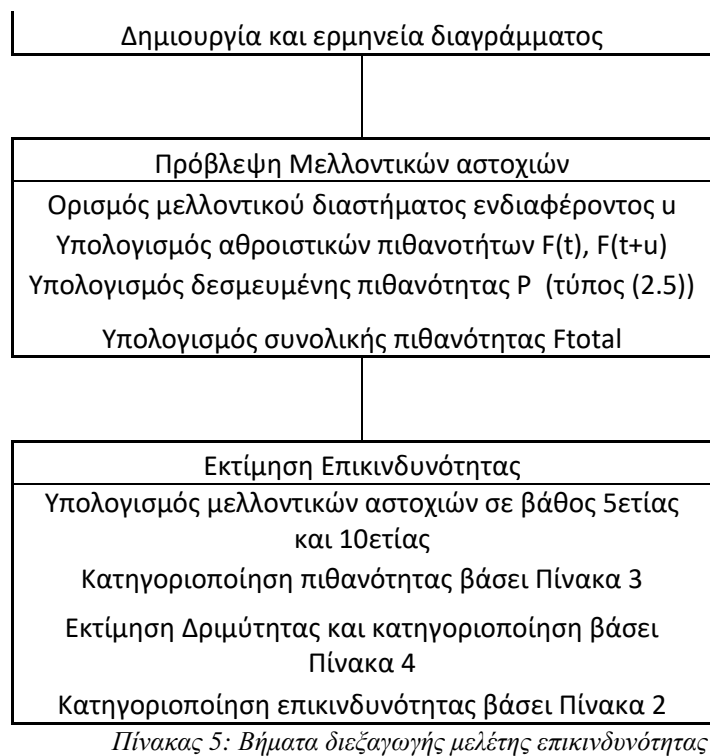
προηγούμενως κατά την κατηγοριοποίηση της πιθανότητας αστοχίας, η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι αρκετά συντηρητική, λόγω του περιορισμού στον υπολογισμό της πιθανότητας στο χρονικό διάστημα 5ετίας και 10ετίας. Στην πράξη, οι μελέτες επικινδυνότητας έχουν αρκετά πιο βραχυπρόθεσμα χρονικά διαστήματα ενδιαφέροντος. Οπότε, εάν η εκμετάλλευση μέσα στην επόμενη 5ετία του υπό μελέτη πληθυσμού υλικών εμπεριέχει μια αποδεκτή επικινδυνότητα, τότε σίγουρα δεν διατρέχεται σοβαρός κίνδυνος σε συντομότερο χρονικό διάστημα.

Η εκτίμηση της επικινδυνότητας γίνεται με βάση τον Πίνακα 2, αφού έχει προηγηθεί η ποιοτική εκτίμηση πιθανότητας και η εκτίμηση της δριμύτητας. Γενικά, αποδεκτές στάθμες επικινδυνότητας είναι η (Γ) ή «Μέτρια Επικινδυνότητα» και η (Δ) ή «Μικρή Επικινδυνότητα». Η εφαρμογή της κατηγοριοποίησης του κινδύνου παρουσιάζεται στην παράγραφο Π.10 του παραρτήματος.⁸

Συνοπτικά τα βήματα που περιγράφονται και ακολουθούνται για τη διεξαγωγή της μελέτης επικινδυνότητας παρουσιάζονται σχηματικά ακολούθως:



⁸ Clothier, Walker, 2014.



4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Μελέτες Περίπτωσης

4.1 Μελέτη περίπτωσης υλικού με αθροιστική κόπωση-Εκκινήσεις

Η συγκεκριμένη μελέτη επικινδυνότητας αφορά την μελλοντική λειτουργία του εκκινητή (Turbo-starter) του μαχητικού αεροσκάφους Mirage 2000-5. Οι απαιτήσεις πτήσεων της πολεμικής μοίρας που φιλοξενεί τον εν λόγω τύπο, απαιτούν την διαθεσιμότητα σε 15 τουλάχιστον Turbo-starter σε βάθος 2 ετών μέχρι την παραλαβή νέων υλικών και υλικών που έχουν ήδη σταλεί για γενική επισκευή. Η αναγκαιότητα των 15 Turbo-starter απαιτεί την επέκταση του ορίου λειτουργίας κάποιων από τον υπάρχοντα πληθυσμό, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ζητούμενη διαθεσιμότητα. Επομένως θα πραγματοποιηθεί μελέτη για να εκτιμηθεί η επικινδυνότητα χρήσης των turbo-starter που θα αξιοποιηθούν τα επόμενα δύο έτη. Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη συλλέχθηκαν στοιχεία από 53 υλικά.

4.1.1 Περιγραφή Turbo-starter και μηχανισμών αστοχίας

Το υλικό Turbo-starter αποτελεί κύριο υλικό του συστήματος εκκίνησης του αεροσκάφους και σκοπός του είναι η παροχή της απαιτούμενης μηχανικής ενέργειας για την περιστροφή του κινητήρα, κατά τη φάση της εκκίνησης. Είναι συνδεδεμένο με το κιβώτιο ταχυτήτων του αεροσκάφους (Accessory Gear Box) και η λειτουργία του ξεκινά με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είτε από τη μπαταρία του σκάφους, είτε από επίγεια συσκευή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία του κατασκευαστή, κατά την διάρκεια ζωής του υπόκειται στις εξής επιθεωρήσεις:

- Περιοδική επιθεώρηση του θαλάμου καύσης ανά 50 και 100 εκκινήσεις
- Περιοδική επιθεώρηση Turbo- starter ανά 500, 1000 και 1250 εκκινήσεις
- Γενική επισκευή στις 1500 εκκινήσεις.

Ο πληθυσμός των 53 turbo-starter περιέχει υλικά δύο διαφορετικών Αριθμών Ονομαστικού (Part Number): XXXX-01 και XXXX-03, λόγω αναβάθμισης που

πραγματοποιήθηκε το 2007. Επομένως θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο διεξαγωγής δύο ξεχωριστών μελετών για τα δύο διαφορετικά Part Number του πληθυσμού.

Για την περιγραφή των μηχανισμών αστοχίας θα βασιστούμε στα ιστορικά στοιχεία του πληθυσμού, αφού αυτά διαθέτουν πληροφορίες έως και από το 1983. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα μητρώα του εν λόγω πληθυσμού, η αφαίρεση υλικού από το αεροσκάφος οφείλεται σε μία τουλάχιστον από τις παρακάτω αιτίες:

- i. Λήξη ορίου λειτουργία ή περιοδική επιθεώρηση ή αξιοποίηση σε άλλο αεροσκάφος: Δεν αποτελεί βλάβη και δεν εντάσσεται στους μηχανισμούς αστοχίας.
- ii. Διαρροή ελαίου από τον θάλαμο καύσης: Δεν επηρεάζουν την κανονική λειτουργία του σκάφους σε άμεσο χρονικό διάστημα
- iii. Ρωγμές στο ακροφύσιο του starter: Δύναται να προκληθεί φωτιά στην περιοχή εξαγωγής καυσαερίων του Turbo-starter, η οποία εάν συνεχιστεί μπορεί να επηρεάσει την λειτουργικότητα επιπλέον περιοχών του σκάφους, όπως τα ελαστικά των τροχών, τις εξωτερικές δεξαμενές καυσίμου κλπ. Βάσει των διαθέσιμων ιστορικών στοιχείων η ύπαρξη φωτιάς χαρακτηρίστηκε σε όλες τις περιπτώσεις μικρής έντασης και μικρής διάρκειας (<5sec). Ωστόσο, το ενδεχόμενο συνεπειών υψηλότερης δριμύτητας δεν παύει να υφίσταται και θα πρέπει να μελετηθεί.
- iv. Αστοχία του άξονα περιστροφής: Ο άξονας περιστροφής του Turbo-starter συνδέει τον συμπιεστή και τον στρόβιλο του εν λόγω υλικού και επιθεωρείται κατά την γενική επισκευή του τελευταίου, δηλαδή ανά 1500 εκκινήσεις. Υπάρχουν 2 υλικά εκ των 53 τα οποία υπέστησαν θραύση του άξονα, η οποία προκάλεσε εκτεταμένες βλάβες τόσο στις καλωδιώσεις, όσο και στην δομή της ατράκτου.

Επομένως, για την μελέτη επικινδυνότητας της χρήσης του Turbo-starter θα μελετηθούν τρεις (3) μηχανισμοί αστοχίας: η διαρροή ελαίου από τον θάλαμο καύσης, η ύπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο και η αστοχία του άξονα περιστροφής.

4.1.2 Συλλογή και παρουσίαση δεδομένων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα απαραίτητα για την μελέτη δεδομένα των 53 υπό μελέτη Turbo-starter. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν:

- Τοποθεσία: η τωρινή τοποθεσία των υλικών (είτε τοποθετημένα σε σκάφη, είτε σε συνεργείο, είτε εφεδρικά),
- S/N :ο μοναδικός αριθμός σειράς κάθε υλικού,
- P/N: ο ονομαστικός αριθμό μοντέλου
- Εκκινήσεις έως το 1^ο O/H: το πλήθος των εκκινήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί από την πρώτη τοποθέτηση του υλικού έως την πρώτη γενική επισκευή,
- Εκκινήσεις από 1^ο έως 2^ο O/H: το πλήθος των εκκινήσεων που έχουν λάβει χώρα μεταξύ της 1^{ης} και 2^{ης} γενικής επισκευής,
- Εκκινήσεις από 2^ο έως 3^ο O/H: το πλήθος των εκκινήσεων που έχουν λάβει χώρα μεταξύ της 2^{ης} και 3^{ης} γενικής επισκευής,
- Εκκινήσεις από τελευταίο O/H ή από κατασκευή έως σήμερα: το πλήθος των εκκινήσεων που έχει πραγματοποιήσει το υλικό μετά την τελευταία γενική επισκευή έως την έναρξη της μελέτης ή εάν ακόμα δεν έχει υποβληθεί σε γενική επισκευή πρόκειται για το πλήθος των εκκινήσεων από την πρώτη τοποθέτηση έως την έναρξη της μελέτης
- Συνολικές εκκινήσεις: το πλήθος όλων των εκκινήσεων από την πρώτη τοποθέτηση έως την έναρξη της μελέτης
- Έτος κατασκευής και
- Κατάσταση/Λόγος αφαίρεσης: περιγράφει την τωρινή κατάσταση του υλικού ως εν ενεργεία ή εκτός ενεργείας μαζί με τον αντίστοιχο μηχανισμό αστοχίας.

Τοποθεσία	P/N	S/N	Εκκινήσεις 1ου Ο/Η	Εκκιν. από 1ο έως 2ο Ο/Η	Εκκ. από 2ο έως 3ο Ο/Η	Εκκ. από τελευταίο Ο/Η (ή από κατασκευή) έως σήμερα	Συν. Εκκιν.	Ημερ. κατασκευής	Κατάσταση/ Λόγος αφαίρεσης
EAB	XXXX-01	185	1243	0	0	1476	2719	Ιαν-87	ΛΟΛ
EAB	XXXX-01	462	1482	0	0	636	2118	Σεπ-94	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
EAB	XXXX-01	61	1192	1497	0	77	2766	Ιουν-85	Διαρροή-Πτώση ένδειξης ελαίου
EAB	XXXX-01	147	0	0	0	1499	1499	Μαρ-06	ΛΟΛ
EAB	XXXX-01	192	1244	1489	0	777	3510	Μαρ-87	Διαρροή-Πτώση ένδειξης ελαίου
EAB	XXXX-03	645	0	0	0	1114	1114	Ιουν-03	Διαρροή-Πτώση ένδειξης ελαίου
EAB	XXXX-03	182	1493	0	0	1020	2513	Ιουλ-03	Διαρροή-Πτώση ένδειξης ελαίου
EAB	XXXX-01	466	1250	0	0	1156	2406	Νοε-94	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
EAB	XXXX-01	186	1250	0	0	238	1488	Ιουλ-85	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
EAB	XXXX-01	248	1250	0	0	1499	2749	Ιουλ-03	ΛΟΛ
EAB	XXXX-01	128	994	1248	0	1474	3716	Ιαν-86	Περιοδική ΕπιθεώρησηΘ/Κ: 100 Εκκινήσεις
EAB	XXXX-01	259	1256	1500	0	937	3693	Μαρ-88	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
EAB	XXXX-03	255	1248	0	0	1480	2728	Φεβ-88	ΛΟΛ
EAB	XXXX-01	216	0	0	0	1500	1500	Ιουν-87	ΛΟΛ
EAB	XXXX-03	617	0	0	0	1500	1500	Σεπ-02	ΛΟΛ
EAB	XXXX-03	647	0	0	0	1500	1500	Ιουν-03	ΛΟΛ
EAB	XXXX-03	80	1259	0	0	1498	2757	Σεπ-85	ΛΟΛ
EAB	XXXX-03	649	0	0	0	1496	1496	Σεπ-03	ΛΟΛ
EAB	XXXX-01	249	1250	0	0	1124	2374	Ιουν-87	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
2ος Β.Σ	XXXX-03	655	1426	0	0	919	2345	Δεκ-03	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
2ος Β.Σ	XXXX-03	656	0	0	0	1595	1595	Δεκ-03	ΛΟΛ
2ος Β.Σ	XXXX-01	283	1245	1494	0	1478	4217	Σεπ-89	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
A/Φ 1	XXXX-03	226	1246	1497	0	1404	4147	Σεπ-87	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 2	XXXX-03	648	0	0	0	1531	1531	Αυγ-03	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 3	XXXX-03	657	0	0	0	1569	1569	Δεκ-03	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 4	XXXX-03	223	1248	1486	0	1447	4181	Ιουλ-87	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 5	XXXX-03	189	1250	1492	0	971	3713	Φεβ-87	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 6	XXXX-03	224	1249	899	0	1352	3500	Οκτ-87	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 7	XXXX-03	184	1247	1496	0	49	2792	Ιαν-87	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 8	XXXX-03	653	0	0	0	1589	1589	Νοε-03	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 9	XXXX-01	200	1246	1495	1497	805	5043	Απρ-87	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 10	XXXX-01	234	1253	1498	442	1070	4263	Φεβ-87	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 11	XXXX-01	231	1250	0	0	1393	2643	Νοε-03	ΕΝ/ΕΝ
A/Φ 12	XXXX-01	233	1500	0	0	1266	2766	Νοε-03	ΕΝ/ΕΝ
Αποθήκη Εφεδρικών	XXXX-03	651	0	0	0	1599	1599	Σεπ-03	Περιοδική ΕπιθεώρησηΘ/Κ: 50 Εκκινήσεις
Αποθήκη Εφεδρικών	XXXX-03	168	1000	1499	0	1497	3996	Οκτ-86	ΛΟΛ
Αποθήκη Εφεδρικών	XXXX-03	654	0	0	0	1581	1581	Νοε-03	Αξιοποίηση για άλλο αεροσκάφος
Αποθήκη Εφεδρικών	XXXX-03	650	0	0	0	1600	1600	Σεπ-03	Αξιοποίηση για άλλο αεροσκάφος
Αποθήκη Εφεδρικών	XXXX-01	256	1237	1456	0	1208	3901	Μαρ-88	Περιοδική Επιθεώρηση: 1250 Εκκινήσεις
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-01	240	1497	0	0	342	1839	Νοε-87	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-01	247	0	0	0	1500	1500	Μαρ-07	ΛΟΛ
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	640	0	0	0	1474	1474	Απρ-03	ΛΟΛ
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	258	0	0	0	1497	1497	Μαρ-88	ΛΟΛ
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-01	235	1249	1499	0	1468	4216	Οκτ-87	ΛΟΛ
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	263	1251	1495	0	1500	4246	Απρ-88	ΛΟΛ
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-01	279	1500	0	0	754	2254	Ιουλ-88	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	464	1500	0	0	1500	3000	Οκτ-94	ΛΟΛ
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	273	1259	1499	0	1533	4291	Ιουν-88	Υπαρξη ρωγμών εκτός ορίων στο ακροφύσιο
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-01	253	1249	1143	0	1205	3597	Μαρ-88	Θραύση Αξονα Περιστροφής
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	646	1495	0	0	57	1552	Ιουν-03	ΕΝ/ΕΝ
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	268	1247	1500	0	1500	4247	Μαϊ-88	ΛΟΛ
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-01	251				1407	1407	Μαϊ-88	Θραύση Αξονα Περιστροφής
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	652	0	0	0	1600	1600	Οκτ-03	ΛΟΛ

Πίνακας 6: Ιστορικά στοιχεία Turbo-starter

4.1.3 Εκτίμηση Δριμύτητας

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, όταν υπάρχει υποψία ότι η δριμύτητα των συνεπειών του μηχανισμού αστοχίας της κάθε μελέτης είναι μικρή, τότε η εκτίμηση της προηγείται της εκτίμησης πιθανότητας αστοχίας, διότι η τελευταία πιθανόν να αποδειχθεί περιττή.

4.1.3.1 Εκτίμηση δριμύτητας διαρροής ελαίου από τον θάλαμο καύσης

Η διαρροή ελαίου από τον θάλαμο καύσης του Turbo-starter δύναται να προκαλέσει, έπειτα από μακρά παραμέληση της, την απώλεια ελαίου και επομένως λίπανσης των κινητών μερών του υλικού. Ωστόσο, βάσει του εγχειριδίου συντήρησης του αεροσκάφους, πραγματοποιείται καθημερινά έλεγχος διαρροών στην περιοχή του Turbo-starter, καθώς και πλήρωση ελαίου ανά 30 εκκινήσεις. Βάσει επομένως της τηρούμενης συντήρησης, των ιστορικών στοιχείων που δεν αποδεικνύουν κανένα επισφαλές περιστατικό, καθώς και λαμβάνοντας υπόψη την γνώμη έμπειρων τεχνικών, τόσο σε επίπεδο ανθρώπινου παράγοντα όσο και κόστους, η δριμύτητα χαρακτηρίζεται ως «Μικρή».

4.1.3.2 Εκτίμηση δριμύτητας ύπαρξης ρωγμών στο ακροφύσιο

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η ύπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο του Turbo-starter μπορεί να προκαλέσει φωτιά στην εξαγωγή των καυσαερίων του εν λόγω υλικού. Το Turbo-starter λειτουργεί κατά την φάση εκκίνησης του αεροσκάφους. Επομένως η ενδεχόμενη αστοχία λαμβάνει χώρα στο έδαφος παρουσία του χειριστή, ο οποίος βρίσκεται εντός του σκάφους, του τεχνικού που αναλαμβάνει την διαδικασία εκκίνησης και του υπεύθυνου πυρασφάλειας, οι οποίοι τηρούν αποστάσεις ασφαλείας τουλάχιστον 3 μέτρων μακριά από το σκάφος. Επομένως, σε περίπτωση εκτενούς φωτιάς, όπως αυτή περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα:

- Το εμπλεκόμενο προσωπικό δεν θα υποστεί σε καμία περίπτωση σοβαρό τραυματισμό από την ενδεχόμενη αστοχία. Πιο συγκεκριμένα, ο χειριστής που βρίσκεται εντός του πιλοτηρίου δεν θα επηρεαστεί καθόλου ούτε από την

ύπαρξη φωτιάς στην περιοχή εξαγωγής ούτε από επακόλουθες συνέπειες σε κοντινές περιοχές του σκάφους. Ο τεχνικός και ο υπεύθυνος πυρασφάλειας, οι οποίοι τηρούν απόσταση ασφαλείας από το σκάφος δεν διατρέχουν κίνδυνο από την φωτιά. Σε περίπτωση που η ένταση και η διάρκεια της φωτιάς προκαλέσουν την αστοχία των ελαστικών των κύριων τροχών του σκάφους, υπάρχει η πιθανότητα ελαφρύ τραυματισμού από μικρά εκτοξευόμενα κομμάτια του ελαστικού. Ο τραυματισμός αυτός εμπίπτει στην κατηγορία «Μικρή Δριμύτητα», βάσει του Πίνακα 4.

- Το κόστος που θα προκαλούσε ο εν λόγω μηχανισμός αστοχίας καλύπτει την αστοχία των δύο ελαστικών των κυρίων τροχών, που ανέρχεται στις 7500€, την φθορά της κεντρικής εξωτερικής δεξαμενής, η επισκευή της οποίας κοστολογείται στις 20000€ και την αχρήστευση των συγκροτημάτων πέδησης, η αντικατάσταση των οποίων ανέρχεται στις 120000€. Επομένως, στην δυσμενέστερη περίπτωση το κόστος της αστοχίας είναι 147500€. Επομένως, με βάση τον Πίνακα 4, η δριμύτητα χαρακτηρίζεται ως «Μεσαία».

Τελικά, βάσει της υπό-ενότητας 1.5.2.2.1 ως συνολική δριμύτητα επιλέγεται η δυσμενέστερη, συνεπώς «Μεσαία».

4.1.3.3 Εκτίμηση δριμύτητας αστοχίας άξονα περιστροφής

Εδώ η εκτίμηση θα βασιστεί στα ιστορικά στοιχεία των εμφανιζόμενων περιστατικών. Όσον αφορά το κόστος επισκευής και στις 2 περιπτώσεις η θραύση του άξονα προκάλεσε τοπική έκρηξη. Στην μία περίπτωση η έκρηξη προκάλεσε βλάβες στις τοπικές καλωδιώσεις του σκάφους, που προκάλεσαν την καθήλωση του στο έδαφος για ένα μήνα για εργασίες επί αυτού και την αντικατάσταση 122 καλωδίων. Στην 2^η εκ των περιπτώσεων η έκρηξη προκάλεσε τρύπα στην δομή της ατράκτου, η οποία δεν επιδέχεται επισκευή, και επομένως το αποτέλεσμα ήταν η αχρήστευση του σκάφους. Επομένως, το μέσο κόστος ταυτίζεται προσεγγιστικά με το κόστος απώλειας του μείζονος συγκροτήματος και επομένως, βάσει Πίνακα 4, η δριμύτητα κόστους είναι «Υψηλή».

Εφόσον η εκτίμηση της δριμύτητας έχει λάβει ήδη την δυσμενέστερη κατηγορία της, δεν είναι απαραίτητη η εκτίμηση της δριμύτητας των συνεπειών στο προσωπικό, και η συνολική δριμύτητα χαρακτηρίζεται αυτομάτως «Υψηλή».

4.1.4 Εκτίμηση Πιθανότητας Αστοχίας

Η μελλοντική πιθανότητα αστοχίας θα υπολογιστεί για τον μηχανισμό αστοχίας της ύπαρξης ρωγμών στο ακροφύσιο και για την θραύση του άξονα. Για την περίπτωση της διαρροής ελαίου από τον θάλαμο καύσης, βάσει της υπό-ενότητας 3.5.2 δεν απαιτείται ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας, αφού η δριμύτητα χαρακτηρίζεται «Μικρή».

4.1.4.1 Ύπαρξη Ρωγμών στο ακροφύσιο

Η εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας θα γίνει με χρήση της κατανομής Weibull 2 παραμέτρων. Ως αστοχίες σε αυτή την περίπτωση τίθενται τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν ύπαρξη ρωγμής στο ακροφύσιο, ενώ όλα τα υπόλοιπα αποτελούν την τμηματική πληροφορία. Βάσει του εγχειριδίου συντήρησης, το ακροφύσιο του Turbo-starter δεν επιθεωρείται στην γενική επισκευή. Επομένως παρόλο που ορισμένα υλικά έχουν περάσει από γενική επισκευή, η κόπωση τους ως προς τον συγκεκριμένο μηχανισμό αστοχίας μετρά από την έναρξη της λειτουργίας τους. Επομένως, από τον Πίνακα 6 προκύπτει ο εξής πίνακας δεδομένων, ταξινομημένος βάσει αριθμού εκκινήσεων:

A/A	S/N	Συν. Εκκιν.	Κατάσταση/ Λόγος αφαίρεσης
1	645	1114	Αστοχία
2	251	1407	EN/EN
3	640	1474	EN/EN
4	186	1488	EN/EN
5	649	1496	EN/EN
6	258	1497	EN/EN
7	147	1499	EN/EN
8	216	1500	EN/EN
9	617	1500	EN/EN
10	647	1500	EN/EN
11	247	1500	EN/EN
12	648	1531	EN/EN
13	646	1552	EN/EN
14	657	1569	EN/EN
15	654	1581	EN/EN
16	653	1589	EN/EN

17	656	1595	EN/EN
18	651	1599	EN/EN
19	650	1600	EN/EN
20	652	1600	EN/EN
21	240	1839	EN/EN
22	462	2118	EN/EN
23	279	2254	EN/EN
24	655	2345	EN/EN
25	249	2374	EN/EN
26	466	2406	EN/EN
27	182	2513	Αστοχία
28	231	2643	EN/EN
29	185	2719	EN/EN
30	255	2728	EN/EN
31	248	2749	EN/EN
32	80	2757	EN/EN
33	61	2766	Αστοχία
34	233	2766	EN/EN
35	184	2792	EN/EN
36	464	3000	EN/EN
37	224	3500	EN/EN
38	192	3510	Αστοχία
39	253	3597	EN/EN
40	259	3693	EN/EN
41	189	3713	EN/EN
42	128	3716	EN/EN
43	256	3901	EN/EN
44	168	3996	EN/EN
45	226	4147	EN/EN
46	223	4181	EN/EN
47	235	4216	EN/EN
48	283	4217	EN/EN
49	263	4246	EN/EN
50	268	4247	EN/EN
51	234	4263	EN/EN
52	273	4291	EN/EN
53	200	5043	EN/EN

*Πίνακας 7: Δεδομένα τμηματικής και πλήρους πληροφoρίας για τον μηχανισμό αστοχίας
«Υπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο»*

Για τον υπολογισμό των συντελεστών β και η της κατανομής θα χρησιμοποιηθεί η Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων διότι το πλήθος των αστοχιών ανέρχεται στις 4, ενώ για την χρήση της Μέγιστης Πιθανοφάνειας απαιτείται μεγάλο πλήθος δείγματος.

4.1.4.1.1 Υπολογισμός Αθροιστικής Πιθανότητας Αστοχίας

Ο υπολογισμός θα γίνει με την χρήση της μεσοσταθμικής πιθανότητας όπως περιγράφεται στην υπό-ενότητα 3.2.1. Τα αποτελέσματα αναπτύσσονται στον παρακάτω πίνακα:

A/A	S/N	Κατάσταση/ Λόγος αφαίρεσης	Ανάστροφος A/A	A/A Αστοχίας	Διορθωμένη Κατάταξη	Συν. Εκκιν.	F(t)
1	645	Αστοχία	53	1	1	1114	0,012993
2	251	ΕΝ/ΕΝ	52			1407	
3	640	ΕΝ/ΕΝ	51			1474	
4	186	ΕΝ/ΕΝ	50			1488	
5	649	ΕΝ/ΕΝ	49			1496	
6	258	ΕΝ/ΕΝ	48			1497	
7	147	ΕΝ/ΕΝ	47			1499	
8	216	ΕΝ/ΕΝ	46			1500	
9	617	ΕΝ/ΕΝ	45			1500	
10	647	ΕΝ/ΕΝ	44			1500	
11	247	ΕΝ/ΕΝ	43			1500	
12	648	ΕΝ/ΕΝ	42			1531	
13	646	ΕΝ/ΕΝ	41			1552	
14	657	ΕΝ/ΕΝ	40			1569	
15	654	ΕΝ/ΕΝ	39			1581	
16	653	ΕΝ/ΕΝ	38			1589	
17	656	ΕΝ/ΕΝ	37			1595	
18	651	ΕΝ/ΕΝ	36			1599	
19	650	ΕΝ/ΕΝ	35			1600	
20	652	ΕΝ/ΕΝ	34			1600	
21	240	ΕΝ/ΕΝ	33			1839	
22	462	ΕΝ/ΕΝ	32			2118	
23	279	ΕΝ/ΕΝ	31			2254	
24	655	ΕΝ/ΕΝ	30			2345	
25	249	ΕΝ/ΕΝ	29			2374	
26	466	ΕΝ/ΕΝ	28			2406	
27	182	Αστοχία	27	2	4	2513	0,061885
28	231	ΕΝ/ΕΝ	26			2643	
29	185	ΕΝ/ΕΝ	25			2719	
30	255	ΕΝ/ΕΝ	24			2728	
31	248	ΕΝ/ΕΝ	23			2749	

32	80	EN/EN	22			2757	
33	61	Αστοχία	21	3	7,571428571	2766	0,10892
34	233	EN/EN	20			2766	
35	184	EN/EN	19			2792	
36	464	EN/EN	18			3000	
37	224	EN/EN	17			3500	
38	192	Αστοχία	16	4	11,94642857	3510	0,154395
39	253	EN/EN	15			3597	
40	259	EN/EN	14			3693	
41	189	EN/EN	13			3713	
42	128	EN/EN	12			3716	
43	256	EN/EN	11			3901	
44	168	EN/EN	10			3996	
45	226	EN/EN	9			4147	
46	223	EN/EN	8			4181	
47	235	EN/EN	7			4216	
48	283	EN/EN	6			4217	
49	263	EN/EN	5			4246	
50	268	EN/EN	4			4247	
51	234	EN/EN	3			4263	
52	273	EN/EN	2			4291	
53	200	EN/EN	1			5043	

Πίνακας 8: Υπολογισμός πιθανότητας αστοχίας για τον μηχανισμό «Υπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο»

4.1.4.1.2 Υπολογισμός Παραμέτρων Weibull

Θα προηγηθεί η εύρεση των συντελεστών του απλού γραμμικού προτύπου (2.1), ενώ τα απαραίτητα δεδομένα υπολογίζονται μέσω excel και παρίστανται παρακάτω:

A/A Αστοχίας	S/N	Συν. Εκκιν. (t)	F(t)	X=Int	Y=ln(ln(1/(1-F(t))))
1	645	1114	0,012993	7,015712	-4,336804834
2	182	2513	0,061885	7,829233	-2,750703935
3	61	2766	0,10892	7,925158	-2,160031251
4	192	3510	0,154395	8,163371	-1,785558158

Πίνακας 9: Υπολογισμός σημείων του απλού γραμμικού προτύπου

Με εφαρμογή των βημάτων του MINITAB της υπό-ενότητας 3.2.2 και τα δεδομένα του Πίνακα 7 προκύπτει η εξής εξίσωση παλινδρόμησης:

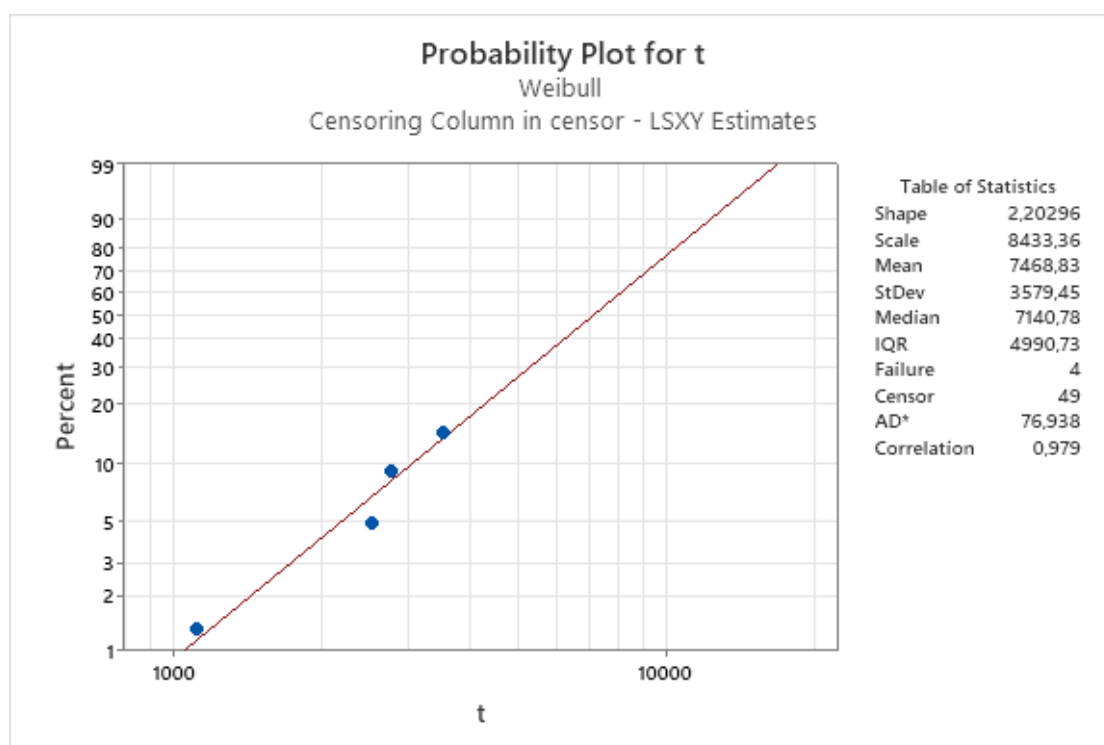
Regression Equation

$$X = 8,944 + 0,4390 Y$$

Επομένως οι συντελεστές του ζητούμενου προτύπου είναι $A = \frac{1}{0,439} = 2,2779$

και $B = -\frac{8,944}{0,439} = -20,3736$. Άρα τελικά οι παράμετροι Weibull είναι $\beta=2,2779$ και

$\eta=7661,9$. Θα ακολουθήσει και έλεγχος Anderson-Darling για την καταλληλότητα της επιλεγμένης μεθόδου και της προσαρμογής των δεδομένων, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην υπό-ενότητα 3.2.4:



Εικόνα 11: Προσαρμογή γραμμικού προτύπου στα δεδομένα της μελέτης

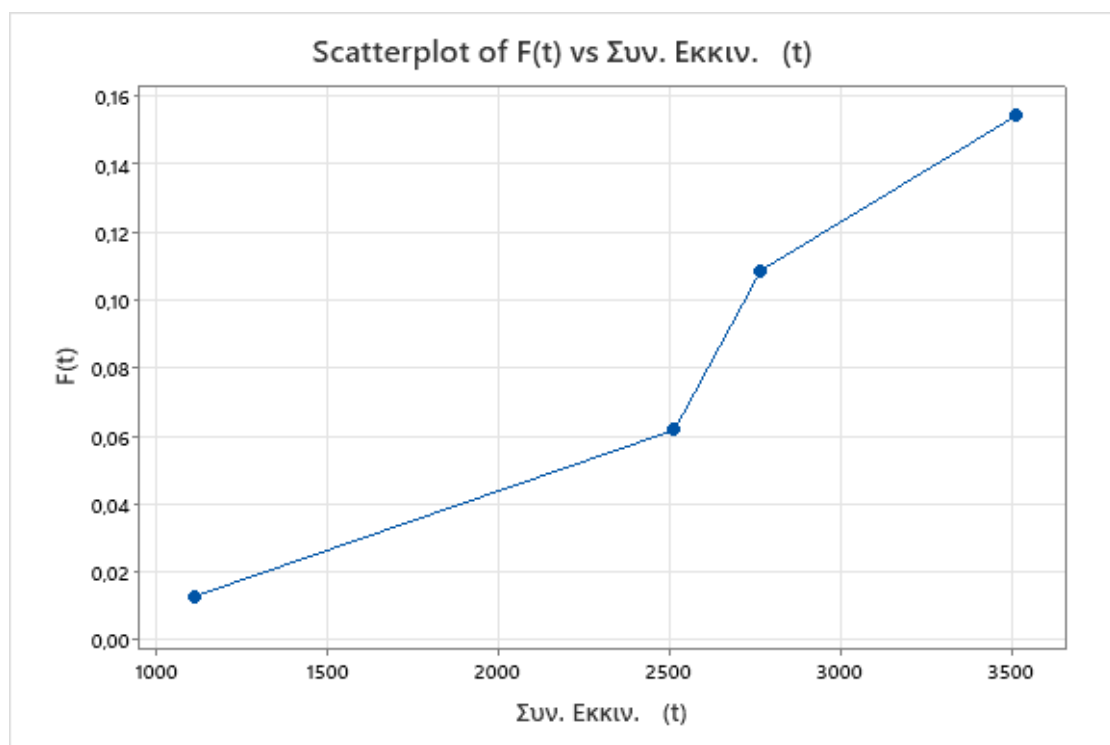
Παρατηρείται γραφικά καλή προσαρμογή των δεδομένων στο πρότυπο παλινδρόμησης. Ωστόσο οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν απευθείας μέσω MINITAB έχουν μια μικρή απόκλιση, λόγω της χρήσης της πιθανότητας διάμεσης βαθμίδας και της διορθωμένης κατάταξης.

Από τις τιμές των συντελεστών προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- $1 < \beta < 4$: Ο ρυθμός εμφάνισης αστοχιών είναι αυξανόμενος και το υλικό υφίσταται γήρανση.
- $\eta = 7661,9$: Υπάρχει πιθανότητα 63,2% κάθε υλικό να αστοχήσει στις 7662 εκκινήσεις. Ή το 63,2% του πληθυσμού αναμένεται να αστοχήσει στις 7662 εκκινήσεις.

4.1.4.1.3 Ερμηνεία Διαγράμματος Weibull

Για τα ζεύγη $(t, F(t))$ των δεδομένων αστοχίας το διάγραμμα Weibull και βάσει των βημάτων της υπό-ενότητας 3.3 προκύπτει ως εξής:



Εικόνα 12: Διάγραμμα Weibull για τον μηχανισμό αστοχίας «Ύπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο»

Το διάγραμμα δεν παρουσιάζει καμπύλη, οπότε αποκλείεται το ενδεχόμενο επιλογής λάθος κατανομής για την προσαρμογή των δεδομένων. Παρατηρείται ωστόσο μια αλλαγή κλίσης, ενδεικτική για την ύπαρξη διαφορετικών μηχανισμών αστοχίας στην μελέτη. Επειδή ο αριθμός των αστοχιών είναι μικρός και η ευθεία επανέρχεται στην αρχική της κλίση μετά το 3^ο σημείο θα γίνει η παραδοχή πως ο μηχανισμός αστοχίας είναι κοινός.

4.1.4.1.4 Πρόβλεψη Μελλοντικών αστοχιών

Η πρόβλεψη των μελλοντικών αστοχιών θα βασιστεί στην αρχική απαίτηση για την διαθεσιμότητα 15 Turbo-starters σε βάθος 2 ετών. Με βάση τον Πίνακα 6 αυτή την στιγμή διατίθενται 13 εν ενεργεία υλικά, εκ των οποίων 3 έχουν ήδη υποβληθεί παράταση του ορίου λειτουργίας τους για γενική επισκευή. Το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος είναι 2 έτη, ενώ η κόπωση του υλικού μεταφράζεται σε εκκινήσεις. Με βάση το ιστορικό πτήσεων του τελευταίου έτους και τον μελλοντικό προγραμματισμό το ημερολογιακό διάστημα των 2 ετών μεταφράστηκε σε 105 εκκινήσεις.

Συνεπώς με βάση τον παρακάτω πίνακα απαιτείται η χορήγηση παράτασης του ορίου λειτουργίας, δηλαδή του ορίου των 1500 εκκινήσεων (κίτρινο) και 1595 (πορτοκαλί) αντίστοιχα για τα 3 προαναφερόμενα υλικά στα 5 εν ενεργεία υλικά, με S/N 226, 648, 657, 223 και 653, και 2 ακόμα υλικά τα οποία είναι τώρα εκτός ενεργείας. Επιλέγονται στην πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών τα υλικά με S/N 994 και 1237. Αυτά είναι εκτός ενεργείας λόγω περιοδικής επιθεώρησης και θα επανέλθουν σε κατάσταση ενεργείας. Το S/N 994 θα ενταχθεί στο καθεστώς μελέτης για παράταση του ορίου λειτουργίας του (κίτρινο). Τα υπόλοιπα 9 υλικά (πράσινο) που μελετώνται δεν έχουν απαίτηση παράτασης του ορίου λειτουργίας τους, αφού έχουν υπόλοιπο εκκινήσεων μεγαλύτερο του 105.

Να σημειωθεί ότι τα εν ενεργεία υλικά, παρόλο που ορισμένα έχουν υψηλό συνολικό αριθμό εκκινήσεων (άρα και μεγαλύτερη κόπωση) θεωρούνται περισσότερο αξιόπιστα καθώς λειτουργούν καθημερινά, σε αντίθεση με εκτός ενεργείας υλικά που είναι ανενεργά για μεγάλο χρονικό διάστημα

Τοποθεσία	P/N	S/N	Εκκινήσεις 1ου Ο/Η	Εκκιν. από 1ο έως 2ο Ο/Η	Εκκ. από 2ο έως 3ο Ο/Η	Εκκ. από τελευταίο Ο/Η (ή από κατασκευή) έως σήμερα	Συν. Εκκιν.	Κατάσταση/ Λόγος αφαίρεσης	Παρατήρησης
ΕΑΒ	XXXX-01	128	994	1248	0	1474	3716	Περιοδική Επιθεώρηση Θ/Κ: 100 Εκκινήσεις	
Α/Φ 1	XXXX-03	226	1246	1497	0	1404	4147	ΕΝ/ΕΝ	
Α/Φ 2	XXXX-03	648	0	0	0	1531	1531	ΕΝ/ΕΝ	1η παράταση Ο/Η στις 1595
Α/Φ 3	XXXX-03	657	0	0	0	1569	1569	ΕΝ/ΕΝ	1η παράταση Ο/Η στις 1595
Α/Φ 4	XXXX-03	223	1248	1486	0	1447	4181	ΕΝ/ΕΝ	
Α/Φ 5	XXXX-03	189	1250	1492	0	971	3713	ΕΝ/ΕΝ	
Α/Φ 6	XXXX-03	224	1249	899	0	1352	3500	ΕΝ/ΕΝ	
Α/Φ 7	XXXX-03	184	1247	1496	0	49	2792	ΕΝ/ΕΝ	
Α/Φ 8	XXXX-03	653	0	0	0	1589	1589	ΕΝ/ΕΝ	1η παράταση Ο/Η στις 1595
Α/Φ 9	XXXX-01	200	1246	1495	1497	805	5043	ΕΝ/ΕΝ	
Α/Φ 10	XXXX-01	234	1253	1498	442	1070	4263	ΕΝ/ΕΝ	
Α/Φ 11	XXXX-01	231	1250	0	0	1393	2643	ΕΝ/ΕΝ	
Α/Φ 12	XXXX-01	233	1500	0	0	1266	2766	ΕΝ/ΕΝ	
Αποθήκη Εφεδρικών	XXXX-01	256	1237	1456	0	1208	3901	Περιοδική Επιθεώρηση: 1250 Εκκινήσεις	
Κέντρο Εφοδιασμού	XXXX-03	646	1495	0	0	57	1552	ΕΝ/ΕΝ	

Πίνακας 10: Δεδομένα των 15 Turbo-starter για την πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών

Επομένως θα υπολογιστεί η δεσμευμένη πιθανότητα αστοχίας όπως προβλέπει η ενότητα 2.4 για «χρονικό» διάστημα $u=105$ εκκινήσεις. Για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων $F(t)$ και $F(t+u)$ θα χρησιμοποιηθούν οι συνολικές εκκινήσεις, αφού όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της μελέτης ο μηχανισμός αστοχίας «ύπαρξη ρωγμής στο ακροφύσιο» αναφέρεται στην συνολική κόπωση του υλικού από την αρχή της λειτουργίας του. Οι υπολογισμοί και η πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

S/N	Εκκ. από τελευταίο Ο/Η (ή από κατασκευή) έως σήμερα	Συν. Εκκιν. (t)	u	t+u	F(t)	F(t+u)	P	Ftotal
128	1474	3716	105	3821	0,175001	0,185336	0,012527	0,154726
226	1404	4147	105	4252	0,218863	0,230091	0,014373	
648	1531	1531	105	1636	0,0252	0,029249	0,004154	
657	1569	1569	105	1674	0,026628	0,030796	0,004282	
223	1447	4181	105	4286	0,222477	0,233767	0,014521	
189	971	3713	105	3818	0,17471	0,185038	0,012514	
224	1352	3500	105	3605	0,154513	0,16434	0,011622	
184	49	2792	105	2897	0,095438	0,103363	0,008761	
653	1589	1589	105	1694	0,027396	0,031627	0,004349	
200	805	5043	105	5148	0,320011	0,332499	0,018365	
234	1070	4263	105	4368	0,231278	0,242715	0,014878	
231	1393	2643	105	2748	0,08472	0,092208	0,008182	
233	1266	2766	105	2871	0,093523	0,101373	0,00866	
256	1208	3901	105	4006	0,193367	0,204106	0,013313	
646	57	1552	105	1657	0,025984	0,030099	0,004225	

Πίνακας 11: Υπολογισμός μελλοντικής πιθανότητας αστοχίας σε βάθος 2 ετών

Η τιμή της Ftotal δηλώνει ότι σε βάθος 2 ετών ή 105 εκκινήσεων ο συνολικός αριθμός αναμενόμενων αστοχιών είναι 0,1547. Ωστόσο θα πρέπει να γίνει αναγωγή σε 5ετία και 10ετία προκειμένου να εκτιμηθεί ποιοτικά η πιθανότητα αστοχίας. Σε βάθος 10ετίας ο αριθμός των εκκινήσεων που προβλέπεται δεν είναι αμιγώς ανάλογος λόγω των ενδιάμεσων περιοδικών επιθεωρήσεων και αναμένεται το πολύ σε 400 εκκινήσεις. Επομένως επαναλαμβάνοντας τους ίδιους υπολογισμούς, προκύπτει ο Πίνακας 11. Άρα σε βάθος 10ετίας αναμένεται να αστοχήσουν 0,61 υλικά. Με βάση τον Πίνακα 3 η πιθανότητα αστοχίας εμπίπτει στην κατηγορία «Μικρή».

S/N	Εκκ. από τελευταίο Ο/Η (ή από κατασκευή) έως σήμερα	Συν. Εκκιν. (t)	u	t+u	F(t)	F(t+u)	P	Ftotal	u 10ετίας	t+u10ετίας	F 10ετίας	P 10ετίας	Ftotal 10ετίας
128	1474	3716	105	3821	0,175001	0,185336	0,012527	0,154726	400	4116	0,2155868	0,049195	0,612218677
226	1404	4147	105	4252	0,218863	0,230091	0,014373		400	4547	0,2626188	0,056015	
648	1531	1531	105	1636	0,0252	0,029249	0,004154		400	1931	0,0423822	0,017627	
657	1569	1569	105	1674	0,026628	0,030796	0,004282		400	1969	0,0442628	0,018118	
223	1447	4181	105	4286	0,222477	0,233767	0,014521		400	4581	0,2664534	0,056559	
189	971	3713	105	3818	0,17471	0,185038	0,012514		400	4113	0,2152707	0,049148	
224	1352	3500	105	3605	0,154513	0,16434	0,011622		400	3900	0,193266	0,045835	
184	49	2792	105	2897	0,095438	0,103363	0,008761		400	3192	0,1272219	0,035137	
653	1589	1589	105	1694	0,027396	0,031627	0,004349		400	1989	0,0452699	0,018377	
200	805	5043	105	5148	0,320011	0,332499	0,018365		400	5443	0,3680336	0,070623	
234	1070	4263	105	4368	0,231278	0,242715	0,014878		400	4663	0,275768	0,057875	
231	1393	2643	105	2748	0,08472	0,092208	0,008182		400	3043	0,1148824	0,032955	
233	1266	2766	105	2871	0,093523	0,101373	0,00866		400	3166	0,125027	0,034754	
256	1208	3901	105	4006	0,193367	0,204106	0,013313		400	4301	0,2353959	0,052104	
646	57	1552	105	1657	0,025984	0,030099	0,004225		400	1952	0,0434161	0,017898	

Πίνακας 12: Πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών σε βάθος 10 ετίας

4.1.4.2 Αστοχία Άξονα Περιστροφής

Το δεύτερο σκέλος της μελέτης επικινδυνότητας χρήσης του Turbo-starter θα γίνει επίσης με χρήση της κατανομής Weibull 2 παραμέτρων, θεωρώντας αυτή την φορά ως αστοχία την θραύση του άξονα περιστροφής. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, ο άξονας περιστροφής του Turbo-starter επιθεωρείται και, σε περίπτωση φθοράς, αντικαθίσταται κατά την γενική επισκευή. Συνεπώς, η κόπωση του υλικού ως προς τον συγκεκριμένο μηχανισμό αστοχίας μετράται μεταξύ των γενικών επισκευών. Αυτό σημαίνει ότι τα υλικά τα οποία έχουν περάσει μία τουλάχιστον γενική επισκευή θεωρούνται καινούργια υλικά ως προς τον μελετώμενο μηχανισμό αστοχίας, γιατί και θα συμβολιστούν διαφορετικά. Για παράδειγμα, το S/N 61 έχει περάσει δύο γενικές επισκευές και μετά το 2^ο Ο/Η έχει πραγματοποιήσει άλλες 77 εκκινήσεις. Στην μελέτη θα θεωρηθεί ως τρία διαφορετικά υλικά με S/N 61A, 61B και 61C με τις αντίστοιχες κοπώσεις 1192, 1497 και 77. Επομένως, από τα δεδομένα του Πίνακα 16 θα προκύψει ο εξής πίνακας τμηματικής και πλήρης πληροφορίας:

A/A	S/N	Εκκινήσεις (t)	Κατάσταση	A/A	S/N	Εκκινήσεις (t)	Κατάσταση
1	184 C	49	EN/EN	56	655 A	1426	EN/EN
2	646 B	57	EN/EN	57	223 C	1447	EN/EN
3	61 C	77	EN/EN	58	256 B	1456	EN/EN
4	186 B	238	EN/EN	59	235 C	1468	EN/EN
5	240 B	342	EN/EN	60	128 C	1474	EN/EN
6	234 C	442	EN/EN	61	640	1474	EN/EN
7	462 B	636	EN/EN	62	185 B	1476	EN/EN
8	279 B	754	EN/EN	63	283 C	1478	EN/EN
9	192 C	777	EN/EN	64	255 B	1480	EN/EN
10	200 D	805	EN/EN	65	462 A	1482	EN/EN
11	224 B	899	EN/EN	66	223 B	1486	EN/EN
12	655 B	919	EN/EN	67	192 B	1489	EN/EN
13	259 C	937	EN/EN	68	189 B	1492	EN/EN
14	189 C	971	EN/EN	69	182 A	1493	EN/EN
15	128 A	994	EN/EN	70	283 B	1494	EN/EN
16	168 A	1000	EN/EN	71	646 A	1495	EN/EN
17	182 B	1020	EN/EN	72	200 B	1495	EN/EN
18	234 D	1070	EN/EN	73	263 B	1495	EN/EN
19	645	1114	EN/EN	74	649	1496	EN/EN
20	249 B	1124	EN/EN	75	184 B	1496	EN/EN
21	253 B	1143	EN/EN	76	61 B	1497	EN/EN
22	466 B	1156	EN/EN	77	226 B	1497	EN/EN
23	61 A	1192	EN/EN	78	168 C	1497	EN/EN
24	253 C	1205	Αστοχία	79	200 C	1497	EN/EN
25	256 C	1208	EN/EN	80	240 A	1497	EN/EN
26	256 A	1237	EN/EN	81	258	1497	EN/EN
27	185 A	1243	EN/EN	82	80 B	1498	EN/EN
28	192 A	1244	EN/EN	83	234 B	1498	EN/EN
29	283 A	1245	EN/EN	84	147	1499	EN/EN
30	226 A	1246	EN/EN	85	248 B	1499	EN/EN
31	200 A	1246	EN/EN	86	168 B	1499	EN/EN
32	184 A	1247	EN/EN	87	235 B	1499	EN/EN
33	268 A	1247	EN/EN	88	273 B	1499	EN/EN
34	128 B	1248	EN/EN	89	259 B	1500	EN/EN
35	255 A	1248	EN/EN	90	216	1500	EN/EN
36	223 A	1248	EN/EN	91	617	1500	EN/EN
37	253 A	1249	EN/EN	92	647	1500	EN/EN
38	224 A	1249	EN/EN	93	233 A	1500	EN/EN
39	235 A	1249	EN/EN	94	247	1500	EN/EN
40	466 A	1250	EN/EN	95	263 C	1500	EN/EN
41	186 A	1250	EN/EN	96	279 A	1500	EN/EN
42	248 A	1250	EN/EN	97	464 A	1500	EN/EN
43	249 A	1250	EN/EN	98	464 B	1500	EN/EN
44	189 A	1250	EN/EN	99	268 B	1500	EN/EN
45	231 A	1250	EN/EN	100	268 C	1500	EN/EN
46	263 A	1251	EN/EN	101	648	1531	EN/EN
47	234 A	1253	EN/EN	102	273 C	1533	EN/EN
48	259 A	1256	EN/EN	103	657	1569	EN/EN
49	80 A	1259	EN/EN	104	654	1581	EN/EN
50	273 A	1259	EN/EN	105	653	1589	EN/EN
51	233 B	1266	EN/EN	106	656	1595	EN/EN
52	224 C	1352	EN/EN	107	651	1599	EN/EN
53	231 B	1393	EN/EN	108	650	1600	EN/EN
54	226 C	1404	EN/EN	109	652	1600	EN/EN
55	251	1407	Αστοχία				

Πίνακας 13: Δεδομένα τμηματικής και πλήρους πληροφoρίας για τον μηχανισμό «Θραύση άξονα περιστροφής».

4.1.4.2.1 Υπολογισμός συντελεστών Weibull

Ο υπολογισμός, μπορεί να γίνει απευθείας με την χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, αφού και πάλι το πλήθος των αστοχιών είναι πολύ μικρό για την επιλογή της μεθόδου μέγιστης πιθανοφάνειας. Ωστόσο, μπορεί να γίνει και έλεγχος Anderson-Darling και υπολογισμός των συντελεστών με χρήση MINITAB. Επομένως, για την Μέγιστη Πιθανοφάνεια προκύπτει $AD_{\max likelihood} = 50,372$ και οι εξής συντελεστές:

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Standard 95,0% Normal CI		
		Error	Lower	Upper
Shape	8,05235	4,91138	2,43640	26,6132
Scale	2314,80	668,636	1314,14	4077,42

Αντιστοίχως, για την Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων προκύπτει $AD_{leastsquare} = 50,372$ και οι συντελεστές:

Parameter Estimates

Parameter	Estimate
Shape	7,17571
Scale	2328,47

Παρόλο που οι συντελεστές Anderson-Darling είναι ίσοι, θα προτιμηθούν οι παράμετροι που προκύπτουν από τα Ελάχιστα Τετράγωνα αφού χρησιμοποιούνται δεδομένα 2 αστοχιών, τα οποία προσαρμόζονται τέλεια στο γραμμικό πρότυπο. Συνεπώς, $\beta=7,1757$ και $\eta=2328,5$. Οι τιμές των παραμέτρων Weibull καταδεικνύουν ότι ο ρυθμός αστοχίας του άξονα περιστροφής είναι αυξανόμενος με ταχεία μάλιστα φθορά. Επιπλέον, αναμένεται το 63,2% του πληθυσμού να αστοχήσει με τον εν λόγω μηχανισμό στις 2328,5 εκκινήσεις.

Στην συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης η κατασκευή του διαγράμματος Weibull είναι περιττή, αφού υπάρχουν μόνο δύο ζεύγη τιμών αστοχίας (δύο σημεία.), δηλαδή το διάγραμμα θα είναι υποχρεωτικά ευθεία γραμμή.

4.1.4.2.2 Υπολογισμός Μελλοντικών Αστοχιών

Η πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών σε βάθος 2 ετών θα μεταφραστεί και πάλι σε κόπωση 105 εκκινήσεων και θα υπολογισθεί για τα ίδια 15 S/N υλικών που επιλέχθηκαν και στην μελέτη του μηχανισμού αστοχίας της υπό-ενότητας 4.1.4.2. Η μοναδική διαφορά είναι ότι οι 105 εκκινήσεις θα προστεθούν στις εκκινήσεις που πραγματοποιήθηκαν μετά την τελευταία γενική επισκευή. Για παράδειγμα, για το S/N 128, η πιθανότητα θα υπολογιστεί για το 128C όπου έχει πραγματοποιήσει 1474 εκκινήσεις. Επιπλέον, δεδομένου ότι υπάρχουν υλικά που έχουν ήδη παρατείνει το προτεινόμενο από τον κατασκευαστή όριο λειτουργίας, θα τεθεί ως ανώτατο όριο οι $1500+105=1605$ εκκινήσεις του υλικού για γενική επισκευή. Επομένως, η τιμή της μελλοντικής κόπωσης u θα λαμβάνει τιμές έως 105 εκκινήσεις, προκειμένου να τηρηθεί ο ανωτέρω περιορισμός. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

S/N	Εκκινήσεις (t)	u	t+u	F(t)	F(t+u)	P	Ftotal
128	1474	105	1579	0,036891105	0,05973054	0,02371428	0,152284
226	1404	105	1509	0,026163088	0,04350788	0,01781077	
648	1531	74	1605	0,048153192	0,06690342	0,01969878	
657	1569	36	1605	0,057146205	0,06690342	0,01034859	
223	1447	105	1552	0,03238295	0,05296504	0,0212709	
189	971	105	1076	0,001878675	0,00392097	0,00204614	
224	1352	105	1457	0,02001874	0,03399531	0,01426208	
184	49	105	154	9,2728E-13	3,4345E-09	3,4336E-09	
653	1589	16	1605	0,062410446	0,06690342	0,00479204	
200	805	105	910	0,000489648	0,0011798	0,00069049	
234	1070	105	1175	0,003767046	0,00736103	0,00360757	
231	1393	105	1498	0,024745227	0,0413293	0,01700487	
233	1266	105	1371	0,012539129	0,02210376	0,00968608	
256	1208	105	1313	0,008972285	0,01625732	0,00735098	
646	57	105	162	2,74475E-12	4,9396E-09	4,9368E-09	

Πίνακας 14: Πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών σε βάθος 2 ετών

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ανωτέρω πίνακα αναμένεται σε βάθος 2 ετών ή 105 εκκινήσεων να αστοχήσουν 0,152 υλικά λόγω του άξονα περιστροφής. Ο υπολογισμός σε βάθος 10ετίας ή 400 εκκινήσεων δίνει τα εξής αποτελέσματα:

S/N	Εκκινήσεις (t)	u	t+u	F(t)	F(t+u)	P	Ftotal	u 10ετίας	t+u 10ετίας	F 10ετίας	P 10ετίας	Ftotal 10ετίας
128	1474	105	1579	0,036891105	0,05973054	0,02371428	0,152284	400	1874	0,189833366	0,15880059	1,481515512
226	1404	105	1509	0,026163088	0,04350788	0,01781077		400	1804	0,148021905	0,125132674	
648	1531	74	1605	0,048153192	0,06690342	0,01969878		400	1931	0,229727581	0,190760096	
657	1569	36	1605	0,057146205	0,06690342	0,01034859		400	1969	0,259319333	0,214426806	
223	1447	105	1552	0,03238295	0,05296504	0,0212709		400	1847	0,172789193	0,145105176	
189	971	105	1076	0,001878675	0,00392097	0,00204614		400	1371	0,022103757	0,02026315	
224	1352	105	1457	0,02001874	0,03399531	0,01426208		400	1752	0,121787736	0,103847901	
184	49	105	154	9,2728E-13	3,4345E-09	3,4336E-09		400	449	7,42324E-06	7,42324E-06	
653	1589	16	1605	0,062410446	0,06690342	0,00479204		400	1989	0,275855016	0,227652462	
200	805	105	910	0,000489648	0,0011798	0,00069049		400	1205	0,008814317	0,008328747	
234	1070	105	1175	0,003767046	0,00736103	0,00360757		400	1470	0,036191777	0,032547339	
231	1393	105	1498	0,024745227	0,0413293	0,01700487		400	1793	0,142141287	0,120374761	
233	1266	105	1371	0,012539129	0,02210376	0,00968608		400	1666	0,086524849	0,074925216	
256	1208	105	1313	0,008972285	0,01625732	0,00735098		400	1608	0,067774661	0,059334744	
646	57	105	162	2,74475E-12	4,9396E-09	4,9368E-09		400	457	8,42616E-06	8,42616E-06	

Πίνακας 15: Πρόβλεψη αστοχιών σε βάθος 10ετίας

Συνεπώς, σε βάθος 10ετίας αναμένεται να αστοχήσουν 1,48 υλικά με τον υπό μελέτη μηχανισμό αστοχίας. Με βάση τον Πίνακα 3 η πιθανότητα αστοχίας προκύπτει «Μέτρια».

4.1.5 Εκτίμηση Επικινδυνότητας

Έγιναν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την μελέτη της συμπεριφοράς 15 Turbo-starter ως προς τον μηχανισμό αστοχίας:

- «Υπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο» σε βάθος 2 ετών: Η πιθανότητα αστοχίας των υλικών είναι «Μικρή» και η δριμύτητα είναι «Μέτρια». Συνεπώς, βάσει του Πίνακα 2 η επικινδυνότητα προκύπτει «Μικρή» ή Δ.
- «Αστοχία άξονα περιστροφής» σε βάθος 2 ετών: Η πιθανότητα αστοχίας των υλικών είναι «Μέτρια» και η δριμύτητα είναι «Υψηλή». Συνεπώς, βάσει του Πίνακα 2 η επικινδυνότητα προκύπτει «Μεγάλη» ή Β.
- «Διαρροή ελαίου από τον θάλαμο καύσης»: Η δριμύτητα εκτιμήθηκε μικρή, οπότε βάσει του Πίνακα 2 η επικινδυνότητα τίθεται αυτομάτως στην κατηγορία «Μικρή» ή Δ.

Επικινδυνότητα					
		Δριμύτητα			
		Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη	Υψηλή
Πιθανότητα	Μικρή	Διαρροή ελαίου Θ/Κ	Υπαρξη ρωγμών στο ακροφύσιο		
	Μέτρια			Αστοχία άξονα περιστροφής	
	Μεγάλη				
	Υψηλή				

Πίνακας 16: Εκτίμηση επικινδυνότητας μελετώμενων μηχανισμών αστοχίας Turbostarter

Η μελέτη αφορά την συμπεριφορά του υλικού Turbo-starter ως προς όλους τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας. Επομένως, η εκτίμηση της επικινδυνότητας θα λάβει την δυσμενέστερη των περιπτώσεων τιμή, δηλαδή κρίνεται «Υψηλή». Η επικινδυνότητα είναι μη αποδεκτή και θα πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα ελέγχου για την μείωση της.

Ως προτεινόμενο μέτρο μείωσης τίθεται ο περιορισμός εκκινήσεων για τα 3 υλικά που ήδη λειτουργούν σε καθεστώς παράτασης του ορίου λειτουργίας τους στις 325 εκκινήσεις σε βάθος 10ετίας. Τότε η νέα τιμή πιθανότητας μελλοντικών αστοχιών προβλέπει 1,3 υλικά σε βάθος 10ετίας, το οποίο δεν αλλάζει την κατηγορία της επικινδυνότητας. Περαιτέρω περιορισμός ωρών προκαλεί αλλοίωση του προγράμματος πτήσεων.

Ως δεύτερο προτεινόμενο μέτρο ορίζεται η μείωση της διαθεσιμότητας των υλικών από 15 σε 13: αφαιρούνται τα υλικά με S/N 648 και 653 και στο S/N 657 τίθεται ο ανωτέρω περιορισμός εκκινήσεων. Τότε, η πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών είναι 0,99 υλικά σε βάθος 10ετίας που μπορεί οριακά να τεθεί στην κατηγορία της «Μέτριας» επικινδυνότητας, που είναι αποδεκτή.

Τέλος τονίζεται, πως η εκτίμηση είναι αρκετά συντηρητική αφού το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος είναι τα 2 έτη και όχι τα 10. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί πως στα επόμενα δύο έτη η εκμετάλλευση των 13 Turbo-starter του παρακάτω πίνακα είναι ανεκτής επικινδυνότητας:

S/N	Προηγούμενη Παράταση	Παρατηρήσεις
128	Όχι	Χορήγηση παράτασης στις 1579
226	Όχι	Χορήγηση παράτασης στις 1509
657	Παράταση στις 1595	Χορήγηση παράτασης στις 1605
223	Όχι	Χορήγηση παράτασης στις 1552
189	Όχι	
224	Όχι	
184	Όχι	
200	Όχι	
234	Όχι	
231	Όχι	
233	Όχι	
256	Όχι	
646	Όχι	

Πίνακας 17: Τελική λίστα turbo-starter για εκμετάλλευση σε βάθος 2 ετών

4.2 Μελέτη Περίπτωσης Υλικού με ημερολογιακή κόπωση- Χωρίς Αστοχία

Η συγκεκριμένη μελέτη επικινδυνότητας αφορά την μελλοντική λειτουργία του διαμοιραστή ροής υψηλής πίεσης (Connecting Block) του μαχητικού αεροσκάφους Mirage 2000-5. Οι απαιτήσεις πτήσεων της πολεμικής μοίρας που φιλοξενεί τον εν λόγω τύπο, απαιτούν την διαθεσιμότητα σε 18 τουλάχιστον Connecting Block σε βάθος ενός έτους μέχρι την παραλαβή νέων υλικών και υλικών που έχουν ήδη σταλεί για γενική επισκευή. Η αναγκαιότητα των 18 Connecting Block απαιτεί την επέκταση του ορίου λειτουργίας κάποιων από τον υπάρχοντα πληθυσμό, προκειμένου να καλυφθεί η απαίτηση. Επομένως θα πραγματοποιηθεί μελέτη για να εκτιμηθεί η επικινδυνότητα χρήσης των Connecting Block που θα αξιοποιηθούν στο επόμενο έτος. Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη συλλέχθηκαν στοιχεία από 59 συνολικά υλικά.

4.2.1 Περιγραφή Connecting Block και μηχανισμών αστοχίας

Το Connecting Block είναι υπεύθυνο να διαμοιράζει το υπό πίεση υδραυλικό υγρό στα Βοηθητικά Συστήματα σε κάθε ένα εκ των δύο υδραυλικών κυκλωμάτων του σκάφους. Αποτελείται από το Κύριο Σώμα (Body) και την Δεξαμενή (Reservoir). Επίσης περιέχει το Φίλτρο (Filter Element) το οποίο διασφαλίζει την μη ύπαρξη ανεπιθύμητων σωματιδίων εντός του υδραυλικού υγρού. Επιπροσθέτως περιλαμβάνεται εντός του μείζονος υλικού ο Ενδείκτης Απόφραξης (Clogging Indicator) ο οποίος γίνεται εμφανής όταν η διαφορά πίεσης στα δύο πλευρές του φίλτρου είναι 10 bar. Τέλος το υλικό Connecting Block περιλαμβάνει την Βαλβίδα μη επιστροφής (Non Return Valve) η οποία αποτρέπει την ανάστροφη ροή του υδραυλικού και τον Διακόπτη Πίεσης (Pressure pick-off).

Για κάθε ένα εκ των δύο υδραυλικών κυκλωμάτων του αεροσκάφους υπάρχει ένα Connecting Block με διαφορετικό αριθμό ονομαστικού, XXXX-3 για το δεξί Connecting Block και XXXX-4 για το αριστερό και θα μελετηθούν ξεχωριστά. Συγκεκριμένα διατίθενται για μελέτη 26 R/H Connecting Block και 33 L/H Connecting Block. Το υλικό παρακολουθείται ως προς την ημερολογιακή του κόπωση και υπόκειται σε γενική επισκευή (Overhaul) ανά 18 έτη.

Η περιγραφή των μηχανισμών αστοχίας θα βασιστεί στα ιστορικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από τα μητρώα των υλικών και στην εμπειρία των τεχνικών συντήρησης. Πιο συγκεκριμένα, βάσει ιστορικών στοιχείων, έχουμε:

- i. Εμφάνιση του ενδείκτη απόφραξης: Η εμφάνιση του ενδείκτη σηματοδοτεί την έμφραξη του φίλτρου εσωτερικά του υλικού. Η έμφραξη του φίλτρου είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης πολλών σωματιδίων εντός του υλικού που προκαλούν διαφορά πίεσης πριν και μετά από αυτό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πτώση πίεσης στο επηρεαζόμενο υδραυλικό κύκλωμα και την μη κανονική λειτουργία του συστήματος.
- ii. Διαρροή υδραυλικού υγρού από το φίλτρο.
- iii. Διαρροή υδραυλικού υγρού από τον ενδείκτη απόφραξης.

Βάσει της εμπειρίας των τεχνικών ως πιθανός μηχανισμός αστοχίας μπορεί να θεωρηθεί και η δομική αστοχία κάποιου από τα κύρια μέρη του υλικού, η οποία δύναται

να προκαλέσει πλήρη απώλεια του υδραυλικού υγρού του κυκλώματος και επομένως την ολική αδυναμία λειτουργείας του εμπλεκόμενου συστήματος.

4.2.1.1.1 Παρουσίαση Δεδομένων

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα απαραίτητα για την μελέτη δεδομένα των 59 υπό μελέτη Connecting Block. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν:

- S/N: τον μοναδικό αριθμό σειράς κάθε υλικού,
- P/N: τον ονομαστικό αριθμό μοντέλου
- Τοποθεσία: την τωρινή τοποθεσία των υλικών (είτε τοποθετημένα σε σκάφη, είτε σε συνεργείο, είτε εφεδρικά)
- Μήνες από κατασκευή έως 1^ο O/H: την ημερολογιακή κόπωση σε μήνες που έχουν λάβει χώρα από την κατασκευή του υλικού μέχρι να υποβληθεί πρώτη φορά σε γενική επισκευή
- 1^ο O/H: ο μήνας και έτος που υποβλήθηκε το υλικό πρώτη φορά σε γενική επισκευή
- Μήνες από 1^ο έως 2^ο O/H: η ημερολογιακή κόπωση σε μήνες που έχουν λάβει χώρα αφού το υλικό υποβλήθηκε για πρώτη φορά σε γενική επισκευή έως την δεύτερη γενική επισκευή, δηλαδή μεταξύ των γενικών επισκευών.
- 2^ο O/H: ο μήνας και έτος που υποβλήθηκε το υλικό για δεύτερη φορά σε γενική επισκευή
- Μήνες από 2^ο έως 3^ο O/H: η ημερολογιακή κόπωση σε μήνες που έχουν λάβει χώρα αφού το υλικό υποβλήθηκε για δεύτερη φορά σε γενική επισκευή έως την τρίτη γενική επισκευή
- Υπόλοιπο έως επόμενο O/H (έτη): το ημερολογιακό υπόλοιπο σε έτη που απομένει σε κάθε υλικό έως την επόμενη προγραμματισμένη γενική επισκευή,
- Υπόλοιπο έως επόμενο O/H (μήνες): το ημερολογιακό υπόλοιπο σε μήνες που απομένει σε κάθε υλικό έως την επόμενη προγραμματισμένη γενική επισκευή. Επισημαίνεται πως τα κελιά με κόκκινο χρώμα, στα οποία ο χρόνος είναι αρνητικός, δηλώνουν ότι η ημερομηνία του O/H έχει παρέλθει χωρίς αυτό να πραγματοποιηθεί. Συνεπώς αυτά τα υλικά είναι «ληγμένα» ως προς την γενική τους επισκευή εδώ και χρονικό διάστημα ίσο με την απόλυτη τιμή του κελιού.

Τοποθεσία	A/A	S/N	P/N	Ημερ. Κατασκευής	Μήνες από κατασκευή έως 1ο ΟΗ	1ο ΟΗ	Μήνες από 1ο έως 2ο ΟΗ	2ο ΟΗ	Μήνες από 2ο έως 3ο ΟΗ	Υπόλοιπο εως επόμενο ΟΗ (Ετη)	Υπόλοιπο εως επόμενο ΟΗ (Μήνες)
A/Φ 1	1	416	XXXX-4	Οκτ-86	216	Δεκ-01	216	Νοε-19	27,23	15,73	188,77
A/Φ 2	2	353	XXXX-4	Ιαν-86	216	Απρ-01	216	Απρ-18	45,73	14,19	170,27
A/Φ 3	3	1339	XXXX-4	Φεβ-06	192,57					1,95	23,43
A/Φ 4	4	625	XXXX-4	Ιαν-89	216	Μαρ-04	215,17		215,17	0,07	0,83
A/Φ 5	5	892	XXXX-4	Ιουλ-92	216	Ιουν-08	164,23		164,23	4,31	51,77
A/Φ 6	6	638	XXXX-4	Φεβ-89	216	Μαρ-04	215,17		215,17	0,07	0,83
A/Φ 7	7	1340	XXXX-4	Φεβ-06	192,57				192,57	1,95	23,43
A/Φ 8	8	190	XXXX-4	Δεκ-84	216	Σεπ-00	216	Ιουλ-16	67,47	12,38	148,53
A/Φ 9	9	281	XXXX-4	Σεπ-85	216	Νοε-00	216	Ιουλ-16	67,47	12,38	148,53
A/Φ 10	10	566	XXXX-4	Απρ-88	216	Σεπ-00	216	Ιουν-19	31,80	15,35	184,20
Αποθήκη Εφεδρικών	11	606(605??)	XXXX-4	Νοε-88	216	Δεκ-03	218,23		218,23	-0,19	-2,23
A/Φ 11	12	617	XXXX-4	Φεβ-89	216	Μαρ-04	214,97		214,97	0,09	1,03
Αποθήκη Εφεδρικών	13	1327	XXXX-4	Σεπ-03	221,57		221,57		221,57	-0,46	-5,57
Αποθήκη Εφεδρικών	14	587	XXXX-4	Ιουν-88	216	Ιουλ-03	222,77		222,77	-0,56	-6,77
Αποθήκη Εφεδρικών	15	577	XXXX-4	Ιουν-88	216	Ιουλ-03	222,90		222,90	-0,57	-6,90
Αποθήκη Εφεδρικών	16	596	XXXX-4	Ιουλ-88	216	Σεπ-03	221,27		221,27	-0,44	-5,27
Αποθήκη Εφεδρικών	17	576	XXXX-4	Ιουν-88	216	Ιουλ-03	223,23		223,23	-0,60	-7,23
2ος Β.Σ	18	1306	XXXX-4	Μαϊ-03	225,57		225,57		225,57	-0,80	-9,57
ΜΣΒ	19	547	XXXX-4	Απρ-88	216	Μαϊ-03	224,93		224,93	-0,74	-8,93
2ος Β.Σ	20	201	XXXX-4	Ιαν-85	216	Μαϊ-00	261,47		261,47	-3,79	-45,47
ΕΑΒ	21	568	XXXX-4	Απρ-88	216	Απρ-03	225,83		225,83	-0,82	-9,83
ΕΑΒ	22	1231	XXXX-4	Νοε-01	243,57		243,57		243,57	-2,30	-27,57
ΕΑΒ	23	192	XXXX-4	Ιαν-85	216	Απρ-00	262,57		262,57	-3,88	-46,57
2ος Β.Σ	24	1303	XXXX-4	Απρ-03	226,57		226,57		226,57	-0,88	-10,57
2ος Β.Σ	25	513	XXXX-4	Νοε-87	216	Δεκ-02	229,83		229,83	-1,15	-13,83
2ος Β.Σ	26	490	XXXX-4	Σεπ-87	216	Οκτ-02	232,10		232,10	-1,34	-16,10
2ος Β.Σ	27	1305	XXXX-4	Απρ-03	226,57		226,57		226,57	-0,88	-10,57
2ος Β.Σ	28	1304	XXXX-4	Απρ-03	226,57		226,57		226,57	-0,88	-10,57
Κέντρο Εφοδιασμού	29	1310	XXXX-4	Ιουν-03	224,57		224,57		224,57	-0,71	-8,57
Κέντρο Εφοδιασμού	30	1285	XXXX-4	Μαρ-03	227,57		227,57		227,57	-0,96	-11,57
Κέντρο Εφοδιασμού	31	595	XXXX-4	Ιουλ-88	216	Αυγ-03	222,57		222,57	-0,55	-6,57
Κέντρο Εφοδιασμού	32	1328	XXXX-4	Σεπ-03	221,57		221,57		221,57	-0,46	-5,57
Κέντρο Εφοδιασμού	33	1307	XXXX-4	Μαϊ-03	225,57		225,57		225,57	-0,80	-9,57

Πίνακας 18: Ιστορικά στοιχεία L/H Connecting Block

Τοποθεσία	A/A	S/N	P/N	Ημερ. Κατασκευής	Μήνες από κατασκευή έως 1ο ΟΗ	1ο ΟΗ	Μήνες από 1ο έως 2ο ΟΗ	2ο ΟΗ	Μήνες από 2ο έως 3ο ΟΗ	Υπόλοιπο εως επόμενο ΟΗ (Ετη)	Υπόλοιπο εως επόμενο ΟΗ (Μήνες)
A/Φ 1	1	488	XXXX-3	Ιουλ-87	216	Μαρ-99	216	Νοε-18	38,97	14,75	177,03
A/Φ 2	2	183	XXXX-3	Νοε-84	216	Σεπ-00	216	Μαϊ-16	69,30	12,23	146,70
A/Φ 3	3	631	XXXX-3		216	Ιουν-19	32,17		32,17	15,32	183,83
A/Φ 4	4	376	XXXX-3	Απρ-86	216	Ιουν-01	216	Ιουν-19	32,17	15,32	183,83
A/Φ 5	5	484	XXXX-3	Ιουν-86	216	Νοε-00	216	Μαϊ-16	69,30	12,23	146,70
A/Φ 6	6	497	XXXX-3	Σεπ-87	216	Οκτ-02	216	Ιουν-19	32,17	15,32	183,83
Αποθήκη Εφεδρικών	7	1301	XXXX-3	Μαϊ-03	225,57		225,57		225,57	-0,80	-9,57
A/Φ 7	8	620	XXXX-3	Ιαν-89	220,57	Ιουν-19	32,17		32,17	15,32	183,83
A/Φ 8	9	542	XXXX-3	Φεβ-88	192,57	Μαρ-03	216	Ιουν-19	32,17	15,32	183,83
A/Φ 9	10	526	XXXX-3	Ιαν-88	225,57	Απρ-02	216	Ιουν-19	32,17	15,32	183,83
332M	11	583	XXXX-3	Ιουν-88	225,57	Ιουλ-03	223,23		223,23	-0,60	-7,23
332M	12	1331	XXXX-3	Οκτ-03	220,57		220,57		220,57	-0,38	-4,57
332M	13	623	XXXX-3	Ιαν-89	225,57	Φεβ-04	216,03		216,03	0,00	-0,03
332M	14	590	XXXX-3	Ιουν-88	216	Ιουλ-03	222,90		222,90	-0,57	-6,90
A/Φ 10	15	1341	XXXX-3	Φεβ-06	192,57		192,57		192,57	1,95	23,43
332M	16	656	XXXX-3	Ιαν-89	216	Φεβ-04	216,43		216,43	-0,04	-0,43
332M	17	601	XXXX-3	Αυγ-88	216	Σεπ-03	220,77		220,77	-0,40	-4,77
332M	18	523	XXXX-3	Ιαν-88	216	Μαρ-03	227,43		227,43	-0,95	-11,43
A/Φ 11	19	612	XXXX-3	Νοε-88	216	Μαϊ-09	152,87		152,87	5,26	63,13
ΜΣΒ	20	1299	XXXX-3	Μαϊ-03	225,57		225,57		225,57	-0,80	-9,57
ΕΑΒ	21	216	XXXX-3	Φεβ-85	216	Απρ-00	261,90		261,90	-3,83	-45,90
Κ.Τ	22	508	XXXX-3	Σεπ-87	216	Οκτ-02	232,10		232,10	-1,34	-16,10
Κ.Τ,	23	507	XXXX-3	Σεπ-87	216	Σεπ-02	232,60		232,60	-1,38	-16,60
Κ.Ε.	24	1293	XXXX-3	Μαϊ-03	225,57		225,57		225,57	-0,80	-9,57
Κ.Ε.	25	1292	XXXX-3	Μαϊ-03	225,57		225,57		225,57	-0,80	-9,57
Κ.Ε.	26	1291	XXXX-3	Μαϊ-03	225,57		225,57		225,57	-0,80	-9,57

Πίνακας 19: Ιστορικά στοιχεία R/H Connecting Bloc

4.2.2 Εκτίμηση Δριμύτητας

Η εκτίμηση της δριμύτητας θα προηγηθεί της εκτίμησης πιθανότητας, καθώς τόσο βάσει των στοιχείων από τα μητρώα των υλικών όσο και της γνώμης έμπειρων τεχνικών υπάρχει σοβαρή υποψία για μικρή δριμύτητα των μηχανισμών αστοχίας. Όπως και στην προηγούμενη μελέτη περίπτωσης μία τέτοια διαπίστωση καθιστά τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας περιττή διαδικασία.

4.2.2.1 Εμφάνιση ενδείκτη απόφραξης

Ο ενδείκτης απόφραξης όπως προαναφέρθηκε γίνεται εμφανής σε περίπτωση διαφοράς πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών του φίλτρου του υπό μελέτη υλικού. Η διαφορά πίεσης προκαλεί ανώμαλη ροή του υδραυλικού και μη κανονική λειτουργία του εμπλεκόμενου συστήματος, η οποία όμως δεν επηρεάζει την ασφαλή πτήση του σκάφους. Επίσης, ο ενδείκτης απόφραξης επιθεωρείται τόσο πριν όσο και μετά την πτήση κάθε σκάφους, βάσει εγχειριδίου συντήρησης. Συνεπώς:

- Ως δριμύτητα κόστους ορίζεται το κόστος αντικατάστασης του φίλτρου, το οποίο ανέρχεται στα 350€. Επομένως η δριμύτητα κόστους είναι στην κατηγορία «Μικρή»
- Όσον αφορά το προσωπικό που εμπλέκεται με την συγκεκριμένη εργασία δεν διατίθεται κανένας κίνδυνος τραυματισμού. Συνεπώς και η δριμύτητα τραυματισμού είναι «Μικρή»

Τελικά, η δριμύτητα του εν λόγω μηχανισμού εμπίπτει στην κατηγορία «Μικρή».

4.2.2.2 Διαρροή υγρού από το φίλτρο ή/και από τον ενδείκτη

Η διαρροή υδραυλικού υγρού από το φίλτρο ή/και τον ενδείκτη δύναται να προκαλέσει, έπειτα από μακρά παραμέληση της, την απώλεια σημαντικής ποσότητας υγρού και επομένως πίεσης από το εμπλεκόμενο υδραυλικό σύστημα. Ωστόσο, βάσει του εγχειριδίου συντήρησης του αεροσκάφους, πραγματοποιείται καθημερινά έλεγχος διαρροών στην περιοχή του Connecting Block. Βάσει επομένως της τηρούμενης συντήρησης, των ιστορικών στοιχείων που δεν αποδεικνύουν κανένα επισφαλές

περιστατικό, καθώς και λαμβάνοντας υπόψη την γνώμη έμπειρων τεχνικών, τόσο σε επίπεδο ανθρώπινου παράγοντα όσο και κόστους, η δριμύτητα χαρακτηρίζεται ως «Μικρή».

4.2.2.3 Δομική Αστοχία κυρίου μέρους

Η περίπτωση δομικής αστοχίας του κυρίου μέρους του υλικού δεν έχει εμφανισθεί ως περιστατικό αλλά συνυπολογίζεται στους μηχανισμούς αστοχίας, βάσει της εμπειρίας των τεχνικών συντήρησης. Η δομική αστοχία του υλικού αποτελεί ουσιαστικά το σπάσιμο ή την εμφάνιση μεγάλης ρωγμής, ικανής να προκαλέσει την ολική απώλεια του υγρού του κυκλώματος και μη λειτουργικότητα του εμπλεκόμενου συστήματος. Η αστοχία μπορεί να λάβει χώρα είτε στο έδαφος, κατά την τροχοδρόμηση, είτε κατά την διάρκεια της πτήσης. Η εμφάνιση της εν λόγω αστοχίας δεν επηρεάζει την ασφάλεια του εμπλεκόμενου προσωπικού, δηλαδή του χειριστή, επομένως η δριμύτητα όσον αφορά τον ανθρώπινο παράγοντα χαρακτηρίζεται «Μικρή». Όσον αφορά το κόστος, η δομική αστοχία απαιτεί την αντικατάσταση του υλικού, η οποία κοστολογείται στις 120000€. Επομένως, με βάση τον Πίνακα 4 η δριμύτητα κόστους χαρακτηρίζεται «Μεσαία».

Άρα η δριμύτητα του μηχανισμού «Δομική Αστοχία κυρίου μέρους» εμπίπτει στην κατηγορία «Μεσαία».

4.2.3 Εκτίμηση Πιθανότητας Αστοχίας

Ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας θα εφαρμοστεί μόνο για τον μηχανισμό αστοχίας «Δομική Αστοχία κυρίου μέρους», όπου η δριμύτητα διαγνώστηκε «Μεσαία». Εφόσον η συγκεκριμένη αστοχία δεν έχει εμφανιστεί μέχρι στιγμής, η εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας εμπίπτει στην περίπτωση μηδενικών αστοχιών. Επομένως, για τον υπολογισμό της θα χρησιμοποιηθεί η κατανομή Weibayes. Αυτή αποτελεί μία ειδική περίπτωση της Weibull κατανομής, καθώς η παράμετρος β δεν υπολογίζεται αλλά θεωρείται δεδομένη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η παράμετρος κλίμακας η υπολογίζεται συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας του υλικού t , και της παραμέτρου β . Η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις

απουσίας αστοχιών. Η ανάλυση Weibayes προσφέρει σημαντική ακρίβεια των εκτιμήσεων, υπό την προϋπόθεση ότι η επιλεγείσα τιμή της παραμέτρου β είναι αξιόπιστη. Επομένως, η εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας πρέπει να γίνει με βάση το χρόνο λειτουργίας των υλικών που δεν έχουν αστοχήσει.

Επιπλέον, βάσει του εγχειριδίου συντήρησης της γενικής επισκευής του Connecting Block, όλα τα δομικά κύρια μέρη του επιθεωρούνται και σε περίπτωση φθοράς αντικαθίστανται. Επομένως, η κόπωση των υλικών ως προς της συγκεκριμένη αστοχία μετράται μεταξύ των διαστημάτων των γενικών επισκευών.

4.2.3.1.1 Υπολογισμός συντελεστών Weibayess

Η επιλογή της παραμέτρου β θα γίνει με βάση τον Πίνακα 19, που αποτελεί απόσπασμα του ολικού πίνακα ενδεικτικών τιμών της παραμέτρου β για διάφορες κατηγορίες υλικών του US Air Force Safety System Handbook. Με την παραδοχή ότι το Connecting Block, βάσει της λειτουργίας του, εμπίπτει στην κατηγορία των Pressure Vessels, επιλέγεται η τυπική τιμή του β , δηλαδή $\beta=1,5$.

Item	Beta (β) Values (Weibull Shape Factor)		
	Low	Typical	High
Motorized valves	0,5	1,1	3,0
Solenoid valves	0,5	1,1	3,0
Transducers	0,5	1,0	3,0
Transmitters	0,5	1,0	2,0
Temperature indicators	0,5	1,0	2,0
Pressure indicators	0,5	1,2	3,0
Flow instrumentation	0,5	1,0	3,0
Level instrumentation	0,5	1,0	3,0
Electro-mechanical parts	0,5	1,0	3,0
Static Equipment			
Boilers, condensers	0,5	1,2	3,0
Pressure vessels	0,5	1,5	6,0
Filters, strainers	0,5	1,0	3,0
Check valves	0,5	1,0	3,0
Relief valves	0,5	1,0	3,0
Service Liquids			
Coolants	0,5	1,1	2,0
Lubricants, screw compr.	0,5	1,1	3,0
Lube oils, mineral	0,5	1,1	3,0
Lube oils, synthetic	0,5	1,1	3,0
Greases	0,5	1,1	3,0

Πίνακας 20: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρου κλίμακας β

Ο υπολογισμός της παραμέτρου η θα γίνει με βάση τον τύπο

$$\eta = \left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i^\beta}{NF} \right)^{\frac{1}{\beta}},$$

όπου n: ο συνολικός αριθμός των υλικών

t: η κόπωση του υλικού

β: η παράμετρος σχήματος

NF: όταν δεν υπάρχουν αστοχίες τίθεται ίσος με 1.

Επομένως, στους παρακάτω πίνακες περιγράφεται ο υπολογισμός των παραμέτρων η για το R/H και το L/H Connecting Block. Η ονομασία των υλικών που θεωρούνται «καινούργια» μετά την γενική επισκευή έγινε όπως στην προηγούμενη μελέτη περίπτωσης της ενότητας 4.1, ενώ με πράσινο χρώμα έχουν σημειωθεί τα S/N των ενεργεία υλικών.

A/A	S/N	t (μήνε	t ^β	A/A	S/N	t (μήνε	t ^β	β	1/β	Σ(t ^β	η
1	416C	27,23333	142,1187	31	577B	222,9	3327,86	1,5	0,666667	177486,1	3158,224
2	416B	216	3174,539	32	577A	216	3174,539				
3	416A	216	3174,539	33	596B	221,2667	3291,349				
4	353C	45,73333	309,2782	34	596A	216	3174,539				
5	353B	216	3174,539	35	576B	223,2333	3335,328				
6	353A	216	3174,539	36	576A	216	3174,539				
7	1339	192,5667	2672,217	37	1306	225,5667	3387,758				
8	625B	215,1667	3156,185	38	547B	224,9333	3373,5				
9	625A	216	3174,539	39	547A	216	3174,539				
10	892B	164,2333	2104,709	40	201B	261,4667	4227,898				
11	892A	216	3174,539	41	201A	216	3174,539				
12	638B	215,1667	3156,185	42	568B	225,8333	3393,767				
13	638A	216	3174,539	43	568A	216	3174,539				
14	1340	192,5667	2672,217	44	1231	243,5667	3801,253				
15	190C	67,46667	554,1583	45	192B	262,5667	4254,606				
16	190B	216	3174,539	46	192A	216	3174,539				
17	190A	216	3174,539	47	1303	226,5667	3410,311				
18	281C	67,46667	554,1583	48	513B	229,8333	3484,332				
19	281B	216	3174,539	49	513A	216	3174,539				
20	281A	216	3174,539	50	490B	232,1	3536,004				
21	566C	31,8	179,3249	51	490A	216	3174,539				
22	566B	216	3174,539	52	1305	226,5667	3410,311				
23	566A	216	3174,539	53	1304	226,5667	3410,311				
24	606B	218,2333	3223,9	54	1310	224,5667	3365,255				
25	606A	216	3174,539	55	1285	227,5667	3432,914				
26	617B	214,9667	3151,786	56	595B	222,5667	3320,398				
27	617A	216	3174,539	57	595A	216	3174,539				
28	1327	221,5667	3298,045	58	1328	221,5667	3298,045				
29	587B	222,7667	3324,875	59	1307	225,5667	3387,758				
30	587A	216	3174,539								

Πίνακας 21: Υπολογισμός παραμέτρου η L/H Connecting Block

A/A	S/N	t (μήνες)	t ^{αβ}	A/A	S/N	t (μήνες)	t ^{αβ}	β	1/β	Σ(t ^{αβ})	η
1	488C	38,96667	243,2427	27	583	223,23333	3335,328	1,5	0,666667	137686,4	2666,413
2	488B	216	3174,539	28	1331	220,56667	3275,743				
3	488A	216	3174,539	29	623B	216,03333	3175,274				
4	183C	69,3	576,8991	30	623A	216	3174,539				
5	183B	216	3174,539	31	590B	222,9	3327,86				
6	183A	216	3174,539	32	590A	216	3174,539				
7	631B	32,16667	182,4354	33	1341	192,56667	2672,217				
8	631A	216	3174,539	34	656B	216,43333	3184,097				
9	376C	32,16667	182,4354	35	656A	216	3174,539				
10	376B	216	3174,539	36	601B	220,76667	3280,199				
11	376A	216	3174,539	37	601A	216	3174,539				
12	484C	69,3	576,8991	38	523B	227,43333	3429,898				
13	484B	216	3174,539	39	523A	216	3174,539				
14	484A	216	3174,539	40	612B	152,86667	1890,032				
15	497C	32,16667	182,4354	41	612A	216	3174,539				
16	497B	216	3174,539	42	1299	225,56667	3387,758				
17	497A	216	3174,539	43	216B	261,9	4238,413				
18	1301	225,5667	3387,758	44	216A	216	3174,539				
19	620B	32,16667	182,4354	45	508B	232,1	3536,004				
20	620A	216	3174,539	46	508A	216	3174,539				
21	542C	32,16667	182,4354	47	507B	232,6	3547,436				
22	542B	216	3174,539	48	507A	216	3174,539				
23	542A	216	3174,539	49	1293	225,56667	3387,758				
24	526C	32,16667	182,4354	50	1292	225,56667	3387,758				
25	526B	216	3174,539	51	1291	225,56667	3387,758				
26	526A	216	3174,539								

Πίνακας 22: Υπολογισμός παραμέτρου η R/H Connecting Block

Επομένως, σύμφωνα με τις τιμές των παραμέτρων της κατανομής Weibayes εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- $\beta=1,5$: ο ρυθμός αστοχιών είναι αυξανόμενος και το υλικό υπόκειται σε φυσιολογική φθορά
- $\eta_{L/H}=3158,2$: Το 63,2% του πληθυσμού των L/H Connecting Block αναμένεται να αστοχήσει με τον υπό μελέτη μηχανισμό αστοχίας στους 3158,2 μήνες από το τελευταίο Overhaul.
- $\eta_{R/H}=2666,4$: Το 63,2% του πληθυσμού των R/H Connecting Block αναμένεται να αστοχήσει με τον υπό μελέτη μηχανισμό αστοχίας στους 2666,4 μήνες από το τελευταίο Overhaul.

4.2.3.1.2 Υπολογισμός Μελλοντικών Αστοχιών

Ο προγραμματισμός πτήσεων του επόμενου έτους απαιτεί την εκμετάλλευση 18 R/H και 18 L/H Connecting. Σύμφωνα με τον Πίνακα 18 την παρούσα χρονική περίοδο η διαθεσιμότητα ανέρχεται στα 11 εν ενεργεία R/H και 11 εν ενεργεία L/H

Connecting Block, εκ των οποίων τα 3 L/H με S/N 625, 638 και 617 αναμένεται να λήξει το όριο ζωής του μέσα στους επόμενους 2 μήνες. Επομένως, απαιτείται η χορήγηση παράτασης του ορίου ζωής σε 10 L/H (τα 3 EN/EN που αναμένεται να λήξουν και 7 ήδη ληγμένα) υλικά και σε 7 R/H ληγμένα υλικά. Αυτά θα επιλεγούν με βάση το μικρότερο χρονικό διάστημα που έχουν λήξει και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

A/A	S/N	t (μήνες)	Παρατηρήσεις
1	416C	27,23333	
2	353C	45,73333	
3	1339	192,5667	
4	566C	31,8	
5	892B	164,2333	
6	1340	192,5667	
7	190C	67,46667	
8	281C	67,46667	
9	638B	215,1667	Απαίτηση παράτασης
10	625B	215,1667	Απαίτηση παράτασης
11	617B	214,9667	Απαίτηση παράτασης
12	1327	221,5667	Απαίτηση παράτασης
13	587B	222,7667	Απαίτηση παράτασης
14	577B	222,9	Απαίτηση παράτασης
15	596B	221,2667	Απαίτηση παράτασης
16	576B	223,2333	Απαίτηση παράτασης
17	1306	225,5667	Απαίτηση παράτασης
18	606B	218,2333	Απαίτηση παράτασης

Πίνακας 23: L/H Connecting Block για πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών

A/A	S/N	t (μήνες)	Παρατηρήσεις
1	488C	38,96667	
2	183C	69,3	
3	631B	32,16667	
4	1341	192,5667	
5	376C	32,16667	
6	612B	152,8667	
7	484C	69,3	
8	497C	32,16667	
9	620B	32,16667	
10	542C	32,16667	

11	526C	32,16667	
12	1331	220,5667	Απαίτηση παράτασης
13	623B	216,0333	Απαίτηση παράτασης
14	590B	222,9	Απαίτηση παράτασης
15	656B	216,4333	Απαίτηση παράτασης
16	601B	220,7667	Απαίτηση παράτασης
17	583	223,2333	Απαίτηση παράτασης
18	1301	225,5667	Απαίτηση παράτασης

Πίνακας 24: R/H Connecting Block για πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών.

Ο υπολογισμός της μελλοντικής πιθανότητας αστοχίας θα γίνει σε βάθος ενός έτους, το οποίο ταυτίζεται και με την μονάδα κόπωσης του υλικού, δηλαδή $u=12$ μήνες. Οπότε ακολουθώντας την διαδικασία του MINITAB που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.4 δίνονται τα εξής αποτελέσματα:

A/A	S/N	t (μήνες)	u	t+u	F(t)	F(t+u)	P	Ftotal
1	416C	27,23333333	12	39,23333333	0,00080042	0,001383639	0,000583686	0,023087452
2	353C	45,73333333	12	57,73333333	0,001741051	0,002468561	0,000728779	
3	1339	192,5666667	12	204,5666667	0,014943315	0,016350012	0,001428037	
4	566C	31,8	12	43,8	0,001009862	0,001631913	0,000622681	
5	892B	164,2333333	12	176,2333333	0,01178854	0,013095238	0,001322287	
6	1340	192,5666667	12	204,5666667	0,014943315	0,016350012	0,001428037	
7	190C	67,46666667	12	79,46666667	0,003117429	0,003983379	0,000868658	
8	281C	67,46666667	12	79,46666667	0,003117429	0,003983379	0,000868658	
9	638B	215,1666667	12	227,1666667	0,017625736	0,019106238	0,001507065	
10	625B	215,1666667	12	227,1666667	0,017625736	0,019106238	0,001507065	
11	617B	214,9666667	12	226,9666667	0,017601384	0,019081254	0,001506384	
12	1327	221,5666667	12	233,5666667	0,018410618	0,019911175	0,001528701	
13	587B	222,7666667	12	234,7666667	0,018558989	0,020063267	0,001532724	
14	577B	222,9	12	234,9	0,018575498	0,020080189	0,00153317	
15	596B	221,2666667	12	233,2666667	0,018373584	0,019873209	0,001527694	
16	576B	223,2333333	12	235,2333333	0,018616791	0,020122513	0,001534285	
17	1306	225,5666667	12	237,5666667	0,018906655	0,020419569	0,001542069	
18	606B	218,2333333	12	230,2333333	0,018000468	0,019490624	0,001517471	

Πίνακας 25: Υπολογισμός μελλοντικής αστοχίας των L/H Connecting Block σε βάθος 1 έτους

A/A	S/N	t (μήνες)	u	t+u	F(t)	F(t+u)	P	Ftotal
1	488C	38,96666667	12	50,96666667	0,001765096	0,002639172	0,000875621	0,025235351
2	183C	69,3	12	81,3	0,004181214	0,005309972	0,001133498	
3	631B	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496	
4	1341	192,5666667	12	204,5666667	0,019221006	0,021026069	0,001840438	
5	376C	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496	
6	612B	152,8666667	12	164,8666667	0,013633389	0,015257276	0,001646332	
7	484C	69,3	12	81,3	0,004181214	0,005309972	0,001133498	
8	497C	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496	
9	620B	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496	
10	542C	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496	
11	526C	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496	
12	1331	220,5666667	12	232,5666667	0,023510716	0,025430313	0,001965815	
13	623B	216,0333333	12	228,0333333	0,022797909	0,024699609	0,001946066	
14	590B	222,9	12	234,9	0,023880272	0,02580899	0,001975903	
15	656B	216,4333333	12	228,4333333	0,022860526	0,024763815	0,001947816	
16	601B	220,7666667	12	232,7666667	0,023542321	0,025462703	0,001966682	
17	583	223,2333333	12	235,2333333	0,023933213	0,025863228	0,00197734	
18	1301	225,5666667	12	237,5666667	0,024304823	0,02624389	0,001987369	

Πίνακας 26: Υπολογισμός μελλοντικών αστοχιών των R/H Connecting Block σε βάθος 1 έτους

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες στο επόμενο έτος αναμένεται να αστοχήσουν 0,023 L/H και 0,025 R/H Connecting Block. Παρόλο που οι πιθανότητες μελλοντικών αστοχιών είναι πολύ μικρές, προκειμένου να ενταχθεί η πιθανότητα αστοχίας σε μία από τις κατηγορίες του Πίνακα 3, θα προχωρήσουμε σε υπολογισμό μελλοντικών αστοχιών σε βάθος 10ετίας, δηλαδή για $u=120$. Τελικά προκύπτουν οι εξής πίνακες:

A/A	S/N	t (μήνες)	u	t+u	F(t)	F(t+u)	P	Ftotal	u 10ετίας	t+u 10ετίας	F 10ετίας	P 10ετίας	Ftotal 10ετίας
1	416C	27,23333333	12	39,23333333	0,00080042	0,001383639	0,000583686	0,023087452	120	147,2333333	0,010015343	0,009222305	0,266381283
2	353C	45,73333333	12	57,73333333	0,001741051	0,002468561	0,000728779		120	165,7333333	0,01194944	0,010226193	
3	1339	192,5666667	12	204,5666667	0,014943315	0,016350012	0,001428037		120	312,5666667	0,030655692	0,015950734	
4	566C	31,8	12	43,8	0,001009862	0,001631913	0,000622681		120	151,8	0,01048243	0,009482144	
5	892B	164,2333333	12	176,2333333	0,01178854	0,013095238	0,001322287		120	284,2333333	0,026638111	0,015026715	
6	1340	192,5666667	12	204,5666667	0,014943315	0,016350012	0,001428037		120	312,5666667	0,030655692	0,015950734	
7	190C	67,46666667	12	79,46666667	0,003117429	0,003983379	0,000868658		120	187,4666667	0,014357871	0,011275593	
8	281C	67,46666667	12	79,46666667	0,003117429	0,003983379	0,000868658		120	187,4666667	0,014357871	0,011275593	
9	638B	215,1666667	12	227,1666667	0,017625736	0,019106238	0,001507065		120	335,1666667	0,033981776	0,0166495	
10	625B	215,1666667	12	227,1666667	0,017625736	0,019106238	0,001507065		120	335,1666667	0,033981776	0,0166495	
11	617B	214,9666667	12	226,9666667	0,017601384	0,019081254	0,001506384		120	334,9666667	0,033951887	0,01664345	
12	1327	221,5666667	12	233,5666667	0,018410618	0,019911175	0,001528701		120	341,5666667	0,034942444	0,016841896	
13	587B	222,7666667	12	234,7666667	0,018558989	0,020063267	0,001532724		120	342,7666667	0,035123471	0,016877716	
14	577B	222,9	12	234,9	0,018575498	0,020080189	0,001533317		120	342,9	0,035143603	0,016881691	
15	596B	221,2666667	12	233,2666667	0,018373584	0,019873209	0,001527694		120	341,2666667	0,034897231	0,016832928	
16	576B	223,2333333	12	235,2333333	0,018616791	0,020122513	0,001534285		120	343,2333333	0,035193947	0,016891624	
17	1306	225,5666667	12	237,5666667	0,018906655	0,020419569	0,001542069		120	345,5666667	0,035546968	0,016960989	
18	606B	218,2333333	12	230,2333333	0,018000468	0,019490624	0,001517471		120	338,2333333	0,034441082	0,016741977	

Πίνακας 27: Υπολογισμός μελλοντικών αστοχιών L/H Connecting Block σε βάθος 10ετίας

A/A	S/N	t (μήνες)	u	t+u	F(t)	F(t+u)	P	Ftotal	u 10ετίας	t+u 10ετίας	F 10ετίας	P 10ετίας	Ftotal 10ετίας
1	488C	38,96666667	12	50,96666667	0,001765096	0,002639172	0,000875621	0,025235351	120	158,9666667	0,014451535	0,012708871	0,306072276
2	183C	69,3	12	81,3	0,004181214	0,005309972	0,001133498		120	189,3	0,018738586	0,014618495	
3	631B	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496		120	152,1666667	0,013540489	0,012232548	
4	1341	192,5666667	12	204,5666667	0,019221006	0,021026069	0,001840438		120	312,5666667	0,039340505	0,020513795	
5	376C	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496		120	152,1666667	0,013540489	0,012232548	
6	612B	152,8666667	12	164,8666667	0,013633389	0,015257276	0,001646332		120	272,8666667	0,032206864	0,018830194	
7	484C	69,3	12	81,3	0,004181214	0,005309972	0,001133498		120	189,3	0,018738586	0,014618495	
8	497C	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496		120	152,1666667	0,013540489	0,012232548	
9	620B	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496		120	152,1666667	0,013540489	0,012232548	
10	542C	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496		120	152,1666667	0,013540489	0,012232548	
11	526C	32,16666667	12	44,16666667	0,001324139	0,002129566	0,000806496		120	152,1666667	0,013540489	0,012232548	
12	1331	220,5666667	12	232,5666667	0,023510716	0,025430313	0,001965815		120	340,5666667	0,044621151	0,021618707	
13	623B	216,0333333	12	228,0333333	0,022797909	0,024699609	0,001946066		120	336,0333333	0,043752903	0,021443869	
14	590B	222,9	12	234,9	0,023880272	0,025808899	0,001975903		120	342,9	0,045069997	0,021708121	
15	656B	216,4333333	12	228,4333333	0,022860526	0,024763815	0,001947816		120	336,4333333	0,043829311	0,021459356	
16	601B	220,7666667	12	232,7666667	0,023542321	0,025462703	0,001966682		120	340,7666667	0,044659572	0,021626386	
17	583	223,2333333	12	235,2333333	0,023933213	0,025863228	0,00197734		120	343,2333333	0,045134226	0,021720863	
18	1301	225,5666667	12	237,5666667	0,024304823	0,02624389	0,001987369		120	345,5666667	0,045584577	0,021809838	

Πίνακας 28: Υπολογισμός μελλοντικών αστοχιών R/H Connecting Block σε βάθος 10ετίας

Τελικά σύμφωνα με τις τιμές των πιθανοτήτων μελλοντικών αστοχιών, αναμένεται η αστοχία 0,27 L/H και 0,31 R/H Connecting Block, λόγω δομικής αστοχίας του κυρίου μέρους. Συνεπώς, με βάση τον Πίνακα 3 η πιθανότητα αστοχίας εντάσσεται στην κατηγορία «Μικρή» ή Δ.

4.2.4 Εκτίμηση Επικινδυνότητας

Έγιναν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την μελέτη της συμπεριφοράς 18 L/H και R/H Connecting Block ως προς τον μηχανισμό αστοχίας:

- «Εμφάνιση του ενδείκτη απόφραξης»: Η δριμύτητα εμφάνισης χαρακτηρίστηκε «Μικρή», οπότε χωρίς την εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας η επικινδυνότητα τίθεται αυτομάτως, σύμφωνα με τον Πίνακα 2, ως «Μικρή» ή Δ.
- «Διαρροή υδραυλικού υγρού από το φίλτρο ή/και τον ενδείκτη»: Ομοίως με παραπάνω η επικινδυνότητα τίθεται «Μικρή» ή Δ.
- «Δομική αστοχία κυρίου μέρους» σε βάθος ενός έτους: Η δριμύτητα εμφάνισης χαρακτηρίστηκε ως «Μέτρια», ενώ η πιθανότητα αστοχίας κατηγοριοποιήθηκε ως «Μικρή». Επομένως, σύμφωνα με τον Πίνακα 2 η επικινδυνότητα είναι «Μικρή» ή Δ.

Επικινδυνότητα					
		Δριμύτητα			
		Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη	Υψηλή
Πιθανότητα	Μικρή	Εμφάνιση ενδείκτη απόφραξης	Δομική αστοχία κυρίου μέρους		
	Μέτρια	Διαρροή υδραυλικού από φίλτρο/ ενδείκτη			
	Μεγάλη				
	Υψηλή				

Πίνακας 29: Εκτίμηση επικινδυνότητας μηχανισμών αστοχίας Connecting Block

Τελικά, για όλους τους εξεταζόμενους μηχανισμούς αστοχίας η επικινδυνότητα χρήσης των 26 (18+18) Connecting Block σε βάθος ενός έτους είναι ανεκτή και ανήκει στην κατηγορία «Μικρή». Ταυτοχρόνως, εισηγείται η χρήση, με τη παράταση του ορίου λειτουργίας έως τον Ιούνιο του 2024, των κόκκινων και κίτρινων υλικών. Επομένως, για το επόμενο έτος τα διαθέσιμα για χρήση υλικά είναι τα εξής:

L/H Connecting Block		R/H Connecting Block	
S/N	Παρατηρήσεις	S/N	Παρατηρήσεις
416		488	
353		183	
1339		631	
566		1341	
892		376	
1340		612	
190		484	
281		497	
638	Παράταση έως Ιούν-24	620	
625	Παράταση έως Ιούν-24	542	
617	Παράταση έως Ιούν-24	526	
1327	Παράταση έως Ιούν-24	1331	Παράταση έως Ιούν-24
587	Παράταση έως Ιούν-24	623	Παράταση έως Ιούν-24
577	Παράταση έως Ιούν-24	590	Παράταση έως Ιούν-24
596	Παράταση έως Ιούν-24	656	Παράταση έως Ιούν-24
576	Παράταση έως Ιούν-24	601	Παράταση έως Ιούν-24
1306	Παράταση έως Ιούν-24	583	Παράταση έως Ιούν-24
606	Παράταση έως Ιούν-24	1301	Παράταση έως Ιούν-24

Πίνακας 30: Connecting Block προς εκμετάλλευση σε βάθος ενός έτους

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην σημερινή εποχή η όπου η ποιότητα έχει ενταχθεί σε όλους τους κλάδους των προϊόντων και υπηρεσιών η ασφάλεια οφείλει να αποτελεί την βάση και την κορυφή κάθε διαδικασίας. Στο τομέα της συντήρησης αεροπορικών υλικών η ασφάλεια πτήσεων και εδάφους είναι καθημερινή απαίτηση καίριας σημασίας. Παράλληλα, οι απαιτήσεις του προγράμματος πτήσεων τόσο σε μια Πολεμική Μοίρα, όσο και σε μια αερογραμμή της Πολιτικής Αεροπορίας είναι ανελαστικές. Ο υψηλός αριθμός πτήσεων αυξάνει τη συχνότητα συντήρησης των αεροσκαφών, η οποία με την σειρά της αυξάνει και το κόστος συντήρησης. Παράλληλα η συντήρηση απαιτεί την καθήλωση του σκάφους στο έδαφος για καθορισμένο χρονικό διάστημα, γεγονός που επίσης μειώνει το κέρδος του οργανισμού.

Σε αυτή την περίπτωση, το τμήμα ποιοτικού ελέγχου και ασφαλείας κάθε οργανισμού οφείλει να μελετήσει τη δυνατότητα μικρής αραίωσης των διαστημάτων συντήρησης και να εντοπίσει μελλοντικές επισφαλείς καταστάσεις. Η παρουσιαζόμενη μεθοδολογία, στηριζόμενη σε στατιστικές μεθόδους και έγκυρα πρότυπα, δίνει την δυνατότητα στον μελετητή σε μικρό χρονικό διάστημα και χωρίς την διεξαγωγή πειραμάτων να σχηματίσει μια αξιόπιστη εικόνα για τον βαθμό επικινδυνότητας της κατάστασης και να αποφασίσει εάν θα είναι επικερδές για τον οργανισμό να εφαρμόσει τον αρχικό προγραμματισμό του και να προχωρήσει σε διεξοδικότερους ελέγχους για την χορήγηση παράτασης των επιθεωρήσεων των υπό μελέτη υλικών.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η βασική μεθοδολογία για την διεξαγωγή μιας μελέτης επικινδυνότητας για την εκμετάλλευση αεροπορικών υλικών σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος. Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε στα πρώτα τρία κεφάλαια της εργασίας, ακολούθησε η εφαρμογή της μεθόδου σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις υλικών. Παρόλο που και στις δυο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια στατιστικά εργαλεία, παρατηρούνται αρκετές διαφορές στην εφαρμογή τους με βασικότερες:

- i. Διαφορετική παρουσίαση και υπολογισμός των χρόνων λειτουργίας και αστοχίας: Κάθε μελέτη αφορά έναν μηχανισμό αστοχίας, ο οποίος οφείλεται σε έναν συγκεκριμένο τύπο κοπώσεως. Επομένως ο μελετητής οφείλει κάθε φορά να εξακριβώνει εάν το εξάρτημα ή το σύνολο εξαρτημάτων που οδηγεί

στον υπό μελέτη μηχανισμό αστοχίας επιθεωρείται και αντικαθίσταται σε καθορισμένα διαστήματα (π.χ. περιοδική επιθεώρηση ή γενική επισκευή) ή αντικαθίσταται μόνο έπειτα από εμφάνιση αστοχίας. Σε κάθε περίπτωση η κόπωση και επομένως ο χρόνος λειτουργίας/ αστοχίας υπολογίζεται διαφορετικά.

- ii. Διαφορετική μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων Weibull: Εκτός από την επιλογή μεταξύ Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων και Μέγιστης Πιθανοφάνειας που περιεγράφηκε διεξοδικά στην Ενότητα 3.4, υπάρχει και η περίπτωση μελέτης επικινδυνότητας χωρίς ιστορικά στοιχεία αστοχιών. Η περίπτωση μηδενικών αστοχιών αποκλείει την εφαρμογή των δύο προαναφερόμενων μεθόδων και αντιμετωπίζεται με εφαρμογή της ανάλυσης Weibayes, η οποία περιγράφεται στην μελέτη περίπτωσης 4.2.
- iii. Σταθερό ή μεταβλητό μελλοντικό διάστημα ενδιαφέροντος: Στην περίπτωση της ενότητας 4.1 και γενικά στις περιπτώσεις που το μελλοντικό διάστημα ενδιαφέροντος u αναμένεται να προσθέσει κόπωση στο υλικό που ξεπερνά το όριο που ορίζει ο κατασκευαστής έως την γενική επισκευή, πρέπει να διερευνηθεί το ενδεχόμενο περιορισμού κοπώσεως για τα συγκεκριμένα S/N υλικών. Επιπλέον, ενδέχεται ορισμένα S/N υλικών να είχαν υποβληθεί και στο παρελθόν μία ή περισσότερες φορές σε μελέτη επικινδυνότητας για μελλοντική χρήση τους και να είχε παραταθεί το όριο ζωής τους έως την γενική επισκευή. Σε αυτές τις περιπτώσεις κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός ο περιορισμός της κόπωσης του στο χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος, καθώς τα συγκεκριμένα υλικά, μπορεί στατιστικά να αποδεικνύονται χαμηλής επικινδυνότητας, ωστόσο δεν παύουν ατομικά να έχουν συσσωρεύσει πολύ μεγαλύτερη κόπωση, από άλλα νεότερα υλικά του πληθυσμού. Τελικά υπάρχουν περιπτώσεις που το διάστημα u είναι ίδιο για όλα τα μελετώμενα υλικά και περιπτώσεις όπου το u οφείλει να μεταβάλλεται.⁹

⁹ Fourar,, Ogunvoul,, Budaev and Lachi, 2020

Παράρτημα «Α»: Επεξηγηματικά Παραδείγματα

Π.Α.1 Επεξηγηματικό Παράδειγμα 1

Έχουν συλλεχθεί δεδομένα όσον αφορά την αστοχία των ήλων του αεραγωγού του κινητήρα M-53 P2 του μαχητικού αεροσκάφους Mirage 2000-5. Τα δεδομένα αφορούν τον αριθμό των αστοχιών των ήλων ανάλογα με τις ώρες πτήσεις που πραγματοποιεί το Α/Φ φορώντας τους. Θα γίνει αναζήτηση των παραμέτρων της ευθείας $y(t) = At + B$, όπου $y(t)$ είναι ο αριθμός των αστοχιών που παρατηρούνται έως t ώρες πτήσεις.

Ώρες Πτήσεις	Αριθμός Αστοχιών
<1000	1
<5000	3
<10000	4
<15000	6
<20000	8
<25000	11
<30000	14

Πίνακας 31: Αστοχίες ήλων αεραγωγού ανάλογα των ωρών πτήσεις

Είναι προφανές πως η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ο χρόνος t και η εξαρτημένη μεταβλητή ο αριθμός των ήλων που αστόχησαν. Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ευκολότερα διαχειρίσιμα, ο χρόνος t θα εκφράζει ώρες πτήσεις σε χιλιάδες. Επομένως, σύμφωνα με τα βήματα που αναλύθηκαν με χρήση του excel λαμβάνονται οι τιμές των παραμέτρων $A=0,431218$ και $B=0,184412$. Δηλαδή η προσαρμοσμένη ευθεία παλινδρόμησης είναι η $y(t) = 0,431218A + 0,184412$.

Ακολουθώντας τώρα την διαδικασία που περιγράφεται στην υποπαράγραφο 1.4.1.2, λαμβάνονται από το MINITAB τα εξής δεδομένα:

Regression Equation

Αριθμός αστοχιών = 0,184 + 0,000431 Ώρες πτήσης

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,184	0,510	0,36	0,732	
Ώρες πτήσης	0,000431	0,000028	15,25	0,000	1,00

Π.Α.2 Επεξηγηματικό παράδειγμα 2

Η διάρκεια ζωής σε ώρες πτήσεις της γεννήτριας CSD του μαχητικού αεροσκάφους Mirage 2000-5 ακολουθεί την κατανομή γ με $\alpha=2,3$. Για 4 S/N του συγκεκριμένου υλικού προέκυψε ότι οι ώρες ζωής τους ανήλθαν στις $t_1 = 7566, t_2 = 6897, t_3 = 7322, t_4 = 6160$.

Η κατανομή γ έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας την εξής

$$f(t, \beta) = \frac{1}{\beta^2} t e^{-\frac{t}{\beta}}, t > 0 \quad (1.3)$$

Για την εύρεση της παραμέτρου β θα χρησιμοποιεί η συνάρτηση πιθανοφάνειας (1.2) σε συνδυασμό με την (1.3) ως εξής

$$L(\beta, t_1, t_2, t_3, t_4) = \prod_{i=1}^4 f(t_i, \beta)$$

ή έπειτα από τις πράξεις

$$L(\beta, t_1, t_2, t_3, t_4) = \frac{1}{\beta^8} \cdot 2,353 \cdot 10^{15} \cdot e^{-\frac{27945}{\beta}} \quad (1.4)$$

Αφού υπολογίστηκε η συνάρτηση πιθανοφάνειας του συγκεκριμένου παραδείγματος, επόμενο βήμα είναι η εύρεση της πρώτης παραγώγου της. Για διευκόλυνση των πράξεων μπορεί να υπολογιστεί η πρώτη παράγωγος του λογαρίθμου της σχέσης (1.4), καθώς είναι γνωστό ότι η λογαριθμισμένη συνάρτηση πιθανοφάνειας (Log Likelihood) έχει το ίδιο μέγιστο με την αρχική. Συνεπώς η σχέση (1.4) γίνεται:

$$\ln L(\beta, t_1, t_2, t_3, t_4) = \ln \left(\frac{1}{\beta^8} \cdot 2,353 \cdot 10^{15} \cdot e^{-\frac{27945}{\beta}} \right)$$

ή

$$\ln L(\beta, t_1, t_2, t_3, t_4) = -8 \ln \beta + \ln 2,353 + 15 \ln 10 - \frac{27945}{\beta} \quad (1.5)$$

Άρα η πρώτη παράγωγος της (1.5) είναι¹⁰

$$\frac{d[\ln L(\beta, t_1, t_2, t_3, t_4)]}{d\beta} = -\frac{8}{\beta} + \frac{27945}{\beta^2} \quad (1.6)$$

Συνεπώς, για τη μεγιστοποίηση της (1.5) και κατά συνέπεια της (1.4) η (1.6) εξισώνεται με το μηδέν:

$$-\frac{8}{\beta} + \frac{27945}{\beta^2} = 0$$

ή

$$\beta = \frac{27945}{8} = 3493,1$$

που αποτελεί και τη ζητούμενη παράμετρο

Π.Α.3 Επεξηγηματικό Παράδειγμα 3

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία συντήρησης ο αριθμός αστοχιών γάντζων ασφάλισης των σκελών προσγειώσης ενός τύπου Α/Φ είναι 3 ανά 10000 συνολικές προσγειώσεις. Δηλαδή ο ρυθμός αστοχίας είναι $\lambda=0,0003/(T)\Pi\Gamma$. Δεδομένου επίσης, ότι ο προγραμματισμός της εταιρίας για τα επόμενα 5 και 10 χρόνια είναι να διεξάγει 10000 και 18000 προσγειώσεις, τότε προκύπτουν οι εξής εκτιμήσεις πιθανών αστοχιών:

- i. Με βάση τον δεδομένο ρυθμό αστοχιών αναμένονται στην 5ετία $0,0003 \cdot 10000 = 3$ αστοχίες.
- ii. Στην 10ετία, την ίδια λογική αναμένονται $0,0003 \cdot 18000 = 5,4$ αστοχίες.

Επομένως, σύμφωνα με τον Πίνακα 3, η συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκεται στην περιοχή της μεγάλης πιθανότητας αφού

$$1/(T)\Pi\Gamma \quad 5ετία < 3(T)\Pi\Gamma \quad 5ετία < 4(T)\Pi\Gamma \quad 5ετία$$

¹⁰ Προσοχή στο γεγονός ότι η μεταβλητή είναι το β και ότι το t .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Β»: Αριθμητική Εφαρμογή- Ήλοι Αεραγωγού

Εξετάζεται η αστοχία της κεφαλής των ήλων του αεραγωγού ενός αεροκινητήρα. Η αστοχία που εξετάζει η συγκεκριμένη μελέτη αφορά την αστοχία που οδήγησε στην απώλεια του ήλου, και όχι απλά στο σπάσιμο της κεφαλής αυτού. Από τα ιστορικά στοιχεία του εργαστηρίου δοκιμής των κινητήρων συλλέχθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα:

Ιστορικά Στοιχεία		
A/A	Χρόνος Λειτουργίας	Αστοχία
1	90	Απώλεια ήλου
2	96	Απώλεια ήλου
3	100	Παραμόρφωση ήλου
4	30	Απώλεια ήλου
5	49	Απώλεια ήλου
6	45	Σπάσιμο κεφαλής
7	10	Αποχρωματισμός
8	82	Απώλεια ήλου

Πίνακας 32: Δεδομένα αστοχιών ήλων αεραγωγού

Για την παρούσα μελέτη, ως αστοχία νοείται μόνο η απώλεια του ήλου, συνεπώς οι περιπτώσεις 3,6 και 7 αποτελούν υλικά εν ενεργεία και εντάσσονται στην τμηματική πληροφορία. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η συνδρομή της τμηματικής πληροφορίας είναι υψίστης σημασίας για την διεξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Ωστόσο αυτά θα συμπεριληφθούν σταδιακά στην ανάλυση προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν λάθη.

Π.Β.1 Υπολογισμός Πιθανότητας Αστοχίας

Η πιθανότητα $F(t)$, όπως είναι προφανές υπολογίζεται μόνο για τις περιπτώσεις αστοχίας του ήλου. Για τον υπολογισμό της επομένως, αρχικά κατατάσσονται τα δεδομένα αστοχίας κατά αύξοντα χρόνο όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Δεδομένα Αστοχίας		
A/A	Χρόνος Αστοχίας	F(t)

1	30	
2	49	
3	82	
4	90	
5	96	

Πίνακας 33: Δεδομένα αστοχίας ήλων-πλήρης πληροφορία

Η πιθανότητα αστοχίας- διάμεσης βαθμίδας επομένως, μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της σχέσης (2.1) ωστόσο λόγω δυσκολίας πράξεων προτιμάται η προσέγγιση της διωνυμικής κατανομής μέσω της κατανομής Beta. Η τελευταία μέθοδος εκτελείται με τη χρήση MINITAB ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Calc->Probability Distributions->Beta
- Επιλογή Inverse cumulative probability
- First shape parameter-> Εισάγεται ο αύξων αριθμός αστοχίας i , π.χ. $i=1$
- Second shape parameter-> Εισάγεται για κάθε i αστοχία ο όρος $N-i+1$, π.χ. $5-1+1=5$
- Επιλογή Input Constant-> Η αθροιστική πιθανότητα 50% ή 0,5
- Ok.

Επομένως είτε εκτελώντας αυτή την διαδικασία στο MINITAB για τις 5 αστοχίες είτε χρησιμοποιώντας στο Excel την αντίστοιχη συνάρτηση

$$BETAINV(P; i; N + i - 1) \quad (\Pi.1)$$

προκύπτει ο συμπληρωμένος Πίνακας 33 ως εξής:

Δεδομένα Αστοχίας		
A/A	Χρόνος Αστοχίας	F(t)
1	30	0,129449
2	49	0,22849
3	82	0,286237
4	90	0,323804
5	96	0,350163

Πίνακας 34: Πιθανότητα αστοχίας ήλων-πλήρης πληροφορία.

Ωστόσο ο ανωτέρω υπολογισμός πιθανότητας αστοχίας βασίζεται στα δεδομένα των ήλων που αστόχησαν, αλλά όχι και στην τμηματική πληροφορία των ενεργεία ήλων. Παρόλο που στο διάγραμμα Weibull εμφανίζονται τα ζεύγη τιμών $(t, F(t))$, αυτά θα πρέπει να υπολογίζονται βάσει όλων των διατιθέμενων στοιχείων. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται μια διορθωμένη κατάταξη των ήλων που

αστόχησαν, όπου οι αύξοντες αριθμοί τους υπολογίζονται βάσει του συνόλου των δεδομένων με την χρήση του τύπου του Drew Auth:

$$i_{\text{διορθ.}} = \frac{i_{\text{ανάστρ.κατάταξης}} \times i_{\text{προηγ.διορθ.}} + (N_{\text{total}} + 1)}{i_{\text{ανάστρ.κατάταξης}} + 1} \quad (\text{Π.2})$$

όπου $i_{\text{αναστρ.κατάταξης}}$: ο αύξων αριθμός που θα είχε ο εκτός ενεργείας ήλος αν αυτοί κατατάσσονταν ανάποδα

$i_{\text{προηγ.διορθ.}}$: ο διορθωμένος αύξων αριθμός της προηγούμενης αστοχίας

N_{total} : ο πληθυσμός όλων των ήλων.

Επομένως με βάση τον Πίνακα 34 και την σχέση (Π.2) προκύπτει ο εξής τελικός πίνακας για τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας:

A/A	Ανάστροφος A/A	Χρόνος Λειτουργίας	A/A Αστοχίας	Διορθωμένη Κατάταξη	F(t)
1	8	10		-	
2	7	30	1	1,125	0,097564
3	6	45		-	
4	5	49	2	2,4375	0,253308
5	4	82	3	3,75	0,410237
6	3	90	4	5,0625	0,567325
7	2	96	5	6,375	0,7243
8	1	100		-	

Πίνακας 35: Τελικός Πίνακας Υπολογισμού Πιθανότητας Αστοχίας.

Π.Β.2 Εφαρμογή Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων

Σε συνέχεια του παραδείγματος της μελέτης αστοχίας της κεφαλής των ήλων αεραγωγού πρέπει να υπολογιστούν οι παράμετροι β και η της Weibull κατανομής. Με βάση την σχέση (2.1) και τα δεδομένα του Πίνακα 35 προκύπτει ο εξής πίνακας των Y,X μεταβλητών του προαναφερθέντος προτύπου:

t	F(t)	X=ln t	Y=ln(ln(1/(1-F(t))))
30	0,097564	3,401197382	-2,276357022
49	0,253308	3,891820298	-1,230650529
82	0,410237	4,406719247	-0,638593623
90	0,567324	4,49980967	-0,177016336
96	0,72423	4,564348191	0,253236653

Ακολουθώντας, εκτελώντας τα αντίστοιχα βήματα που αναφέρθηκαν στο MINITAB προκύπτει το εξής πρότυπο:

Regression Equation

$$X = 4,5532 + 0,4920 Y$$

Επομένως οι συντελεστές του ανωτέρω προτύπου είναι $A=0,492$ και $B=4,5532$. Αντιπαραθέτοντας το παραπάνω πρότυπο με το πρότυπο της (2.1) προκύπτει το εξής σύστημα:

$$\begin{cases} Y = AX + B \\ X = AY + B' \end{cases}$$

ή

$$\begin{cases} Y = AX + B \\ Y = \frac{1}{A} X - \frac{B'}{A} \end{cases}$$

Τελικά οι συντελεστές του προτύπου (2.1) είναι:

- $A = \frac{1}{A'} = \frac{1}{0,492} = 2,0325$
- $B = -\frac{B'}{A} = -\frac{4,5532}{0,492} = -9,2545$

Επομένως, οι ζητούμενοι συντελεστές είναι $\beta=2,0325$ και $\eta=94,9414$.

Π.Β.3 Εφαρμογή Μεθόδου Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Τώρα θα υπολογιστούν οι συντελεστές της κατανομής και με την μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα.

Αρχικά θα γίνει υπολογισμός με χρήση των τύπων (2.3) και (2.4) και χρήση του Excel. Προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός δίνεται στον συντελεστή β , μία τυχαία τιμή (έστω 2), η οποία εισάγεται στο κελί που θα υπολογιστεί το τελικό β . Με βάσει τον τύπο (2.3) δημιουργείται στο excel ο εξής πίνακας, όπου με κόκκινο είναι οι χρόνοι αστοχίας και με πράσινο οι χρόνοι λειτουργίας:

A/A	x	x^β	$\ln x$	$x^\beta \ln x$
1	30	28564,74	3,401197	97154,32
2	49	125482,76	3,89182	488356,3
3	82	593118,26	4,406719	2613706
4	90	785410,87	4,49981	3534199
5	96	954217,41	4,564348	4355381
1	10	1038,8758	2,302585	2392,1
2	45	97055,638	3,806662	369458,1
3	100	1079263	4,60517	4970190
	Total SUM	3664151,6	31,47831	16430836
	SUM($\ln x$) μόνο αστοχιών		20,76389	

Πίνακας 37: Συγκεντρωτικός Πίνακας υπολογισμών για την επίλυση του τύπου (2.3)

Έπειτα, σε ένα τυχαίο κελί πληκτρολογείται ο τύπος (2.3) και ακολουθούν οι εξής εντολές:

- Δεδομένα (Data)-> Ανάλυση Πιθανοτήτων (Probability Analysis)-> Αναζήτηση στόχου (Target search)
- Ορισμός κελιού-> Επιλογή του κελιού με τον τύπο
- Στην τιμή -> 0
- Αλλαγή του κελιού-> Επιλογή του κελιού που είχε εισαχθεί η τυχαία τιμή του β .

Επομένως, προκύπτει $\beta=3,0166$. Με δεδομένη τώρα την τιμή του β , ο υπολογισμός του η προκύπτει εύκολα με χρήση του τύπου (2.4) στο Excel , ως $\eta=87,9562$.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να απλουστευτεί σημαντικά με χρήση του MINITAB και των βημάτων που αναφέρθηκαν στην υπό-ενότητα 3.2.3. Σχηματίζεται αρχικά ο εξής πίνακας:

t	sensor
10	0
30	1
45	0
49	1
82	1
90	1
96	1
100	0

Πίνακας 38: Πίνακας ορθής καταγραφής των δεδομένων αστοχιών στο MINITAB

Ακολουθώντας τις εντολές που προαναφέρθηκαν λαμβάνεται ο εξής πίνακας αποτελεσμάτων με τις εκτιμήτριες των συντελεστών και τα άνω και κάτω όρια των τιμών αυτό, σε διάστημα εμπιστοσύνη 95%.

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Standard 95.0% Normal CI		
		Error	Lower	Upper
Shape	3,01702	1,14887	1,43035	6,36375
Scale	87,9563	13,0401	65,7764	117,615

Πίνακας 39: Εκτιμήτριες των παραμέτρων β και η με χρήση του MINITAB

Π.Β.4 Επιλογή Καταλληλότερης Μεθόδου

Αφού υπολογίστηκαν οι συντελεστές β και η της κατανομής Weibull και με τις δύο μεθόδους θα πρέπει να επιλεγεί το ζεύγος των συντελεστών που «ταιριάζει» καλύτερα στα δεδομένα. Αρχικά, βάσει του Πίνακα 13 και δεδομένου ότι η μελέτη περιλαμβάνει συνολικά 8 υλικά με 5 αστοχίες φαίνεται πως περισσότερη εγκυρότητα των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με εφαρμογή της Μεθόδου Ελάχιστων Τετραγώνων. Ωστόσο, θα πραγματοποιηθεί και στατιστικός έλεγχος στο MINITAB προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα της απόφασης. Επομένως θα πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής AD και για τις δύο μεθόδους. Η διαδικασία που ακολουθείται για τον συντελεστή που προκύπτει για την Μέγιστη Πιθανοφάνεια είναι αυτή που περιεγράφηκε και για την εύρεση των παραμέτρων, στην υπό-ενότητα 3.2.3. Οπότε μεταξύ άλλων προκύπτει ο συντελεστής:

$$AD_{Max_Likelihood} = 9,876$$

Για την εύρεση του αντίστοιχου συντελεστή των Ελάχιστων Τετραγώνων ακολουθείται επίσης η ίδια διαδικασία με την εξής προσθήκη στο βήμα vi: Estimate-> Επιλογή Least Square. Επομένως προκύπτει ο εξής συντελεστής:

$$AD_{Least_Square} = 9,774$$

Οπότε, αφού $AD_{Least_Square} < AD_{Max_Likelihood}$, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα περί επιλογής των συντελεστών της Μεθόδου Ελάχιστων Τετραγώνων, **β=2,0325** και **η=94,9414**.

Π.Β.5 Ερμηνεία Παραμέτρων

Σε συνέχεια της μελέτης αστοχίας της κεφαλής των ήλων αεραγωγού, θα γίνει ερμηνεία των παραμέτρων της κατανομής. Συνεπώς, προκύπτει ότι:

- $\eta=94,9414$: Υπάρχει πιθανότητα 63,2% να σπάσει η κεφαλή ενός ήλου αεραγωγού στις 94,9414 ώρες λειτουργία του κινητήρα.
- $\beta=2,0325$: Ο ρυθμός βλαβών ως προς την συγκεκριμένη αστοχία των ήλων είναι αυξανόμενος, αλλά δεν πρόκειται για περίπτωση ταχείας φθοράς. Επίσης, όσον αφορά την μορφή της κατανομής πρόκειται για καμπάνα σε σκέδαση προς τα δεξιά.

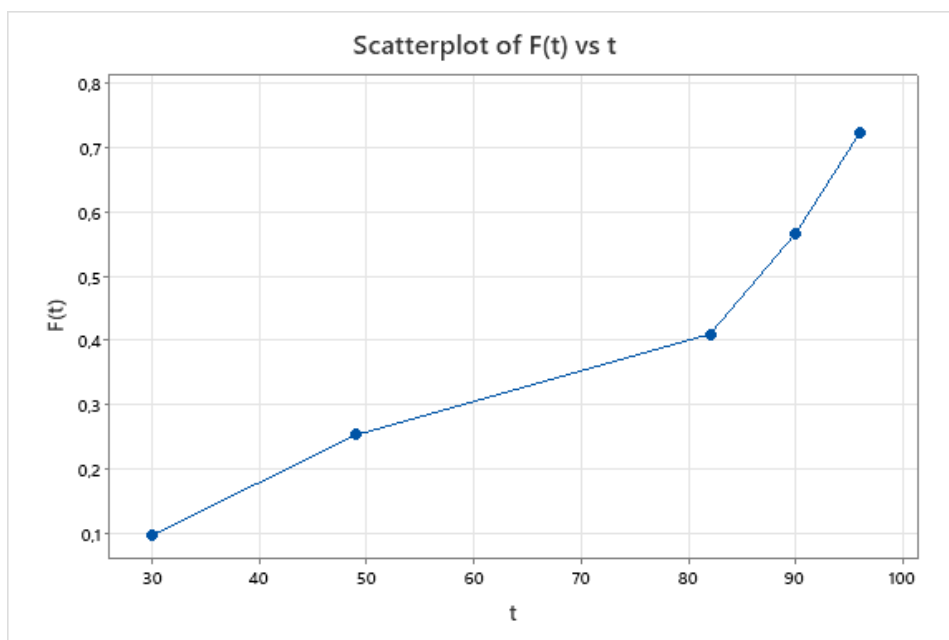
Π.Β.6 Δημιουργία και Ερμηνεία Διαγράμματος Weibull

Αφού επιλέχθηκαν οι καταλληλότεροι παράμετροι β και η και ερμηνεύθηκαν οι αριθμητικές της τιμές, είναι σειρά της διαγραμματικής απεικόνισης των δεδομένων αστοχίας. Οι τιμές της πιθανότητας αστοχίας $F(t)$ έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενο βήμα με την μέθοδο διάμεσης βαθμίδας, και επομένως τα ζεύγη τιμών αναπαρίστανται στον παρακάτω πίνακα:

Δεδομένα Αστοχίας		
A/A	Χρόνος Αστοχίας	F(t)
1	30	0,0976
2	49	0,2533
3	82	0,4102
4	90	0,5673
5	96	0,7243

Πίνακας 40: Δεδομένα αστοχιών ήλων

Επομένως το διάγραμμα Weibull προκύπτει ως εξής:



Εικόνα 13: Διάγραμμα Weibull

Παρατηρώντας τη μορφή του παραπάνω διαγράμματος μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα σημεία του διαγράμματος δεν σχηματίζουν σε καμία περίπτωση καμπύλη, οπότε δεν τίθεται θέμα αμφιβολίας για την ορθότητα της επιλογής της κατανομής Weibull 2 παραμέτρων για την μοντελοποίηση των δεδομένων.
- Φαίνεται πως η γραμμή ένωσης των σημείων αστοχιών χωρίζεται σε δύο ευθύγραμμα τμήματα διαφορετικών κλίσεων. Αυτό είναι σημάδι για την υποψία ύπαρξης διαφορετικών μηχανισμών αστοχίας της κεφαλής των ήλων αεραγωγού. Ωστόσο, δεδομένου του μικρού αριθμού δεδομένων (σύνολο 8 υλικά) και του γεγονότος ότι η διαφορά των δύο κλίσεων δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική, μπορεί να γίνει η παραδοχή κοινού τρόπου αστοχίας και να συνεχιστεί η μελέτη.

Π.Β.7 Πρόβλεψη Μελλοντικών Αστοχιών

Σε τελικό στάδιο της μελέτης αστοχίας της κεφαλής των ήλων αεραγωγού θα υπολογιστεί η πιθανότητα αστοχίας των ήλων στις επόμενες 30 ώρες λειτουργίας. Εφόσον πρόκειται για ήλους είναι προφανές ότι η πιθανότητα μελλοντικής αστοχίας

θα υπολογιστεί για όλους τους ήλους που δεν έχουν αστοχήσει. Οπότε είτε με χρήση του MINITAB, είτε με χρήση του Excel προκύπτει ο παρακάτω πίνακας υπολογισμών:

A/A	x	F(t)	u	F(t+u)	P	Ftotal
1	30	0,091697		0,091697	0	1,022382
2	49	0,22949		0,22949	0	
3	82	0,524038		0,524038	0	
4	90	0,592231		0,592231	0	
5	96	0,640411		0,640411	0	
1	10	0,010259	30	0,158515	0,149793	
2	45	0,196894	30	0,461665	0,329684	
3	100	0,670861	30	0,849552	0,542904	

Πίνακας 41: Υπολογισμός συνολικής πιθανότητας αστοχίας.

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, η δεσμευμένη πιθανότητα έχει υπολογιστεί για τους ήλους οι οποίοι είναι εν ενεργεία, καθώς δεν υπάρχει νόημα πρόβλεψης μελλοντικής αστοχίας για τους ήδη εκτός ενεργείας ήλους. Ο αριθμός των εξαρτημάτων που αναμένεται να αστοχήσουν εντός του χρονικού διαστήματος ενδιαφέροντος προκύπτει από το άθροισμα των συνεισφορών του εκάστοτε υλικού στην συνολική επικινδυνότητα. Η συνεισφορά κάθε εξαρτήματος στην επικινδυνότητα δίνεται από την δεσμευμένη πιθανότητα που υπολογίστηκε στον πίνακα (P). Αυτό σημαίνει ότι στις επόμενες 30 ώρες λειτουργίες αναμένεται να αστοχήσουν 1,022 ήλοι ακόμα.

Π.Β.8 Ποιοτική Εκτίμηση Πιθανότητας

Προκειμένου να ενταχθεί η πιθανότητα εμφάνισης μελλοντικών αστοχιών στην κεφαλή των ήλων αεραγωγού σε μία από τις κατηγορίες του Πίνακα 3, θα πρέπει να υπολογιστεί η πιθανότητα σε διάστημα ωρών λειτουργίας u σε βάθος 5ετίας και 10ετίας. Με βάσει τα στοιχεία πτήσεων των τελευταίων ετών και με βάση τον μελλοντικό προγραμματισμό αναμένεται η διεξαγωγή πτήσεων να μεταφράζεται σε καταπόνηση 10 ωρών λειτουργίας ετησίως για τους υπό μελέτη ήλους. Συνεπώς θα επαναληφθεί ο υπολογισμός της συνολικής πιθανότητας αστοχίας της ενότητας 2.4 για

$$u = 10 \frac{hr}{year} \cdot 5 years = 50hrs \quad \text{και} \quad u = 10 \frac{hr}{year} \cdot 10 years = 100hrs. \quad \text{Επομένως,}$$

προκύπτουν οι εξής πιθανότητες:

- $F_{total_5\,years} = 1,62$

- $F_{total_10years} = 2,59$

Συνεπώς σύμφωνα με τον Πίνακα 3 η πιθανότητα αστοχίας χαρακτηρίζεται ως «Μεγάλη», αφού $1/\Omega\Lambda$ 5ετίας $< F_{total_5years} = 1,62 < 4/\Omega\Lambda$ 5ετίας.

Π.Β.9 Εκτίμηση Δριμύτητας

Μια πιθανή αστοχία της κεφαλής ενός ήλου του αεραγωγού μπορεί να συμβεί μόνο κατά την διάρκεια πτήσης ή κατά την εκκίνηση του σκάφους στο έδαφος. Το σπασμένο κομμάτι της κεφαλής θα αποτελέσει D.O.D (Domestic Object Damage), το οποίο θα προκαλέσει ανά περίπτωση βλάβες εσωτερικά του κινητήρα (χτυπήματα και βαθουλώματα τόσο στα πτερύγια όσο και στα περιφερειακά τοιχώματα του κινητήρα). Παράλληλα, η σύγκρουση του σπασμένου κομματιού σε πτερύγιο του κινητήρα μπορεί να οδηγήσει σε εκ νέου σπασίματα και τελικά στην δημιουργία επιπλέον D.O.D.

Βάσει ιστορικών στοιχείων τα κόστη για την αντικατάσταση ή λείανση των χτυπημένων πτερυγίων διέφεραν ανά περίπτωση και ανέρχονταν στα εξής ποσά: 75000€, 50000€, 5000€ και 90000€. Επομένως, κατά μέσο όρο το κόστος της συγκεκριμένης αστοχίας ανέρχεται στα $\frac{75000 + 50000 + 5000 + 90000}{4} = 55000\text{€}$.

Όσον αφορά τον τραυματισμό του εμπλεκόμενου προσωπικού, βάσει ιστορικών στοιχείων αλλά και ανάλυσης των πιθανών καταστάσεων, δεν απορρέει κίνδυνος. Εάν η αστοχία συμβεί κατά την διάρκεια πτήσης, το επηρεαζόμενο προσωπικό είναι το πλήρωμα, το οποίο θα αντιληφθεί την αστοχία ως απώλεια στήριξης του κινητήρα (engine stall), σε επίπεδο ακίνδυνο για τις βασικές λειτουργίες του σκάφους. Εάν η αστοχία συμβεί κατά την διάρκεια δοκιμής στο έδαφος, το επηρεαζόμενο προσωπικό είναι ο δοκιμαστής και ο εξωτερικός παρατηρητής (observer), οι οποίοι δεν διατρέχουν κίνδυνο τραυματισμού σε μία ενδεχόμενη αστοχία.

Επομένως, σύμφωνα με τον Πίνακα 4, η δριμύτητα όσον αφορά το κόστος χαρακτηρίζεται ως «Μέτρια», ενώ όσον αφορά τον τραυματισμό του ανθρώπινου δυναμικού χαρακτηρίζεται ως «Μικρή». Τελικά, βάσει της παραγράφου 2.2.2.2.1, η δριμύτητα ακολουθώντας την δυσμενέστερη των περιπτώσεων, εντάσσεται στην κατηγορία «Μέτρια».

Π.Β.10 Εκτίμηση Επικινδυνότητας

Στο τελικό στάδιο εκτίμησης της επικινδυνότητας που εμπεριέχει η περαιτέρω εκμετάλλευση των εν ενεργεία ήλων που μελετώνται προκύπτει, από τον Πίνακα 2 για πιθανότητα αστοχίας «Μεγάλη» και δριμύτητα «Μέτρια», ότι η επικινδυνότητα είναι «Μέτρια» ή επιπέδου (Γ). Αυτή η εκτίμηση επικινδυνότητας αναφέρεται στο χρονικό διάστημα $u=50$. Επομένως, για το μελλοντικό χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος $u=30$, προκύπτει με συντηρητική, μάλιστα, προσέγγιση, ότι η επικινδυνότητα είναι ανεκτή.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

Ball R. (2012), *The Fundamentals of Aircraft Compact Survivability: Analysis and Desing*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Edition 2, United States.

Clothier R., Walker D. (2014), *Safety Risk Management of Unmanned Aircraft Systems*, Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, Springer, Dordrecht, doi: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_39, p:2229-2275.

Limon S., Yadav O.P. (2017), *Mathematics Applied to Engineering*, Academic Press, North Dakota United States, Chapter 9 p.:171-190.

Smith, D. (2011), *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methos for Engineers*, Elsevier IEC, Edition 10, Oxford.

Montgomery D. (2013), *Introduction to Statistical Quality Control*, Wiley Ins., Edition 7, Arizona State University.

Άρθρα

Fourar H. E., Ogunvoul B. D., Budaev V. D., Lachi F. (2020). Risk Assessment in ensuring aircraft on-board systems safety, *Civil Aviation High Technologies*, Russian Federation, doi: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-4-84-95>

Chen H., Li L., Sun H. (2013). Risk Assessment of Aero Engine Failure Based on Monte Carlo Simulation, *Elsevier*, p:415-423.

Guo L., Junbo L., Huimin Z., Liangliang Z., Shuiting Di. (2022). Efficient Numerical Integration Algorithm of Probabilistic Risk Assessment for Aero-Engine Rotors Considering In-Service Inspection Uncertainties, *MDPI: Aerospace*, Basel, Switzerland, doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace9090525> .

Κανονισμοί & Πρότυπα

US Air Force System Safety Handbook, Kirtland: US Air Force Safety Agency, 2000.

ARAMP-1, NATO Risk Management Guide For Acquisition Programmes, NATO Standard, Edition 1, Version 1, February 2012.

ΥΠΕΘΑ ΣΥΑ, Σύστημα Υγιεινής¹ και Ασφάλειας, ΥΠΕΘΑ, 2007.

Ηλεκτρονικές Πηγές

[EASA/FAA Life limited Parts & Back to Birth TraceabilitySasSofia](#)

[eCFR :: 14 CFR 43.10 -- Disposition of life-limited aircraft parts. \(FAR 43.10\)](#)

[Business Aircraft MRO: What is Aircraft Overhaul? | AvBuyer](#)

[Soft Time, Hard Time, and OC CM Components \(faa-aircraft-certification.com\)](#)

[Components on an Aircraft – IALTA](#)

[Hard Time / Life Limited Part Lease Conditions – IALTA](#)

[Considerations Related to EASA Life Limited Parts, Hard Life and Back to Birth Traceability Requirements • SASSofiaSasSofia](#)

[Checking and Calculating the Shelf Life Expiration Date | SAP Help Portal](#)

[Risk Matrix Calculations – Severity, Probability, & Risk Assessment \(vectorsolutions.com\)](#)